

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61>

EDN:FSGGME



Модель и метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя

✉ Александр Владимирович Росляков, a.roslyakov@psuti.ru

✉ Вячеслав Васильевич Герасимов, v.gerasimov@psuti.ru

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, 443010, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается математическая модель и аналитический метод получения верхних граничных оценок сквозных задержек трафика eCPRI среднего приоритета в переднем транспортном сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet сетей 4G / 5G с использованием кредитного формирователя.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в связи с бурным развитием перспективных инфокоммуникационных приложений Индустрии 4.0 возникла необходимость в передаче разнообразного трафика, требующего высокого качества обслуживания. Для этих целей можно использовать транспортные возможности сетей 4G / 5G, однако при условии, что их сегмент Fronthaul реализован на базе перспективной технологии чувствительных ко времени сетей TSN Ethernet. Для обслуживания аperiodического трафика eCPRI в сети TSN для повышения пропускной способности Fronthaul целесообразно использовать специальный кредитный формирователь трафика CBS. Требования к граничным задержкам передачи различного вида трафика Fronthaul регламентируются стандартом IEEE 802.1CM, однако в нем отсутствует методика их определения.

Цель исследования заключается в разработке модели и метода оценки граничных задержек в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet в сетях 4G / 5G с использованием теории сетевого исчисления.

Методы включают получение аналитических выражений для кривых поступления трафика сегмента Fronthaul и кривых его обслуживания в коммутируемой сети TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя трафика CBS на основе базовых подходов теории сетевого исчисления.

Результаты. Разработана модель обслуживания разнородного трафика eCPRI в сегменте Fronthaul на базе TSN Ethernet. Предложен метод получения граничных значений задержек для трафика среднего приоритета, обслуживаемого кредитным формирователем CBS, на базе теории сетевого исчисления.

Новизна. Проведенное исследование является первой попыткой получения методики оценки верхних граничных задержек трафика eCPRI среднего приоритета, учитывающей требования IEEE 802.1CM.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели и метода оценки граничных задержек трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul сетей 4G / 5G на базе технологии TSN Ethernet, обслуживаемого с использованием кредитного формирователя, с применением математического аппарата теории сетевого исчисления.

Ключевые слова: сегмент Fronthaul сетей 4G / 5G, трафик среднего приоритета eCPRI, сеть TSN Ethernet, кредитный формирователь CBS, теория сетевого исчисления, сквозные задержки

Ссылка для цитирования: Росляков А.В., Герасимов В.В. Модель и метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика в сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 44–61. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61. EDN:FSGGME


Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61>

EDN:FSGGME

Model and Worst-Case End-to-End Traffic Delay Analysis in the Fronthaul Segment of 4G / 5G Networks Based on TSN Ethernet Technology Using Credit Based Shaper

 Alexander V. Roslyakov[✉], a.roslyakov@psuti.ru

 Vyacheslav V. Gerasimov, v.gerasimov@psuti.ru

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Samara, 443010, Russian Federation

Annotation

This article examines a mathematical model and an analytical method for obtaining upper bound estimates of end-to-end delays of medium-priority eCPRI traffic in the Fronthaul based on TSN Ethernet technology of 4G/5G networks using a credit shaper.

The relevance of this study stems from the fact that the rapid development of promising Industry 4.0 infocommunication applications has necessitated the transmission of diverse traffic requiring high quality of service. For these purposes, the transport capabilities of 4G/5G networks can be utilized, provided that their fronthaul segment is implemented using the advanced technology of time-sensitive TSN Ethernet networks. To service aperiodic eCPRI traffic in a TSN network, it is advisable to use a dedicated credit-based traffic shaper (CBS) to increase fronthaul throughput. Requirements for the boundary delays for the transmission of various types of fronthaul traffic are regulated by the IEEE 802.1CM standard; however, it lacks a methodology for determining them.

The aim of this study to develop a model and method for estimating boundary delays in the Fronthaul segment based on TSN Ethernet technology in 4G/5G networks using the theory of network calculus.

Methods include deriving analytical expressions for the Fronthaul traffic arrival curves and its service curves in the TSN Ethernet network using the CBS credit traffic shaper based on the basic approaches of network calculus theory.

Results. A model for serving heterogeneous eCPRI traffic in the Fronthaul based on TSN Ethernet was developed. A method for obtaining worst-case delay for CBS medium-priority traffic the was proposed, based on network calculus.

Scientific novelty. The conducted study is the first attempt to obtain a methodology for estimating upper bounds on end-to-end delays of medium priority eCPRI traffic, taking into account the requirements of IEEE 802.1CM.

The theoretical significance of the work lies in the development of a mathematical model and a method for estimating the boundary delays of medium-priority traffic in the Fronthaul segment of 4G/5G networks based on TSN Ethernet technology, served using a credit generator, using the mathematical apparatus of network calculus theory.

Keywords: Fronthaul transport segment of 4G/5G mobile networks, medium priority traffic of the eCPRI radio interface, Time-Sensitive Networking, Credit Based Shaper, Network Calculus theory, end-to-end delays

For citation: Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Model and Worst-Case End-to-End Traffic Delay Analysis in the Fronthaul Segment of 4G/5G Networks Based on TSN Ethernet Technology Using Credit Based Shaper. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):44–61. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-44-61. EDN:FSGGME

Введение

Согласно Стратегии развития отрасли связи в России, принятой в 2023 г. [1], до 2030 г. должно быть разработано и внедрено отечественное оборудование мобильных сетей 4G на базе стандарта

LTE, а в дальнейшем – оборудование, которое поддерживает перспективные технологии стандартов 5G и 6G. Для реализации этих амбициозных планов в Стратегии запланировано формирование необходимых научно-технологических заделов и отече-

ственной нормативно-технической базы, способствующих успешному решению поставленных задач развития отечественных сетей мобильной связи.

В сетях поколений 4G / 5G перспективной концепцией построения сети радиодоступа RAN (аббр. от англ. Radio Access Network) является централизованная / облачная архитектура C-RAN (аббр. от англ. Centralized / Cloud RAN), в которой вся инфраструктура разделена на ряд функциональных блоков (рисунок 1). Эти блоки взаимодействуют между собой через транспортную сеть, состоящую в общем случае из трех сегментов, называемых обобщенно xHaul [2–6]. Непосредственно с базовыми станциями в сетях 4G / 5G или в терминологии IEEE – радиоустройствами RE/eRE (аббр. от англ. Radio Equipment), связан передний сегмент (Fronthaul), который подключает их к управляющему устройству REC/eREC (аббр. от англ. Radio Equipment Control), выполняющему основную обработку информации. Данные в сегменте Fronthaul передаются с использованием стандартных радиоинтерфейсов CPRI/eCPRI (аббр. от англ. Common Public Radio Interface). Интерфейс eCPRI за счет пакетной передачи данных обеспечивает большую эффективность, гибкость и масштабируемость сети радиодоступа, поэтому он используется в сетях 5G, а также планируется в сетях 6G.

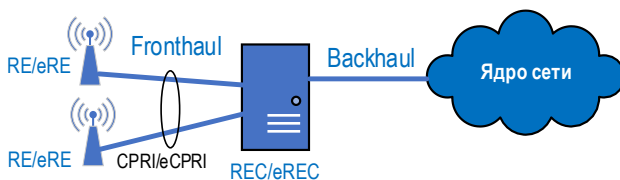


Рис. 1. Централизованная / облачная C-RAN

Fig. 1. Centralized / Cloud Radio Access Network

Для связи RE/eRE и REC/eREC в сегменте Fronthaul сетей 4G обычно используются физические соединения «точка-точка» на базе оптоволоконных кабелей. В сетях 5G трафик C-RAN дополнился разнообразным трафиком перспективных инфокоммуникационных приложений (системы промышленной автоматизации Индустрии 4.0, интеллектуальные транспортные системы, тактильный Интернет, промышленный Интернет вещей, киберфизические системы, беспилотный транспорт и др.). Этот трафик предъявляет жесткие требования к характеристикам передачи данных в мобильной сети, что потребовало пересмотра принципов построения сегмента Fronthaul. В проводных сетях (прежде всего бортовых и промышленных) в последние годы активно используется технология чувствительных ко времени сетей TSN (аббр. от англ. Time-Sensitive Networking) [7–15], которая является модификацией стандартной технологии Ethernet. Основным отличием TSN является воз-

можность передачи трафика различного вида с соблюдением необходимых гарантий качества обслуживания – задержки, джиттера, синхронизации, надежности доставки информации. С учетом этого TSN является перспективной технологией для реализации сегмента Fronthaul в сетях 5G / 6G. В стандарте IEEE 802.1CM [16] приведены принципы построения сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet, определены нормы на сквозные задержки трафика eCPRI различных приоритетов, однако в документе отсутствует методика определения этих задержек.

Метод определения граничных задержек в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet с использованием временного формирователя TAS (аббр. от англ. Time-Aware Shaping) представлен в работах [17, 18]. Однако формирователь TAS реализует периодическое временное расписание GCL (аббр. от англ. Gate Control List), в котором зафиксированы точные моменты открытия и закрытия выходных портов коммутатора для передачи трафика соответствующего приоритета. Такая схема работы сети TSN Ethernet лучше всего подходит для передачи периодического трафика и трафика, требующего строгих гарантий границ задержки. Поэтому временной формирователь TAS целесообразно использовать для обслуживания трафика eCPRI высшего приоритета – пользовательских данных быстрого типа, для которых, согласно профилю IEEE 802.1CM, максимальная сквозная односторонняя задержка не должна превышать 100, 200 или 500 мкс в зависимости от класса трафика [16]. Для трафика среднего приоритета (медленные пользовательские данные и быстрые данные управления и обслуживания C&M (аббр. от англ. Control and Management)) и низшего приоритета (медленные данные C&M) нормы на сквозные задержки менее жесткие – 1 и 100 мс соответственно. Кроме того, в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet может передаваться трафик различных сторонних инфокоммуникационных приложений, использующих сети мобильной связи 4G / 5G как транспорт с гарантированной передачей данных. Этот трафик чаще всего является аperiodическим, и передача его с применением временного формирователя TAS приведет к неэффективному использованию полосы пропускания сегмента Fronthaul [19]. Поэтому при передаче трафика eCPRI среднего приоритета и трафика сторонних инфокоммуникационных приложений целесообразно использовать формирователь трафика на основе кредита CBS (аббр. от англ. Credit Based Shaping), описанный в стандарте IEEE 802.1Qav [20], который позволяет обеспечить гибкую загрузку сети радиодоступа. В статье приведены базовые принципы реализации Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet, предлагается модель узла сегмента на базе теории сетевого исчисления NC

(аббр. от англ. Network Calculus) и разработан метод оценки граничных сквозных задержек передачи трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul с использованием кредитного формирователя CBS.

