

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.391

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.351-366>**Применение теории сетевого исчисления для анализа задержек трафика радиointерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G****А.В. Росляков , В.В. Герасимов***Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия* *a.roslyakov@psuti.ru***Аннотация**

Математический аппарат теории сетевого исчисления (Network calculus) позволяет определить граничные оценки задержек в сетевых моделях и в отличие от теории массового обслуживания оперирует не функциями распределения случайных величин, а достаточно простыми детерминированными параметрами, описывающими характеристики входного потока и обслуживающего устройства. Предложено использовать подходы теории сетевого исчисления для получения численных оценок верхних границ задержки различных видов трафика интерфейса eCPRI в транспортном сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G.

Ключевые слова: сетевое исчисление Network calculus, кривая поступления, кривая обслуживания, мобильные сети 4G/5G, сегмент Fronthaul, радио интерфейс eCPRI, анализ задержек

Для цитирования: Росляков А.В., Герасимов В.В. Применение теории сетевого исчисления для анализа задержек трафика радиointерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 2. С. 351–366. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.351-366>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.351-366>

Application of network calculus to analyze eCPRI traffic delays in 4G/5G fronthaul mobile networks

A.V. Roslyakov , V.V. Gerasimov*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia* a.roslyakov@psuti.ru

Abstract

Network calculus provides a mathematical framework for determining the delay bounds in network models and, unlike the queueing theory which relies on the distribution functions of random variables, uses simple deterministic parameters describing the characteristics of traffic arrivals and the service device. In this study, network calculus was applied to calculate the upper delay bounds for various types of eCPRI traffic in the fronthaul segment of 4G/5G mobile networks.

Keywords: network calculus, arrival curve, service curve, 4G/5G mobile networks, fronthaul segment, eCPRI, delay analysis

For citation: Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Application of network calculus to analyze eCPRI traffic delays in 4G/5G fronthaul mobile networks. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 2, pp. 351–366.
<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.351-366>. (In Russian)

Введение

В сетях мобильной связи поколений 4G/5G наиболее перспективной технологией радиодоступа является централизованная сеть радиодоступа C-RAN (Centralized Radio Access Network). Она реализуется с помощью удаленных радиоблоков RRH (Remote Radio Head) и набора (пула) централизованных блоков обработки основной полосы частот BBU (BaseBand Unit), которые соединены через передний транспортный сегмент, называемый Fronthaul. Такое разделение позволяет значительно улучшить гибкость и масштабируемость сети мобильной связи 4G/5G, а также существенно сократить затраты на капитальные и эксплуатационные расходы. Однако такой подход к построению сети радиодоступа приводит к проблеме обеспечения гарантий качества передачи разнородного трафика путем распределения доступной полосы пропускания сегмента Fronthaul. Такое распределение можно обеспечить с помощью введения разных приоритетов обслуживания для соответствующего трафика радиointерфейса eCPRI. При этом необходимо учитывать, что в сетях 4G/5G ограничения на задержку в сегменте Fronthaul очень строгие и для большей части трафика не должны превышать 100 мкс [1].

Для получения верхних граничных оценок задержек заявок в системе массового обслуживания (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 весьма затруднительно, при этом анализ характеристик СМО общего вида $G/G/1$ возможен только аппроксимационными методами с получением лишь средних значений времени ожидания заявок [2].

Для определения граничных оценок задержек в любых СМО с ожиданием в наибольшей степени подходит теория сетевого исчисления (Network Calculus), которая оперирует детерминированными параметрами входного потока заявок и исследуемой СМО и позволяет достаточно просто получить граничные оценки качества функционирования сетевой модели [3]. Для практического применения сетевого исчисления необходимо знать функции, описывающие входной поток трафика и обслуживающее устройство, называемые кривыми поступления и обслуживания соответственно. В работе эти кривые построены для модели транспортного сегмента Fronthaul мобильных сетей 4G/5G и на их основе получены аналитические выражения для определения верхних граничных оценок задержек трафика интерфейса eCPRI трех приоритетов: высшего, среднего и низшего. При этом использованы только две детерминированные метрики трафика – средняя скорость поступления и максимальный выброс (пачечность) трафика, которые можно легко получить на практике из временных трассировок данных трафика. Полученные верхние границы могут напрямую использоваться при проектировании и обслуживании сетей 4G/5G для определения требуемой пропускной способности транспортного сегмента Fronthaul.

1. Сегмент Fronthaul сетей 4G/5G и его модель

Рассмотрим централизованную архитектуру сети радиодоступа C-RAN (Centralized Radio Access Network) в мобильных сетях 4G/5G и построим модель передачи трафика в ней. Для упрощения анализа будем рассматривать трафик только в одном направлении. C-RAN реализуется в виде территориально-распределенного набора так называемых радиоголовок RRH (Remote Radio Head), которые обеспечивают беспроводную связь с терминалами пользователей в зоне своего покрытия и реализуют первичную обработку радиосигналов. Информация, поступающая от всех RRH, агрегируется в переднем транспортном сегменте Fronthaul и передается в централизованный пул блоков обработки базовых частот BBU (BaseBand Unit), где выполняется основная обработка информации (рис. 1). В сегменте Fronthaul сетей 4G/5G может передаваться трафик радиointерфейсов CPRI и eCPRI, однако в дальнейшем будем рассматривать трафик только интерфейса eCPRI, т. к. он использует пакетную передачу информации, которая более перспективна за счет своей эффективности, гибкости и масштабируемости.