Реализация сегмента Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet

Сеть TSN Ethernet поддерживает передачу трафика трех разных классов: с привязкой ко времени ТТ (аббр. от англ. Time Triggered), аудио-видео моста AVB (аббр. от англ. Audio-Video Bridging) и лучшее из возможного ВЕ (аббр. от англ. Best Effort) [8]. При использовании технологии TSN Ethernet для реализации сегмента Fronthaul в мобильных сетях 5G эти три класса трафика TSN можно соотносить со тремя типами трафика интерфейса eCPRI: ТТ, AVB, ВЕ (рисунок 2). Трафик ТТ – трафик высшего приоритета (ВП), соответствующий пользовательским данным данного быстрого типа eCPRI и обслуживаемый с использованием временного формирователя TAS [21] в соответствии с расписанием GCL. Трафик AVB – трафик среднего приоритета (СП), соответствующий медленным пользовательским данным и быстрым данным С&М eCPRI и обслуживаемый с использованием кредитного формирователя CBS [20]. Чаще всего трафик AVB разбивают на два приоритета, которые называют классом А (высший приоритет) и классом В (низший приоритет). По аналогии с такой классификацией трафик медленных пользовательских данных eCPRI в дальнейшем будем обозначать индексом СП1, а трафик быстрых данных С&М – СП2. Трафик ВЕ – трафик низшего приоритета (НП), соответствующий медленным данным С&М eCPRI и обслуживаемый с использованием остаточного принципа полосы пропускания кадра Ethernet.

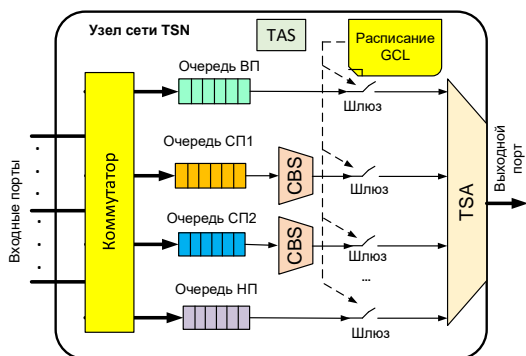


Рис. 2. Схема узла сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet
Fig. 2. Schematic Diagram of a TSN Ethernet-Based Fronthaul Segment Node

Логично использовать в качестве модели узла TSN Ethernet (конечной точки или коммутатора) одноканальную систему массового обслуживания (СМО), на которую поступают агрегированные по-

токи трафика интерфейса eCPRI четырех приоритетов – ВП, СП1, СП2 и НП (рисунок 3) [17].

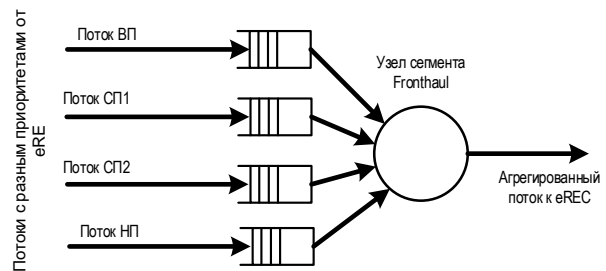


Рис. 3. Модель узла сегмента Fronthaul сетей 4G / 5G в виде СМО

Fig. 3. Model of a 4G / 5G Network Fronthaul Segment Node as a System with Queues

Для получения оценок верхних границ задержек заявок в СМО, моделирующей работу сегмента Fronthaul, необходимо знание функций распределения интервалов времени между пакетами в потоках разнородного трафика интерфейса eCPRI и длительностей обслуживания этих потоков в сегменте. Чаще всего такие распределения имеют сложный характер, получить их аналитическое описание, используя математический аппарат теории массового обслуживания [22], весьма затруднительно. При этом анализ характеристик СМО общего вида G/G/1 возможен только аппроксимационными методами с получением лишь средних значений времени ожидания заявок [23].

Поэтому для определения граничных оценок задержек в любых СМО с ожиданием в наибольшей степени подходит теория Network Calculus [24–29], которая оперирует детерминированными параметрами входного потока заявок и исследуемой СМО и позволяет достаточно просто получить граничные оценки качества функционирования сетевой модели. Для практического применения теории Network Calculus необходимо знать функции, описывающие входной поток трафика и обслуживающее устройство, называемые кривыми поступления и обслуживания соответственно.

Базовые определения теории Network Calculus

Профессор Р. Круз в 1991 г. в двух своих работах [24, 25] сформулировал основные принципы теории детерминированного Network Calculus. В ее основе лежит математический аппарат идемпотентной (min,+)-алгебры [30]. Эта алгебра включает всего две операции (диоид) и, в отличие от традиционной алгебры, в ней идемпотентное сложение (обозначается как \wedge) определяется вычислением инфимума $a \wedge b := \inf(a, b)$, а операция идемпотентного умножения является классической операцией сложения $a \times b := a + b$. Далее приведены несколько определений, которые необходимы для понятия основных положений теории Network Calculus.

Определение 1. (Min,+)-свертка

Для возрастающих в широком смысле функций $x(t)$ и $y(t)$ их (min,+)-свертка определяется выражением:

$$x(t) \otimes y(t) = \inf_{0 < \tau < t} \{x(t + \tau) + y(\tau)\}, \quad (1)$$

где \inf – инфимум (нижняя граница) функции.

Определение 2. (Min,+)-обратная свертка

(Min,+)-обратная свертка функций $x(t)$ и $y(t)$ равна:

$$x(t) \oslash y(t) = \sup_{\tau \geq 0} \{x(t + \tau) + y(\tau)\},$$

где \sup – супремум (верхняя граница) функции.

Определение 3. Кривая поступления

Входной поток $A(t)$ ограничен сверху возрастающей в широком смысле функцией – кривой поступления $\alpha(t)$ тогда и только тогда, когда для всех $\tau \leq t$:

$$A(t) - A(\tau) \leq \alpha(t - \tau). \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что в течение любого промежутка времени $\Delta t = t - \tau$ количество данных в потоке $A(\Delta t)$ ограничено величиной $\alpha(\Delta t)$ (рисунок 4).

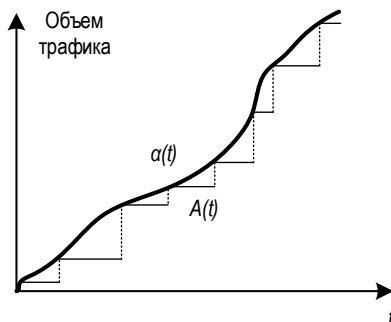


Рис. 4. Кривая поступления $\alpha(t)$ для входящего потока $A(t)$

Fig. 4. Arrival Curve $\alpha(t)$ for the Input Flow $A(t)$

Определение 4. Кривая обслуживания

Обслуживающее устройство реализует для входящего потока $A(t)$ с кривой поступления $\alpha(t)$ кривую обслуживания $\beta(t)$, если $\beta(t)$ является возрастающей в широком смысле функцией и выходной поток удовлетворяет неравенству $D(t) \geq A(t) \otimes \beta(t)$ (рисунок 5).

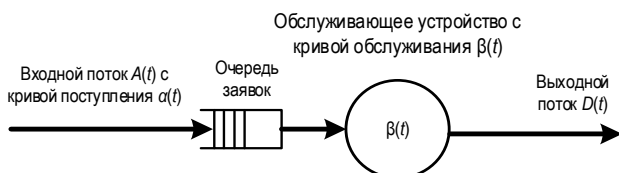


Рис. 5. Кривая обслуживания $\beta(t)$ и выходной поток $D(t)$

Fig. 5. Service Curve $\beta(t)$ and Output Flow $D(t)$

Одним из главных результатов теории Network Calculus является возможность определения верхней границы задержки потока трафика $w(t)$, кото-

рая в СМО с кривой поступления $\alpha(t)$ и кривой обслуживания $\beta(t)$ определяется выражением [24]:

$$w(t) = \sup_{t \geq 0} \{\inf\{\tau \geq 0: \alpha(t) < \beta(t + \tau)\}\}. \quad (3)$$

На графике кривых поступления и обслуживания (рисунок 6) максимальное горизонтальное расстояние между этими кривыми определяет верхнюю границу задержки потока $w(t)$ согласно (3), в то время как максимальное вертикальное расстояние $q(t)$ показывает наибольшую загрузку системы (число заявок в очереди и обслуживающем устройстве) в момент времени t .

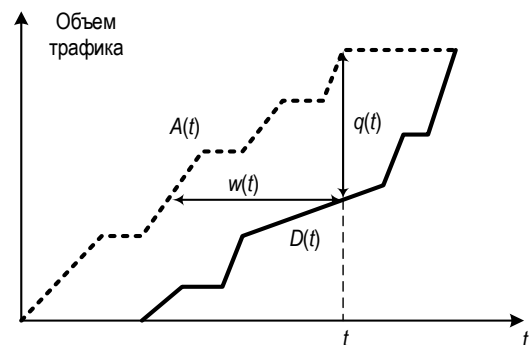


Рис. 6. Определение задержки и загрузки системы обслуживания

Fig. 6. Determination of Delay and Service System Loading

Более подробную информацию о теории Network Calculus можно найти в [29].

Базовые принципы работы кредитного формирователя трафика CBS

Критичные данные eCPRI в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet передаются с использованием временного формирователя TAS (стандарт IEEE 802.1Qbv-2015 [21]), который обеспечивает низкую и гарантированную сквозную задержку. Однако передача мультимедийного потокового трафика не требует от сети столь строгих гарантий задержки, гораздо важнее обеспечить непрерывный поток аудио- и видеокладов и более равномерную пересылку данных. Для передачи таких потоков трафика, называемых в стандарте IEEE 802.1Qav [20] AVB, в сети TSN Ethernet используется формирователь на основе кредита CBS, который сглаживает выбросы трафика и равномерно распределяет кадры во времени. В формирователе CBS для каждого потока организуется своя очередь и ее состояние описывается в каждый момент времени определенной условной величиной, называемой кредитом. Когда кадры ждут передачи в очереди или когда нет сообщений и кредит отрицательный, то его величина увеличивается с настраиваемой скоростью V^{up} (в стандарте IEEE 802.1 Qbu для нее используется обозначение $idSl$ (idle slope)). Во время передачи кадра или последовательности кадров (в зависимости от того, сколько кредита

было накоплено ранее) величина кредита уменьшается с настраиваемой скоростью V_i^{down} (в стандарте IEEE 802.1 Qbv используется обозначение *sdSl* (send slope)). При этом передача кадра из очереди возможна только в том случае, если ее кредит неотрицательный. В то же время, если в очереди нет сообщений и кредит положительный, то он сбрасывается в ноль.

Скорость возрастания кредита V_i^{up} i -й очереди в формирователе CBS пропорциональна доле полосы пропускания ΔB_i , выделяемой i -му классу трафика из общей полосы пропускания R выходного порта коммутатора [20]:

$$V_i^{\text{up}} = R \cdot \Delta B_i. \quad (4)$$

Величина скорости убывания кредита V_i^{down} всегда отрицательная и определяется из уравнения:

$$V_i^{\text{down}} = V_i^{\text{up}} - R. \quad (5)$$

В соответствии со стандартом IEEE 802.1Qav, в кредитном формирователе выделяют два вида трафика: класс *A* (приоритет 5) и класс *B* (приоритет 4). Трафик класса *A* допускает задержки не более 2 мс при максимальном периоде передачи 125 мкс. Для трафика класса *B* задержки не должны превышать 50 мс при максимальном периоде передачи 250 мкс [20]. Причем оба класса трафика не должны превышать предустановленную максимальную долю занимаемой полосы пропускания (для аудио- и видеоприложений не более 75 %). Для защиты трафика *BE* от блокирования передачи последовательными кадрами более высокоприоритетного трафика классов *A* и *B* формирователь CBS не разрешает передачу трафика, если его кредит отрицательный.

Приоритетные очереди в TSN обслуживаются с помощью двух способов: без прерывания и с прерыванием обслуживания ранее поступивших кадров. Обычный коммутируемый Ethernet использует приоритетную очередь без прерывания, когда критичный ко времени кадр не обрабатывается сразу после его прибытия, если обрабатывается некритичный ко времени кадр. Он помещается в начало очереди и обрабатывается как можно быстрее после передачи некритичного кадра. Таким образом, критичный кадр будет получать задержку в зависимости от объема некритичного трафика. Для уменьшения задержки в стандарте IEEE 802.1Qbv [31] используется очередь с прерыванием. Она не только минимизирует задержку для критичных кадров, но и обеспечивает защиту для некритичных кадров. Если критичный кадр получен во время обработки некритичного кадра, его обработка прекращается, и она продолжается после завершения обработки критичного кадра. Некритичный кадр может быть прерван несколько раз, пока

не будет достигнуто ограничение по количеству прерываний. Если стандарт IEEE 802.1Qbv предотвращает слишком долгое обслуживание некритичных кадров, то стандарт IEEE 802.1Qbv уменьшает задержку передачи для критичных кадров. Например, если передается кадр с MTU (*аббр. от англ. Maximum Transmission Unit*) в 1500 байт, то без прерывания он может заблокировать порт 1 Гбит/с примерно на 12,5 мкс. Однако, если используется прерывание кадра, то максимальное время блокировки порта – не более 1 мкс.

Приоритетное прерывание передачи кадра, определенное в стандартах IEEE 802.1Qbv и IEEE 802.3br [32], позволяет также уменьшить величину защитного интервала в кадре TSN Ethernet, который выбирается равным наибольшему возможному размеру фрагмента, а не всего конкурирующего кадра. При этом размер фрагмента кадра в результате прерывания его передачи должен быть не менее 64 байт.

В формирователе TAS существует ряд ограничений, которые необходимо соблюдать для обеспечения осуществимости расписания GCL [8]. Например, когда соответствующий шлюз для трафика ВП открыт, остальные шлюзы для трафика СП1, СП2 или НП закрыты, и наоборот. На рисунке 7 изображены две конечные точки ES1 и ES2 и коммутатор SW, для которых показаны соответствующие расписания. В моменты времени t_2 и t_3 шлюз для очереди ВП в коммутаторе SW открыт, в то время как шлюзы для очередей СП1 и СП2 закрыты. В течение этого периода времени передача кадров трафика СП и НП запрещена до тех пор, пока шлюз ВП не будет открыт, а соответствующие шлюзы СП и НП не будут открыты с момента времени t_4 . Таким образом, трафик СП и НП не может передаваться в интервалах времени, зарезервированных для кадров ВП.

Однако, если кадры СП или НП уже находятся на передаче в начале временного окна, запланированного для трафика ВП (рисунок 8а), кадр трафика ВП может быть задержан. В сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet используются два режима интеграции трафика разных приоритетов. Один из них определен в стандарте IEEE 802.1Qbv [21] – это непрерываемый защитный интервал (ЗИ) перед каждым временным окном кадра ВП, как показано на рисунке 8б. ЗИ имеет длину кадра максимального размера, который может препятствовать передаче трафика ВП, что в худшем случае составляет максимальный размер передаваемого блока данных MTU Ethernet в 1500 байт. В течение ЗИ шлюзы, связанные с трафиком СП и НП, закрываются заранее, чтобы гарантировать, что выходной порт свободен, когда очередь ВП открыта для передачи. Режим интеграции без прерывания приведет к потере полосы пропускания из-за ЗИ, но он гарантирует отсутствие задержек для трафика ВП.

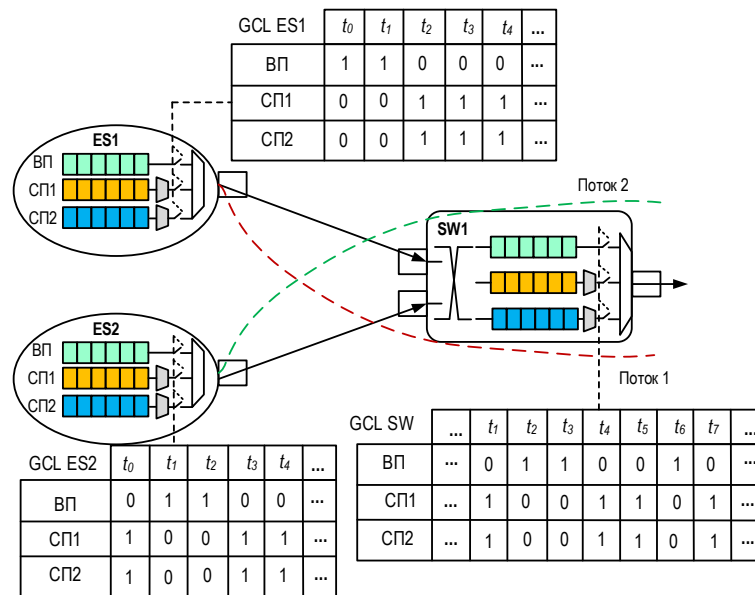


Рис. 7. Примеры расписаний GCL в сети TSN Ethernet

Fig. 7. GCL Examples for TSN Ethernet Network

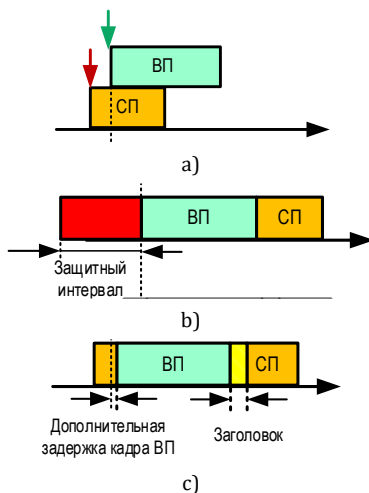


Рис. 8. Модели интеграции трафика ВП и СП: а) поступление кадров ВП и СП; б) режим без прерывания; в) режим с прерыванием

Fig. 8. Models of Integration of HP and MP Traffic: a) Arrival of HP and MP Frames; b) Mode Without Interruption; c) Mode with Interruption

Другой режим интеграции – это режим с прерыванием кадров, определенный в IEEE 802.1Qbu [31], как показано на рисунке 8с. В этом случае кадр СП1 или СП2 прерывается кадром ВП, и его передача возобновляется с момента остановки после завершения передачи кадра ВП. Когда шлюз для очереди ВП готов к открытию, соответствующий шлюз для прерываемого кадра СП, который уже находится в процессе передачи, открывается на время, необходимое для завершения передачи фрагмента кадра СП перед открытием очереди ВП. При возобновлении передачи оставшийся фрагмент кадра СП будет включать дополнительную служебную информацию в виде соответствующего заголовка, предназначенного для сбора фрагментов кадра СП в ко-

нечной точке назначения. По сравнению с ЗИ, дополнительные задержки могут быть незначительными, поэтому использование приоритетного прерывания уменьшает задержку трафика СП и увеличивает пропускную способность. Однако следует учитывать, что для трафика ВП это приведет к джиттеру задержки.

В свою очередь, порядок передачи потоков трафика СП в сегменте Fronthaul дополнительно определяется формирователем на основе кредитов CBS, цель которого – предотвратить большие задержки потоков с более низким приоритетом. Поэтому передача кадра СП, находящегося в очереди, разрешена, если одновременно выполняются три условия [19]:

- 1) шлюз данной очереди СП_i открыт;
- 2) формирователь CBS разрешает передачу этого потока СП_i;
- 3) нет других передаваемых кадров СП_i с более высоким приоритетом.

Каждый класс трафика СП_i имеет связанное с ним значение кредита. Передача кадра СП_i невозможна при отрицательной величине его кредита. В начале работы кредиты всех потоков СП_i устанавливаются в ноль. В дальнейшем, если передается кадр СП_i, то кредит его очереди уменьшается со скоростью $V_{СПi}^{down}$ ($i \in \{1, 2\}$) и увеличивается со скоростью $V_{СПi}^{up}$ ($i \in \{1, 2\}$), когда кадр СП_i ожидает передачи в очереди. Если очередь СП_i пуста, то ее кредит сбрасывается в ноль; в противном случае он увеличивается со скоростью данного потока до нуля. То же самое происходит, если шлюз для соответствующей очереди трафика СП_i открыт, а кадров для передачи нет. Чтобы избежать переполнения кредита, он остается неизменным, когда соответствующий шлюз СП_i закрыт и передается трафик ВП.

На рисунке 9 показан пример работы кредитного формирователя CBS с кадрами TSN Ethernet ВП, СП и НП в сегменте Fronthaul соответственно в двух режимах интеграции – без прерывания кадров (см. рисунок 9а) и с прерыванием (рисунок 9б). Прямоугольники сверху временных осей отображают длительности передачи кадров, а стрелки сверху вниз – моменты времени поступления этих кадров. Ломаные линии на временных осях показывают изменение величины кредита для соответствующего класса СП i .

На рисунке 9а показан режим работы кредитного формирователя CBS без прерывания кадров. В момент времени t_0 поступает кадр СП1-1, но в это время в звене TSN Ethernet еще передается кадр НП. Из-за отсутствия прерывания кадров НП кадр СП1-1 будет ждать окончания передачи кадра НП и его кредит увеличивается со скоростью $V_{СП1}^{up}$. В момент времени t_1 передача кадра НП завершается, однако шлюзы потоков СП будут еще закрыты на время ЗИ для гарантий передачи трафика ВП и недостаточного интервала времени (из-за ЗИ) для передачи всего кадра СП1-1. Следовательно, кредит СП1 остается неизменным в течение интервала $[t_1, t_4]$, когда шлюзы СП закрыты. Даже если кадр СП2-1 поступает в момент времени t_2 , его кредит также должен

быть неизменен (в рассматриваемом примере он равен нулю). С момента времени t_4 , поскольку шлюз для очереди ВП закрыт, и СП1 имеет более высокий приоритет, чем СП2, разрешено передавать кадр СП1-1. Кредиты СП1 и СП2 уменьшаются и увеличиваются со скоростями $V_{СП1}^{down}$ и $V_{СП2}^{up}$ соответственно. Во время передачи кадра СП1-1, следующий кадр СП1-2 помещается в очередь СП1 в момент времени t_5 . В момент времени t_6 , когда завершается передача кадра СП1-1, два кадра СП1-2 и СП2-1 ожидают передачи. Но кредит СП1 в этот момент отрицательный, поэтому кадр СП1-2 не может передаваться, и кадр СП2-1 получает разрешение на передачу. По окончании передачи кадра СП2-1 начинается передача кадра СП1-2, поскольку его кредит увеличился до значения, превышающего 0. На рисунке 9б моменты поступления всех кадров такие же, как и на рисунке 9а. Однако из-за режима интеграции с прерыванием кадр ВП задерживается на время от t_3 до t_4 , а к оставшемуся фрагменту кадра СП1-1 добавляется служебная информация для сбора фрагментов. Кроме того, видно, что передача кадров СП на рисунке 9б завершается раньше, чем на рисунке 9а, хотя передача кадра ВП несколько задерживается.

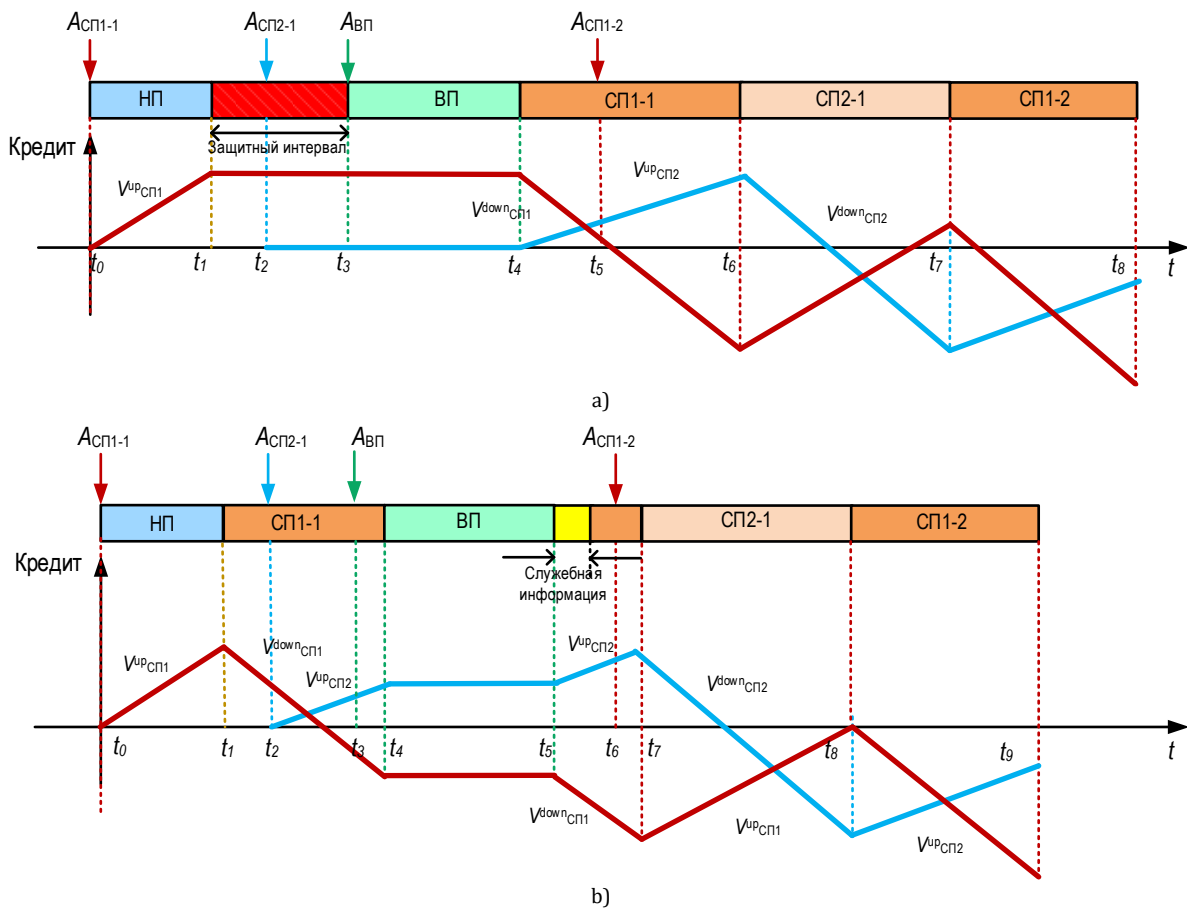


Рис. 9. Работа формирователя CBS: а) без прерывания; б) с прерыванием
 Fig. 9. Credit Base Shaper Operation: a) without Interruption; b) with Interruption

Выбор параметров кредитного формирователя трафика CBS

Как было указано выше, в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet передача трафика СП связана не только с состояниями шлюзов временного формирователя TAS, но и с работой кредитного формирователя CBS. Хотя передача кадров ВП как в режиме с прерыванием, так и в режиме без прерывания задерживает трафик СП, кредиты для обоих классов СП в эти периоды остаются неизменными. Следовательно, можно считать, что кредиты потоков трафика СП сегмента Fronthaul не зависят от трафика ВП и их можно анализировать изолированно. Фактически величина кредита связана только с передачей и задержкой кадров СП_{*i*} сегмента Fronthaul во время открытия соответствующего шлюза СП_{*i*}, а также настройками скоростей уменьшения $V_{СПi}^{down}$ и увеличения $V_{СПi}^{up}$ кредита для каждого *i*-го класса трафика, которые являются параметрами конфигурации, задаваемыми на этапе планирования и конфигурирования сегмента Fronthaul на базе TSN Ethernet.

В стандарте IEEE 802.1Qbv [22] приведено только соотношение между скоростями $V_{СПi}^{down}$ и $V_{СПi}^{up}$ в виде:

$$V_{СПi}^{down} = V_{СПi}^{up} - R, \quad (6)$$

где R – скорость выходного порта TSN Ethernet.

Однако в общем случае возможны любые значения скоростей изменения кредитов в формирователе CBS для разных типов трафика сегмента Fronthaul. Поэтому следует учитывать, что при определенных параметрах трафика потоков СП1 и СП2 перегрузка трафика может вызвать переполнение кредита и сбой функции защиты от недостаточной полосы пропускания в кредитном формирователе CBS, что не должно допускаться. Таким образом, необходимо ограничить скорости изменения кредитов $V_{СПi}^{down}$ и $V_{СПi}^{up}$, чтобы убедиться, что кредит потока определенного класса трафика СП ограничен. Поскольку поток СП1 имеет более высокий приоритет, его кредит должен уменьшаться при соответствующей передаче кадра, как только кредит СП1 станет больше нуля в конце передачи кадра с более низким приоритетом, и увеличиваться, когда кредит СП1 станет меньше нуля в конце передачи кадра СП1.

Следовательно, для любых скоростей $V_{СП1}^{down}$ и $V_{СП1}^{up}$ кредит СП1 должен находиться в следующих пределах:

$$L_{СП1}^{max} \cdot \frac{V_{СП1}^{down}}{R} \leq C_{СП1} \leq \max\{L_{СП2}^{max}, L_{ВП}^{max}\} \cdot \frac{V_{СП1}^{up}}{R}, \quad (7)$$

где $L_{СПi}^{max}$ – максимальный размер кадра потока *i*-го среднего приоритета; $L_{ВП}^{max}$ – максимальный размер кадра потока низшего приоритета; $C_{СП1}$ – кредит потока СП1.

По аналогии с (7) границы изменения кредита потока СП2 можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} L_{СП2}^{max} \cdot \frac{V_{СП2}^{down}}{R} \leq C_{СП2} \leq \\ \leq \left(\frac{L_{СП2}^{max} + L_{СП1}^{max}}{R} - L_n^{max} \cdot \frac{V_{СП1}^{up}}{V_{СП1}^{down} \cdot R} \right) \cdot V_{СП2}^{up}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $L_n^{max} = \max\{L_{СП2}^{max}, L_{ВП}^{max}\}$.

Очевидно следующее ограничение, при котором кредит потока СП2 не переполняется:

$$V_{СП1}^{down} \cdot V_{СП2}^{down} \geq V_{СП1}^{up} \cdot V_{СП2}^{up}. \quad (9)$$

Кривые поступления трафика сегмента Fronthaul

Определим кривые поступления для трафика классов СП1 и СП2 с учетом наличия трафика ВП в выходном порту TSN Ethernet в режимах без прерывания и с прерыванием обслуживания кадров соответственно. Начнем с определения агрегированной кривой поступления, учитывающей влияние трафика ВП, поскольку оставшееся от него время в кадре TSN Ethernet доступно для обслуживания трафика СП. При использовании временного формирователя TAS агрегированная кривая поступления трафика ВП получается путем суммирования кривых поступления каждого отдельного периодического потока ВП, смещенного в кадре TSN Ethernet на соответствующие интервалы времени [33]. Однако временное расписание GCL управляет состояниями шлюзов для очереди потоков ВП, а не отдельных кадров ВП. Если конечные устройства в сети TSN Ethernet не конфигурируются централизованно [34], то потоки ВП могут потерять необходимую периодичность передачи на всем маршруте в сети TSN Ethernet. Будем учитывать влияние трафика ВП на агрегированные кривые поступления трафика на выходной порт на основе запланированных в GCL временных окон для передачи трафика ВП. Кроме того, в агрегированной кривой поступления трафика ВП будем учитывать величину ЗИ для режима без прерывания обслуживания, а также ситуации конкуренции кадров трафика разных приоритетов для режима с прерыванием обслуживания кадров более низких приоритетов.

В формирователе TAS расписание GCL для каждого выходного порта TSN Ethernet повторяется с соответствующим сверхциклом T_{GCL} . Следовательно, любое временное окно передачи трафика ВП повторяется циклически в T_{GCL} . При известном GCL выходного порта можно определить конечное число окон N для передачи трафика ВП в сверхцикле T_{GCL} . Например, на рисунке 10 оно равно 3. Кроме того, из расписания известно, когда открывается шлюз ВП и как долго он находится в этом состоянии. Обозначим длину *i*-го временного окна трафика ВП в выходном порту как L_i ($i \in [0, N - 1]$), см. рисунок 10.

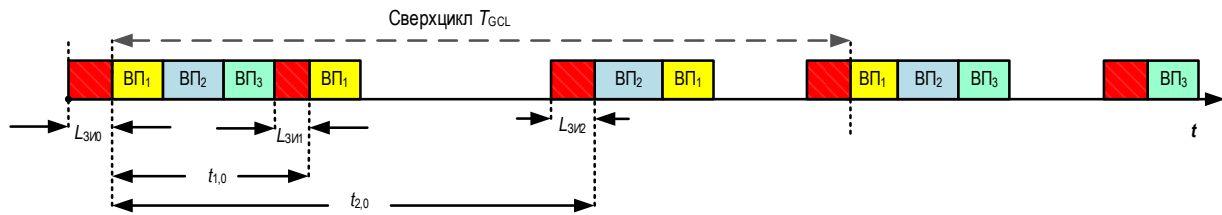


Рис. 10. Защитные интервалы после временных окон трафика ВП

Fig. 10. Guard Intervals after VP Traffic Time Windows

Более того, из расписания известны относительные смещения $\tau_{j,i}$ ($j \in [i + 1, i + N - 1]$) между временами начала i -го и j -го окон ВП, если взять i -е окно ВП в качестве точки отсчета. Например, на рисунке 10 интервалы времени $\tau_{1,0}$ и $\tau_{2,0}$ указывают смещения 1 и 2 кадров ВП соответственно относительно 0-го окна ВП длиной L_0 , взятого в качестве точки отсчета. Очевидно, что $\tau_{i,j} = 0$, если $j = i$.

Тогда возможная агрегированная кривая поступления трафика ВП может быть задана следующим образом [35]:

$$\alpha_{ВП,i}(t) = \sum_{j=1}^{i+N-1} L_j \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i}}{T_{GCL}} \right\rfloor, \quad (10)$$

где $L_j \cdot R$ – максимальное количество бит, которое может быть передано в выходном порту TSN Ethernet со скоростью R в течение окна передачи трафика ВП длиной L_j . Такая ступенчатая функция представляет собой верхнюю границу передачи трафика ВП в периодических временных окнах длиной L_j , а относительные смещения $\tau_{j,i}$ показывают соотношения между различными окнами трафика ВП в сверхцикле. Таким образом, выбирая различные окна трафика ВП в сверхцикле в качестве опорных и используя (10), можно получить набор возможных агрегированных кривых поступления $\alpha_{ВП,i}(t)$ ($i \in [0, N - 1]$). В худшем случае агрегированная кривая поступления трафика ВП в выходной порт является верхней огибающей всех возможных кривых поступления пересекающихся потоков ВП:

$$\alpha_{ВП}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \{ \alpha_{ВП,i}(t) \}. \quad (11)$$

Однако в режиме без прерывания ЗИ устанавливается перед каждым началом передачи трафика ВП. Тогда передача трафика СП не разрешена между началом ЗИ и началом окна передачи трафика ВП. В наилучшем случае величина защитного интервала $L_{ЗИ,i}$ перед i -м ($i \in [0, N - 1]$) окном пе-

редачи трафика ВП равна минимальному времени передачи кадров СП максимального размера, конкурирующих на выходном порту, и интервалу времени между двумя последовательными окнами трафика ВП.

Учитывая кривые поступления согласно (10) и (11), агрегированная кривая поступления трафика для конкурирующих потоков ВП и ЗИ в выходном порту TSN Ethernet в режиме без приоритета определяется по выражению (12), где множитель $(L_j + L_{ЗИ,j}) \cdot R$ учитывает добавление максимального количества бит, обусловленных j -й защитным интервалом, к максимальному количеству бит ВП-кадров, переданных в j -м окне передачи трафика ВП, которые вместе задерживают обслуживание трафика СП (рисунок 11а). Более того, из-за возможной разницы длин защитных интервалов расстояние между суммарными временными окнами «ЗИ + ВП» может измениться, что отражено в (12) через множитель $(L_j + L_{ЗИ,j})$.

В режиме с прерываниями передачи кадров, если передавался кадр СП и передача его была прервана кадром более высокого приоритета, при дальнейшей передаче оставшейся части кадра СП появляется дополнительная временная задержка, вызванная передачей служебной информации объемом $L_{СЛ}$, бит для восстановления прерванного кадра СП [34]. В наилучшем случае каждое окно трафика ВП прерывает кадр СП1 или СП2, как показано на рисунке 11b. Очевидно, что дополнительная задержка равна $L_{СЛ} \cdot R$ и ее можно рассматривать как следствие поступления более приоритетного условного трафика, вызывающего задержку трафика СП. Поскольку дополнительные задержки появляются только после каждого окна передачи трафика ВП, кривая поступления этого дополнительного условного трафика с учетом (10 и 11) может быть задана следующим выражением (13), где $T_{ВПj}$ – длительность временного окна передачи j -го трафика ВП.

$$\alpha_{ЗИ+ВП}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{i+N-1} (L_j + L_{ЗИ,j}) \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i} + L_{ЗИ,j} - L_{ЗИ,i}}{T_{GCL}} \right\rfloor \right\}. \quad (12)$$

$$\alpha_{СЛ}(t) = \max_{0 \leq i \leq N-1} \left\{ \sum_{j=i}^{i+N-1} L_{СЛ} \cdot R \cdot \left\lfloor \frac{t - \tau_{j,i} - T_{ВПj}}{T_{GCL}} \right\rfloor \right\}. \quad (13)$$

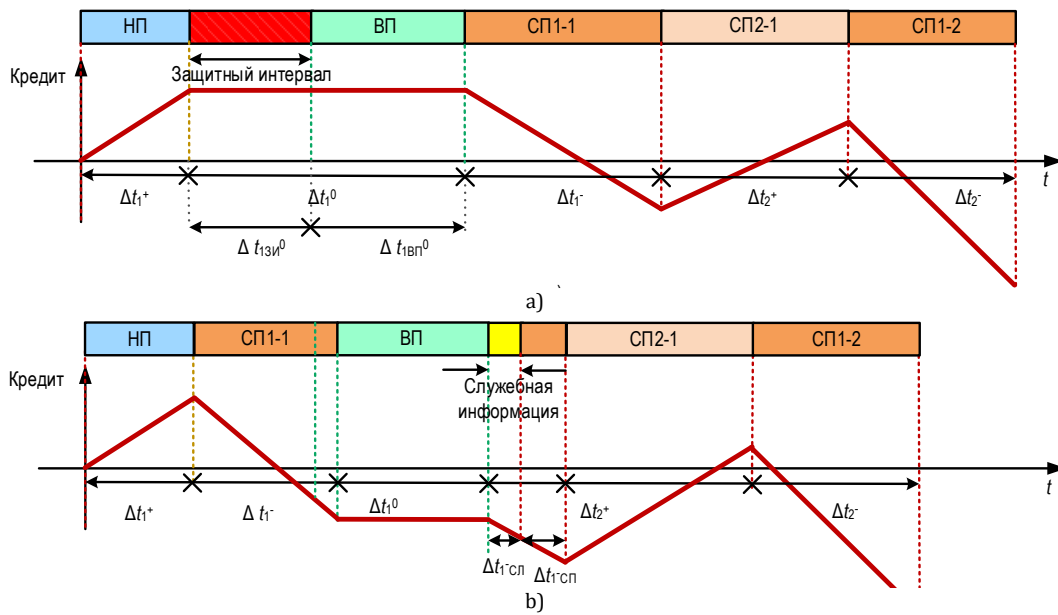


Рис. 11. Работа CBS в режимах: а) без прерывания; б) с прерыванием

Fig. 11. Credit Shaper's Work in Different Modes: a) without Interruption; b) with Interruption

Кривые обслуживания трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul

Независимо от режимов передачи кадров, любой временной интервал Δt работы кредитного формирователя может быть разделен на три части (см. рисунок 11):

$$\Delta t = \Delta t^+ + \Delta t^- + \Delta t^0, \tag{14}$$

где Δt^+ – время нарастания кредита трафика СП; Δt^- – время снижения кредита трафика СП; Δt^0 – время неизменного значения кредита трафика СП.

Обслуживание трафика СП сегмента Fronthaul в выходном порту TSN Ethernet возможно только в течение времени снижения кредита Δt^- . Учитывая это, определим кривые обслуживания трафика СП для соответствующего режима интеграции с потоками других приоритетов.

Рассмотрим вначале режим работы коммутатора TSN Ethernet без прерывания кадров. Обозначим процессы поступления и передачи потоков СП в выходной порт через $A_{СП}$ и $A_{СП}^*$ соответственно. Аналогично для потоков ВП и условного трафика ЗИ введем соответствующие обозначения $A_{ВП}$, $A_{ВП}^*$, $A_{ЗИ}$ и $A_{ЗИ}^*$. Пусть τ – начало последнего периода занятости выходного порта TSN Ethernet. Следовательно, в момент времени τ очереди кадров всех потоков пусты, т. е. $A_{СП}^* = A_{СП}$, $A_{ВП}^* = A_{ВП}$, $A_{ЗИ}^* = A_{ЗИ}$ и кредит потока СП $C_{СП} = 0$.

Для некоторого произвольного времени $t \geq \tau$ интервал $\Delta t = t - \tau$ можно разделить на три составляющие согласно (14). В режиме без прерывания интервал Δt^0 обусловлен ЗИ и окнами передачи трафика ВП, т. е. $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0$ и $\Delta t^- = \Delta t_{СП}^-$ т. е. он соответствует времени передачи кадра СП.

Тогда изменение кредита в течение временного интервала Δt удовлетворяет выражению:

$$C_{СП}(t) - C_{СП}(\tau) = C_{СП}(\Delta t) = \Delta t^+ \cdot V_{СП}^{up} + \Delta t^- \cdot V_{СП}^{down} = \left(\Delta t - (\Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0) \right) \cdot V_{СП}^{up} - \Delta t_{СП}^- (V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}). \tag{15}$$

Таким образом, в режиме без прерывания получаем соотношение времени обслуживания для трафика СП, ВП и ЗИ в любом интервале Δt :

$$\Delta t_{СП}^- = \frac{\left(\Delta t - (\Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0) \right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}(t)}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}. \tag{16}$$

Однако в наихудшем случае объем данных кадров трафика ВП в выходном порту TSN Ethernet на интервале Δt можно определить как:

$$A_{ВП}^*(t) - A_{ВП}^*(\tau) = A_{ВП}^*(t) - A_{ВП}(\tau) = R \cdot \Delta t_{ВП}^0. \tag{17}$$

Аналогичное выражение справедливо для объема условных данных неиспользуемой полосы пропускания выходного порта из-за ЗИ:

$$A_{ЗИ}^*(t) - A_{ЗИ}^*(\tau) = A_{ЗИ}^*(t) - A_{ЗИ}(\tau) = R \cdot \Delta t_{ЗИ}^0.$$

Так как $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0 + \Delta t_{ЗИ}^0$, то справедливо неравенство:

$$\Delta t^0 \leq \frac{\left((A_{ВП}(t) + A_{ЗИ}(t)) - (A_{ВП}(\tau) + A_{ЗИ}(\tau)) \right)}{R} \leq \frac{V_{ВП+ЗИ}(\Delta t)}{R}. \tag{18}$$

Тогда, учитывая (16 и 18), объем данных кадров СП в выходном порту TSN Ethernet на интервале Δt ограничен неравенством:

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) = R \cdot \Delta t_{СП}^- \geq R \cdot \frac{\left(\Delta t - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\Delta t)}{R}\right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \quad (19)$$

Поскольку кумулятивная функция выходного потока $A_{СП}^*(t)$ является возрастающей функцией в широком смысле, справедливы неравенства:

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) \geq 0, \quad (20)$$

$$A_{СП}^*(t) - A_{СП}^*(\tau) \geq \sup_{0 \leq \tau \leq \Delta t} \left\{ R \cdot \frac{\left(\tau - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\tau)}{R}\right) \cdot V_{СП}^{up} - C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \right\}. \quad (21)$$

Отсюда кривая обслуживания трафика СП имеет следующий вид:

$$\beta_{СП}^{HP}(t - \tau) = \left[\sup_{0 \leq \tau \leq \Delta t} \left\{ \frac{R \cdot V_{СП}^{up}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} \cdot \left(\tau - \frac{V_{ВП+ЗИ}(\tau)}{R} - \frac{C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up}} \right) \right\} \right]^+ \quad (22)$$

Зная эту кривую, можно получить объем трафика СП в выходном порту TSN Ethernet в любой момент времени $0 \leq \tau \leq t$:

$$A_{СП}(t) \geq \inf_{0 \leq \tau \leq t} \{ A_{СП}(\tau) + \beta_{СП}^{HP}(t - \tau) \} = (A_{СП} \otimes \beta_{СП}^{HP})(t). \quad (23)$$

Теперь определим кривые обслуживания трафика СП1 и СП2 в режиме с прерыванием кадров более низких приоритетов. В этом режиме интервал $\Delta t^0 = \Delta t_{ВП}^0$ представляет собой длину временного окна передачи трафика ВП в течение интервала наблюдения $\Delta t = t - \tau$, и интервал Δt^- можно разделить на время передачи кадра СП и время передачи служебной информации, связанной с прерыванием, т. е. $\Delta t^- = \Delta t_{СП}^- + \Delta t_{СЛ}^-$.

Тогда изменение кредита трафика СП в интервале Δt в режиме с прерыванием определяется выражением:

$$C_{СП}(t) - C_{СП}(\tau) = C_{СП}(\Delta t) = \Delta t^+ \cdot V_{СП}^{up} + \Delta t^- \cdot V_{СП}^{down} = (\Delta t - \Delta t_{ВП}^0) \cdot V_{СП}^{up} - (\Delta t_{СЛ}^- + \Delta t_{СП}^-) (V_{СП}^+ - V_{СП}^{down}). \quad (24)$$

Таким образом, в режиме с прерыванием получаем соотношение между длительностью передачи трафика СП, интервалом времени простоя порта из-за ЗИ и длительности окон передачи трафика ВП в любом интервале Δt :

$$\Delta t_{СП}^- = \frac{(\Delta t - \Delta t_{ВП}^0) \cdot V_{СП}^{up} - \Delta t_{СЛ}^- \cdot (V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}) - C_{СП}(t)}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}. \quad (25)$$

Поскольку в худшем случае объем трафика ВП в выходном порту в течение Δt определяется выражением (17), то аналогично можно записать выра-

жение для объема служебных данных, передаваемых в течение Δt из-за наличия прерываний кадров:

$$A_{СЛ}(t) - A_{СЛ}(\tau) = A_{СЛ}^*(t) - A_{СЛ}(\tau) = R \cdot \Delta t_{СЛ}^0. \quad (26)$$

Таким образом, длительность интервала $\Delta t_{ВП}^0$ имеет следующие ограничения:

$$\Delta t_{СЛ}^0 \leq \frac{V_{СЛ}(t)}{R}. \quad (27)$$

Тогда, с учетом (15, 16 и 17) можно определить суммарный объем данных трафика СП в выходном порту на интервале времени Δt :

$$A_{СП}(t) - A_{СП}(\tau) = R \cdot \Delta t_{СП}^- \geq \frac{R \cdot V_{СП}^{up}}{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}} = \left(\Delta t - \frac{V_{ВП}(\Delta t)}{R} - \frac{V_{ЗИ}(\Delta t)}{R} \cdot \frac{V_{СП}^{up} - V_{СП}^{down}}{V_{СП}^{up}} - \frac{C_{СП}^{max}}{V_{СП}^{up}} \right). \quad (28)$$

Правая часть неравенства (28) и является кривой обслуживания трафика СП в сегменте Fronthaul в режиме с прерыванием кадров.

Границы задержки трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul

Согласно теории Network Calculus, верхняя граница задержки i -го потока трафика СП $W_{СПi}$ в выходном порту TSN Ethernet определяется максимальным горизонтальным отклонением между кривой поступления $\alpha_{СП}(t)$ всех конкурирующих потоков СП и кривой их обслуживания $\beta_{СП}(t)$:

$$W_{СПi} = h(\alpha_{СП}(t), \beta_{СП}(t)), \quad (29)$$

где кривая обслуживания определяется выражениями (22) или (28) в зависимости от режима обслуживания трафика различных приоритетов – с прерыванием или без прерывания.

При использовании модели входящего потока типа (σ, ρ) кривая поступления трафика СП может быть записана в виде:

$$\alpha_{СП}(t) = \sum_{СПi \in I} \sigma_{СПi} + \sum_{СПi \in I} \rho_{СПi} \cdot t, \quad (30)$$

где $\sigma_{СПi}$ – пачечность i -го потока трафика СП; $\rho_{СПi}$ – долговременная устойчивая скорость i -го потока трафика СП.

В выходном порту TSN Ethernet конечной точки-источника трафика $\sigma_{СПi}^0 = L_{СПi}$ и $\rho_{СПi}^0 = L_{СПi}/T_{СПi}$, где $T_{СПi}$ – гиперцикл передачи i -го потока трафика СП i во временном расписании GCL

Кроме того, кривая потока для выходного порта TSN Ethernet конечной точки-источника i -го потока трафика может быть принята как кривая входного потока для n -го выходного порта следующего коммутатора на маршруте передачи трафика СП в сегменте Fronthaul и может быть записана как:

$$\alpha_{СПi}^n(t) = \alpha_{СПi}^0(t + W_{СПi}^0) = \sigma_{СПi}^0 + \rho_{СПi}^0(t + W_{СПi}^0). \quad (31)$$

Используя подход профиля IEEE 802.1CM границы наихудшей сквозной задержки (E2E) на маршруте передачи i -го потока трафика СП, можно получить путем суммирования максимальных задержек $W_{СПi}^{\max}$ в $(N - 1)$ выходных портах узлов сети TSN Ethernet на маршруте передачи трафика от исходящей конечной точки (в случае Fronthaul – это радиоустройство eRE) до конечной точки назначения (в случае Fronthaul – это контроллер eREC):

$$W_{СПi}^{E2E} = \sum_{n \in СПi} W_{СПi}^{\max} + (N - 1) \cdot T_{SW}, \quad (32)$$

где T_{SW} – постоянная технологическая задержка в коммутаторе TSN Ethernet, которая у современных коммутаторов может достигать нескольких микросекунд; N – число сетевых переходов в сегменте Fronthaul на базе TSN Ethernet.

При определении граничной задержки $W_{СПi}^{\max}$ для кадра потока СП i в узле TSN Ethernet будем учитывать максимальную задержку из-за ожидания в очереди кадров потоков СП того же приоритета $W_{СПi}^{FIFO}$, максимальную задержку из-за блокировки передачи кадрами с более высоким приоритетом $W_{ВП}^{\max}$, а также максимальную задержку из-за блокировки кадрами с более низким приоритетом $W_{НП}^{\max}$, которые учитывают задержки в худшем случае из-за недостаточного кредита потока СП i (см. рисунок 11):

$$W_{СПi}^{\max} = W_{СПi}^{FIFO} + W_{НП}^{\max} \cdot \left(1 + \frac{V_{СП}^{\text{up}}}{V_{СП}^{\text{down}}}\right) + W_{ВП}^{\max}. \quad (33)$$

Первое слагаемое в (33) можно определить по формуле:

$$W_{СПi}^{FIFO} = W_{СПi} + \sum_{СПj \in СПi, j \neq i} W_{СПj} \cdot \left(1 + \frac{V_{СПi}^{\text{down}}}{V_{СПi}^{\text{up}}}\right). \quad (34)$$

В уравнении (34) суммирование задержек $W_{СПj}$ выполняется для всех j -х потоков СП того же приоритета, что и рассматриваемый i -й поток, при этом $V_{СПi}^{\text{up}} + V_{СПi}^{\text{down}} = R$. Таким образом, максимальная загрузка канала TSN Ethernet потоком СП i -го приоритета составляет $V_{СПi}^{\text{up}}/R$. Она достигается, когда в очереди на передачу находится только кадры потока i -го приоритета.

Чтобы гарантировать, что кадры СП i будут иметь конечное время передачи в худшем случае в узле TSN Ethernet, необходимым условием является то, чтобы величина трафика СП i от всех K радиоустройств eRE была меньше его минимального коэффициента резервирования полосы пропускания $B_{СПi}$:

$$\sum_{j=1}^K \frac{W_{СПi}^j}{T_{СПi}} \leq B_{СПi}. \quad (35)$$

Численное моделирование

На основе полученных результатов были рассчитаны верхние границы задержек передачи трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul при различных параметрах кредитного формирователя CBS и скорости канала TSN Ethernet. При увеличении скорости канала передачи данных в сегменте Fronthaul от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с задержки существенно уменьшаются (на 30,6 % для СП1 и на 26,6 % для СП2), в то же время при дальнейшем увеличении скорости до 10 Гбит/с уменьшение задержки незначительное (рисунки 12а, 12б). Это обусловлено влиянием загрузки канала на время передачи кадров и длину очередей в сети TSN Ethernet.

Увеличение доли полосы пропускания в сегменте Fronthaul, выделяемой трафику СП1, приводит к перераспределению сетевого ресурса TSN Ethernet в его пользу, что выражается в снижении его задержки при одинаковых значениях скорости R (рисунки 12с, 12д).

Изменение максимального размера кадра TSN Ethernet оказывает влияние на величину задержки обслуживания обоих потоков (рисунок 13). Увеличение размера кадра в диапазоне от 500 до 2000 байт сопровождается практически линейным ростом задержки не более чем на 4,3 % для СП1 и 3,5 % для СП2. Рост обусловлен увеличением времени передачи одного кадра и, соответственно, времени ожидания обслуживания в очереди.

Представленные на рисунке 14 зависимости демонстрируют рост задержки при увеличении длительности цикла передачи трафика СП1 и СП2 в расписании GCL. При небольшом количестве радиоустройств $K \leq 3$ изменение длительности цикла в рассматриваемом диапазоне незначительно влияет на задержку, в то же время при $K = 10$ и $T_c = 1,5$ мс увеличение задержки составляет 5,4 % для СП1 и 10,1 % для СП2. Рост объясняется удлинением периода ожидания обслуживания кадров трафика соответствующего потока из-за увеличения загрузки канала.

Полученные зависимости задержки обслуживания потоков трафика среднего приоритета СП1 и СП2 от варьируемых параметров кредитного формирователя трафика CBS позволяют на практике определить условия обеспечения гарантированного качества обслуживания. Наибольшее влияние на величину задержки оказывает число подключенных радиоустройств. Увеличение нагрузки приводит к значительному росту времени ожидания обслуживания и при достижении определенных значений может вызвать превышение граничных уровней. Существенное влияние на задержку оказывают также параметры распределения полосы пропускания между потоками СП1 и СП2. Изменение данных параметров сопровождается перераспределением

ресурса между потоками и может приводить к значительному увеличению задержки трафика сред-

него приоритета при большом числе подключенных к сегменту Fronthaul радиоустройств.

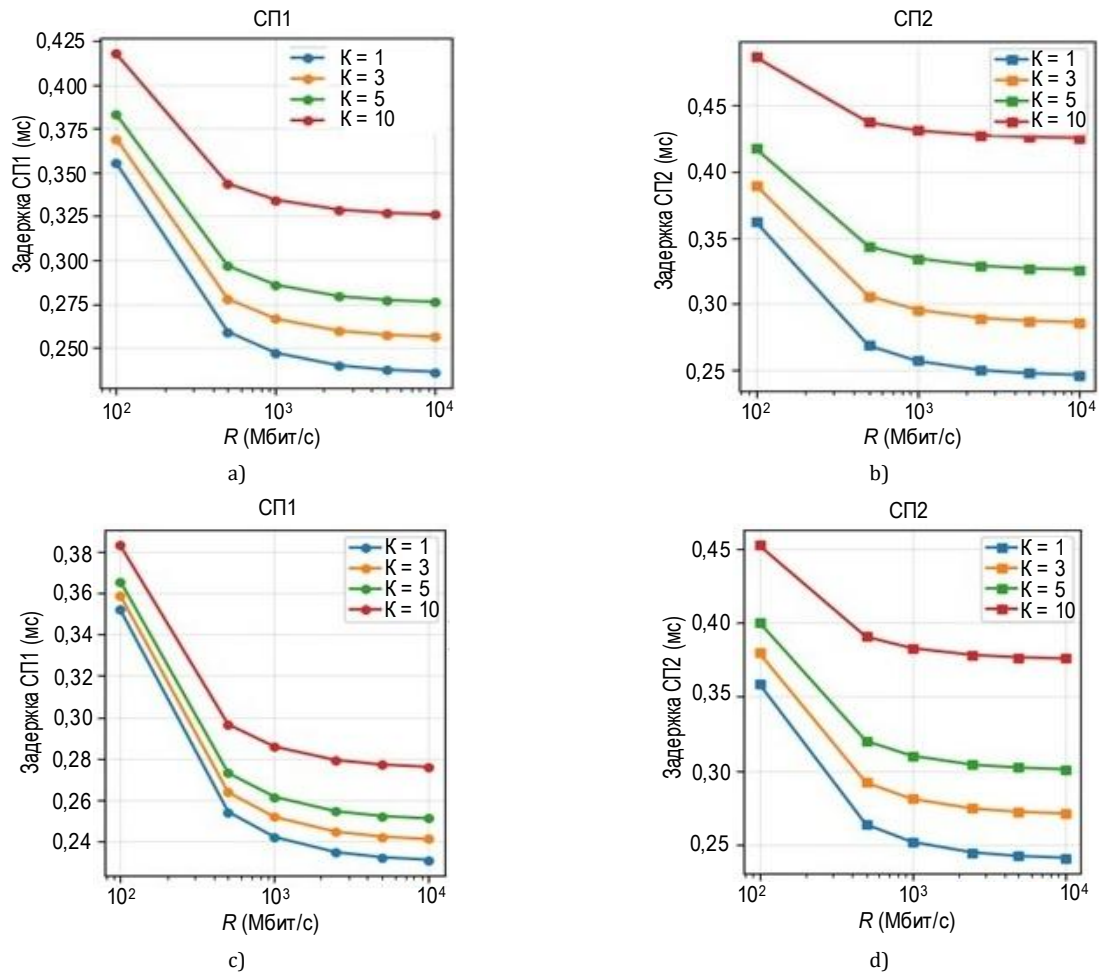


Рис. 12. Зависимость задержки трафика от скорости канала: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$; в) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; г) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Fig. 12. Dependence of Delay on the Channel Speed: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$; в) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; г) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

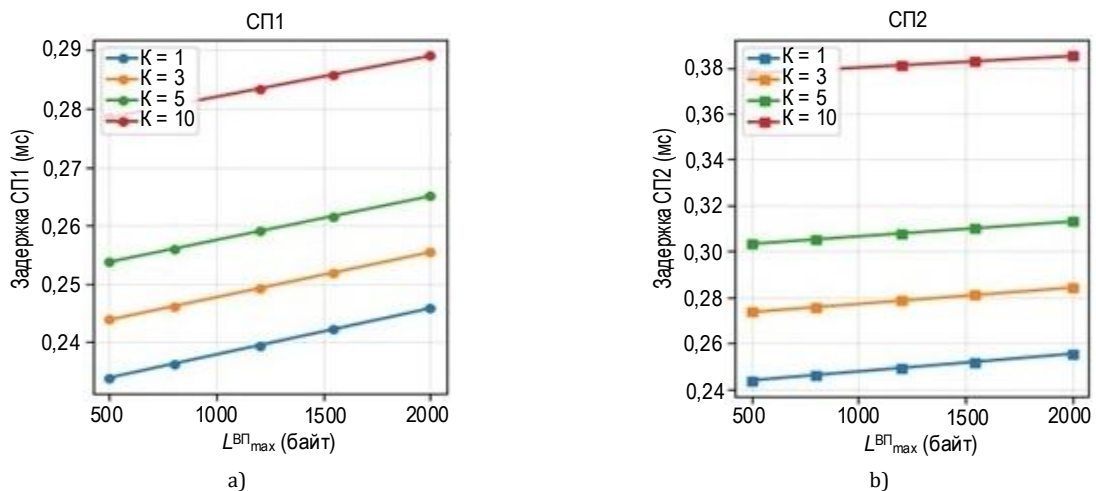


Рис. 13. Зависимость задержки от длины кадра TSN Ethernet: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Fig. 13. Ethernet TSN Frame Length Dependence on Latency: а) $\Delta B_{СП1} = 0,05$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

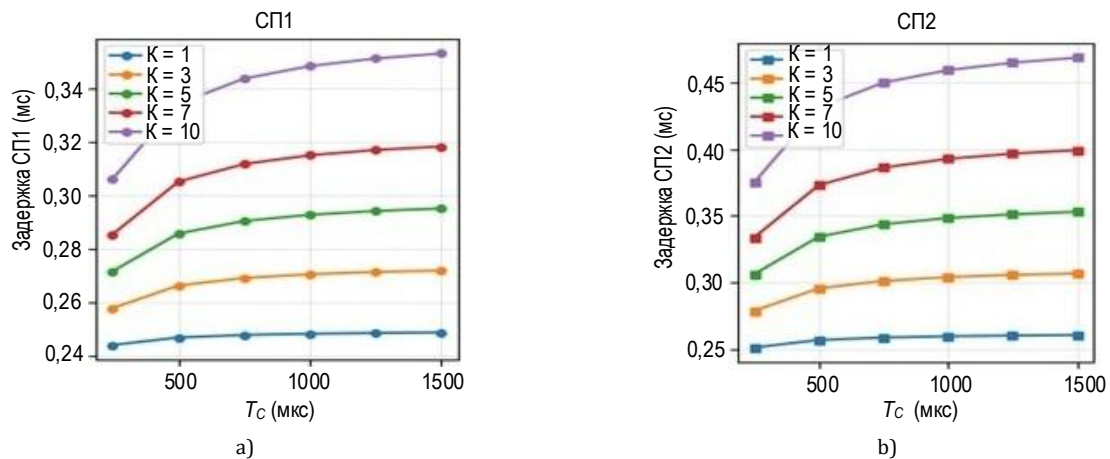


Рис. 15. Зависимость задержки от длительности цикла: а) $\Delta B_{СП1} = 0,1$; б) $\Delta B_{СП2} = 0,05$

Fig. 15. Dependence of Delay on Cycle Duration: a) $\Delta B_{SP1} = 0,1$; b) $\Delta B_{SP2} = 0,05$

Следует учитывать, что все указанные выше величины задержек потоков трафика СП1 и СП2 в сегменте Fronthaul не включали задержку сигнала в среде передачи. Эта величина пропорциональна физической длине линии / канала связи. В сетях 4G / 5G сегмент Fronthaul обычно имеет длину не более 10 км, поэтому при удельной задержке в 5 мкс на 1 км оптоволокна дополнительная задержка в среде передачи не будет превышать 50 мкс, что не существенно влияет на суммарную задержку.

Заключение

Показано, что в сетях мобильной связи 5G в сегменте Fronthaul, кроме трафика радиointерфейса eCPRI, передается трафик различных сторонних приложений (критически важные приложения Индустрии 4.0, промышленный Интернет вещей, беспилотный транспорт, интеллектуальные транспортные сети и др.), использующих мобильные сети как транспорт с гарантированной и надежной доставкой данных. Этот трафик чаще всего является аperiodическим и передача его в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet в строго отведенные временные интервалы с использованием временного формирователя TAS может привести к неэффективному использованию полосы пропускания.

При передаче трафика eCPRI среднего приоритета (медленные пользовательские данные и быстрые данные S&M) и трафика сторонних приложений, допускающего определенный джиттер, для

эффективной загрузки сегмента Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet предложено использовать формирователь на основе кредита CBS, соответствующий стандарту IEEE 802.1av, который позволяет разделить весь трафик среднего приоритета на два типа и сделать более гибкое распределение полосы пропускания между ними.

Разработана математическая модель передачи разнородного трафика в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet с использованием кредитного формирователя CBS с помощью теории Network Calculus, включающая аналитические выражения для кривых поступления трафика среднего приоритета двух типов и кривых его обслуживания в узле TSN Ethernet.

С использованием предложенной модели разработан метод оценки максимальных сквозных задержек трафика среднего приоритета в сегменте Fronthaul на базе технологии TSN Ethernet, учитывающий требования профиля IEEE 802.1CM. Результаты проведенного аналитического моделирования показали, что допустимая конфигурация кредитного формирователя CBS должна определяться с учетом совокупности ряда параметров. Задержки трафика среднего приоритета в значительной мере обусловлены совокупным влиянием числа подключенных к сегменту Fronthaul радиоприборов, распределением полосы пропускания между потоками СП1 и СП2 и скоростью канала TSN Ethernet, тогда как длительность цикла реализации временного расписания и максимальный размер кадра незначительно влияют на задержки.

Список источников

1. Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 24 ноября 2023 года №3339-р. 93 с.
2. Коган С. Стандартизация решений и сегментирование транспортного уровня сети 5G // Первая миля. 2021. № 2(94). С. 40–47. DOI:10.22184/2070-8963.2021.94.2.40.47. EDN:KUCZTI
3. Богданова Е., Шишков К. Сегменты транспортной сети 5G // Connect. 2020. № 5–6. С. 84–87. URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> (дата обращения 01.06.2026)

4. Коган С. Транспортная оптическая инфраструктура для 5G // Connect. 2020. № 5–6. С. 74–80. URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> (дата обращения 01.06.2026)
5. Тихвинский В. Архитектура построения и характеристики сетей радиодоступа NG-RAN 5G // Первая миля. 2018. № 5(74). С. 42–51. DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.42.51. EDN:VADUZA
6. Богданова Е. Транспортная сеть 5G/IMT-2020 // Первая миля. 2019. № 7(84). С. 40–47. DOI:10.22184/2070-8963.2019.84.7.40.47. EDN:DMPJVB
7. IEEE Std 802.1Q™-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. New York: IEEE, 2018. 1993 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8403927
8. Росляков А.В., Герасимов В.В., Сударева М.Е., Мамошина Ю.С. TSN – сети Ethernet, чувствительные ко времени // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 187–201. DOI:10.18469/ikt.2021.19.2.07. EDN:WSHBML
9. Лихтциндер Б.Я. Синхронизированные по времени сети Ethernet. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 199 с. EDN:QDEKMV
10. Лихтциндер Б.Я. Особенности TSN // Вестник связи. 2021. № 7. С. 32–37. EDN:LHOQTW
11. Лихтциндер Б.Я. Сети Ethernet с детерминированными задержками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 3(75). С. 81–97. DOI:10.14498/tech.2022.3.6. EDN:EUMFSA
12. Росляков А.В., Герасимов В.В., Мамошина Ю.С., Сударева М.Е. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53. DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
13. Берёзкин А.А., Паршин А.А., Парфенов Д.Д., Киричек Р.В. Анализ стандартов сетей, синхронизируемых по времени, для управления роботизированными системами в режиме реального времени // Электросвязь. 2023. № 6. С. 20–31. DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
14. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 1. С. 18–22. URL: <https://read.cta.ru/cta2020-1/18/index.html> (дата обращения 01.06.2026)
15. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 2. С. 22–27. URL: <https://read.cta.ru/cta2020-2/22/index.html> (дата обращения 01.06.2026)
16. IEEE Std 802.1CM™-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Time-Sensitive Networking for Fronthaul. New York: IEEE, 2018. 62 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8376066
17. Росляков А.В., Герасимов В.В. Применение теории сетевого исчисления для анализа задержек трафика радиоинтерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2025. Т. 167. № 2. С. 351–366. DOI:10.26907/2541-7746.2025.2.351-366. EDN:KJBNYL
18. Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологий TSN // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 73–84. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTL0
19. Росляков А.В. Анализ механизмов качества обслуживания трафика в сетях, чувствительных ко времени // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17. № 1. С. 27–35. DOI:10.36724/2409541920251712735. EDN:XKQTQX
20. IEEE Std 802.1Qav™-2009. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Virtual Bridged Local Area Networks. Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams. New York: IEEE, 2009. 72 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2010.8684664
21. IEEE Std 802.1Qbv™-2015. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – MAC Bridges and Virtual Bridged LANs. Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic. IEEE, 2015. 57 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.8613095
22. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
23. Караулова О.А., Киреева Н.В., Чупахина Л.Р. Анализ времени ожидания в G/G/1 очереди // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 4. С. 393–399. DOI:10.18469/ikt.2018.16.4.05. EDN:EEIPRG
24. Cruz R.L. A Calculus for network delay. Part I. Network elements in isolation // IEEE Transactions on Information Theory. 1991. Vol. 37. Iss. 1. PP. 114–131. DOI:10.1109/18.61109
25. Cruz R.L. A Calculus for Network Delay. Part II. Network Analysis // IEEE Transactions on Information Theory. 1991. Vol. 37. Iss. 1. PP. 132–141. DOI:10.1109/18.61110
26. Le Boudec J.-Y., Thiran P. Network Calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2050. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. 263 p. DOI:10.1007/3-540-45318-0
27. Кудрявцева Е.Н., Росляков А.В. Базовые принципы и перспективы использования теории сетевого исчисления (Network Calculus) // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11. № 3. С. 34–39. EDN:RWUXTD
28. Росляков А.В., Лысиков А.А., Витевский В.Д. Сетевое исчисление (Network Calculus). Часть 1. Теоретические основы // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 19–33. DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02. EDN:XTHBID
29. Росляков А.В., Лысиков А.А. Сетевое исчисление (Network Calculus) и его применение для оценки сетевых характеристик. Самара: ПГУТИ, 2019. 222 с. EDN:ZYXPZA
30. Кривулин Н.К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2009. 256 с.
31. IEEE Std 802.1Qbu™-2016. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Frame Preemption. IEEE, 2016. 52 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7553415
32. IEEE Std 802.3br™-2016. IEEE Standard for Ethernet – Interspersing Express Traffic. IEEE, 2016. 58 p. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7900321
33. Li J., Li Q., Xiong H. Joint optimization of reconfiguration and traffic planning in time-triggered networks // Electronics Letters. 2024. Vol. 60. Iss. 1. P. e13071. DOI:10.1049/el2.13071. EDN:XLHMAD

34. Pop P., Alexandris K., Wang T. Configuration of multi-shaper Time Sensitive Networking for industrial applications // IET Networks. 2024. Vol. 13. Iss. 5-6. PP. 434–454. DOI:10.1049/ntw2.12129. EDN:KNRFCU
35. Zhao L., Pop P., Zheng Z., Li Q. Timing Analysis of AVB Traffic in TSN Networks Using Network Calculus // IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (Porto, Portugal, 11–13 April 2018). IEEE; 2018. PP. 25–36. DOI:10.1109/RTAS.2018.00009

References

1. *Strategy for the Development of the Communications Sector of the Russian Federation for the Period up to 2035*. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated November 24, 2023 No. 3339-р. 93 p. (in Russ.)
2. Kogan S. Standardization of solutions and segmentation of the transport level of the 5G network. *Last Mile*. 2021;2(94): 40–47. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2021.94.2.40.47. EDN:KUCZTI
3. Bogdanova E., Shishkov K. Transport network segments of 5G. *Connect*. 2020;5–6:84–87. (in Russ.) URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> [Accessed 01.06.2026]
4. Kogan S. Transport optical infrastructure for 5G. *Connect*. 2020;5–6:74–80. (in Russ.) URL: <https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html> [Accessed 01.06.2026]
5. Tikhvinsky V. Architecture and characteristics of NG-RAN 5G. *Last Mile*. 2018;5(74):42–51. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2018.74.5.42.51. EDN:VADUZA
6. Bogdanova E. 5G/IMT-2020 transport network. *Last Mile*. 2019;7(84):40–47. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2019.84.7.40.47. EDN:DMPJBQ
7. IEEE Std 802.1Q™-2018. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks*. New York: IEEE; 2018. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8403927
8. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Sudareva M.E., Mamoshina Yu.S. TSN Ethernet – Time-Sensitive Networking. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2021;19(2):187–201. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2021.19.2.07. EDN:WSHBML
9. Likhhtsinder B.Ya. *Time-Synchronized Ethernet Networks*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2024. 199 p. (in Russ.) EDN:QDEKMW
10. Likhhtsinder B.Ya. Features TSN. *Vestnik Svyazi*. 2021;(7):32–41. (in Russ.) EDN:LHOQTW
11. Likhhtsinder B.Ya. Ethernet networks with deterministic delays. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2022;30(3):81–97. (in Russ.) DOI:10.14498/tech.2022.3.6. EDN:EUMFSA
12. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V., Mamoshina Yu.S., Sudareva M.E. Time sensitive networking standardization. *Standarts and Quality*. 2021;4:48–53. (in Russ.) DOI:10.35400/0038-9692-2021-4-48-53. EDN:UYWULY
13. Berezkin A.A., Parshin A.A., Parfenov D.D., Kirichek R.V. Analysis of time-synchronized network standards for real-time control of robotic systems. *Elektrosvyaz*. 2023;(6):20–31. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2023.43.6.003. EDN:LWDQXI
14. Vorobyov S. TSN – Time-Synchronized Networks. Parts 1. *Sovremennyye tehnologii avtomatizatsii*. 2020;1:18–22. (in Russ.). URL: <https://read.cta.ru/cta2020-1/18/index.html> [Accessed 01.06.2026]
15. Vorobyov S. TSN – Time-Synchronized Networks. Parts 2. *Sovremennyye tehnologii avtomatizatsii*. 2020;2:22–27. (in Russ.). URL: <https://read.cta.ru/cta2020-2/22/index.html> [Accessed 01.06.2026]
16. IEEE Std 802.1CM™-2018. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Time-Sensitive Networking for Fronthaul*. New York: IEEE; 2018. DOI:10.1109/IEEESTD.2018.8376066
17. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Application of network calculus to analyze ecpri traffic delays in 4G/5G Fronthaul mobile networks. *Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series* 2025;167(2):351–366. (in Russ.) DOI:10.26907/2541-7746.2025.2.351-366. EDN:KJBNYL
18. Roslyakov A., Gerasimov V. Analysis of End-to-End Delay in the Transport Segment of Fronthaul 4G/5G Networks Based on TSN Technology. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(1):73–84. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84. EDN:SJWTLO
19. Roslyakov A.V. Analysis of traffic quality of service mechanisms in time-sensitive networks. *H&ES Research*. 2025;17(1):27–35. (in Russ.) DOI:10.36724/2409541920251712735. EDN:XXQTQX
20. IEEE Std 802.1Qav™-2009. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Virtual Bridged Local Area Networks. Amendment 12: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams*. New York: IEEE; 2010. DOI:10.1109/IEEESTD.2010.8684664
21. IEEE Std 802.1Qbv™-2015. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.8613095
22. Kleinrock L. *Queueing Systems*. Wiley-Interscience; 1975. 448 p.
23. Karaulova O.A., Kireeva N.V., Chupakhina L.R. Waiting time analysis for G/G/1 Queue. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2018;16(4):393–399. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.4.05. EDN:EEIPRG
24. Cruz R.L. A calculus for network delay. Part I. Network elements in isolation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1991;37(1):114–131. DOI:10.1109/18.61109
25. Cruz R.L. A calculus for network delay. Part II. Network analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1991;37(1): 132–141. DOI:10.1109/18.61110
26. Le Boudec J.-Y., Thiran P. *Network Calculus. A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Lecture Notes in Computer Science, vol.2050*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2001. 263 p. DOI:10.1007/3-540-45318-0
27. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. Basic principles and prospects for using network calculus. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2013;11(3):34–39. (in Russ.) EDN:RWUXTD
28. Roslyakov A.V., Lysikov A.A., Vitevskiy V.D. Network calculus. Part 1. Theoretical foundations. *Infocommunicacionnye tehnologii*. 2018;16(1):19–33. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02. EDN:XTHBID

29. Roslyakov A.V., Lysikov A.A. *Network Calculus and Its Application for Evaluating Network Characteristics*. Samara: PSUTI Publ.; 2019. 222 p. (in Russ.) EDN:ZYXPZA
30. Krivulin N.K. *Methods of Idempotent Algebra in Problems of Modeling and Analysis of Complex Systems*. Saint Petersburg: St Petersburg University, Saint Petersburg State University Publ.; 2009. 256 p. (in Russ.)
31. IEEE Std 802.1Qbu™-2016. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. Amendment 26: Frame Preemption*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7553415
32. IEEE Std 802.3br™-2016. *IEEE Standard for Ethernet. Amendment 5: Specification and Management Parameters for Interspersing Express Traffic*. New York: IEEE; 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7900321
33. Li J., Li Q., Xiong H. Joint optimization of reconfiguration and traffic planning in time-triggered networks. *Electronics Letters*. 2024;60(1):e13071. DOI:10.1049/ell2.13071. EDN:XLHMAD
34. Pop P., Alexandris K., Wang T. Configuration of multi-shaper Time-Sensitive Networking for industrial applications. *IET Networks*. 2024;13(5-6):434–454. DOI:10.1049/ntw2.12129. EDN:KNRFCU
35. Zhao L., Pop P., Zheng Z., Li Q. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. *Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS, 11–13 April 2018, Porto, Portugal*. IEEE; 2018. p.25–36. DOI:10.1109/RTAS.2018.00009

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 19.05.2026

The article was submitted 24.03.2026; approved after reviewing 20.04.2026; accepted for publication 19.05.2026

Информация об авторах:


РОСЛЯКОВ
Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0000-0003-3130-8262>

ГЕРАСИМОВ
Вячеслав Васильевич

старший преподаватель кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики

 <https://orcid.org/0009-0004-7791-7981>

Росляков А.В. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Roslyakov A.V. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.