В радиointерфейсе eCPRI передаются информационные потоки трех видов:

- 1) пользовательский трафик между терминалом пользователя и мобильной сетью, управляющая информация, относящаяся к пользовательскому трафику, а также другие данные eCPRI: поддержка плоскости пользователя, удаленная перезагрузка и т. д., требующие передачи в реальном масштабе времени;
- 2) контрольная и управляющая информация, которая не является информацией реального времени;
- 3) данные синхронизации.

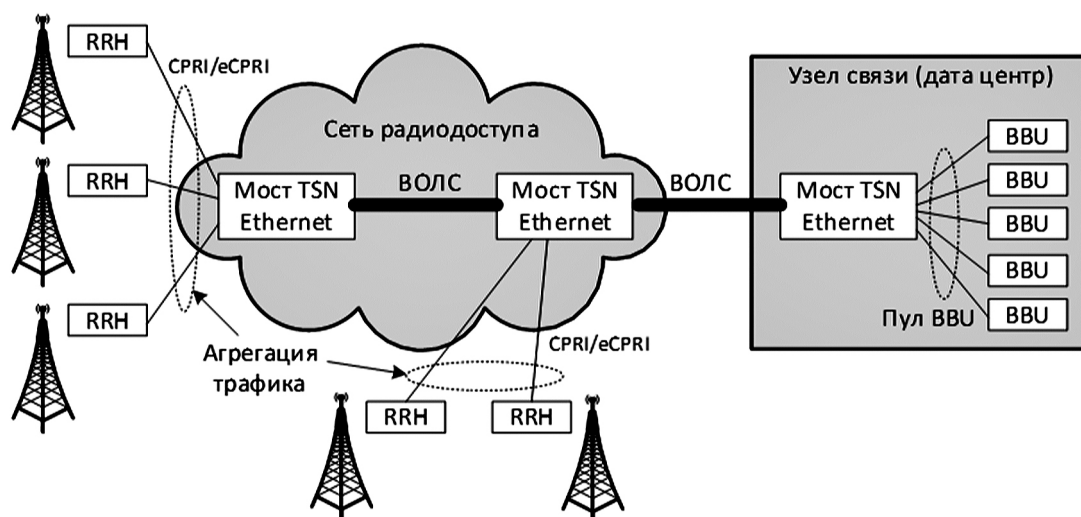


Рис. 1. Архитектура централизованной сети радиодоступа в мобильных сетях 4G/5G

Fig. 1. Centralized-RAN architecture for 4G/5G mobile networks

Требования к сквозной задержке трафика eCPRI первого и второго видов в сегменте Fronthaul строго нормируются (табл. 1) [4].

Табл. 1. Требования к сквозной задержке трафика eCPRI в сегменте Fronthaul

Table 1. End-to-end delay requirements for eCPRI traffic in the fronthaul segment

Данные eCPRI			
	Пользователя	Контроля и управления	Синхронизации
Сквозная задержка	100 мкс (высший приоритет) 1 мс (средний приоритет)	1 мс (средний приоритет) 100 мс (низший приоритет)	Не нормируется

Таким образом, особенностью интерфейса eCPRI является наличие в нем трафика трех приоритетов – высшего (ВП), среднего (СП) и низшего (НП), что необходимо учитывать при распределении полосы пропускания в сегменте Fronthaul между потоками с разными данными. С учетом этого модель сегмента Fronthaul в виде СМО можно представить как одноканальное обслуживающее устройство, на вход которого поступают агрегированные потоки трафика от радиоголовок RRH трех приоритетов – ВП, СП и НП (рис. 2).

Более высокий приоритет трафика означает, что соответствующему потоку требуется меньшая задержка для удовлетворения требований качества обслуживания. Передача пакетов (кадров) одного приоритета в сегменте Fronthaul осуществляется по правилу «первым пришел – первым вышел» (FIFO). Однако, когда поступает запрос на передачу трафика потока с более высоким приоритетом, передача текущего потока с более низким приоритетом прерывается. Будем считать, что передача агрегированного трафика интерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul осуществляется с постоянной скоростью R , бит/с. Для реализации интерфейса eCPRI, как правило, используют пакетные технологии семейства

xEthernet или чувствительных ко времени сетей TSN Ethernet [5], работающие чаще всего по оптоволоконному физическому каналу и имеющие скорости $n \times 10$ Гбит/с.

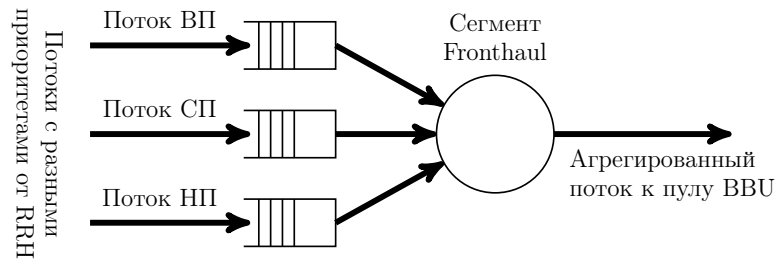


Рис. 2. Модель сегмента Fronthaul сетей 4G/5G с тремя типами потоков трафика

Fig. 2. Fronthaul segment model for 4G/5G mobile networks with three traffic types

Для получения аналитических выражений максимальных задержек потоков трафика разного приоритета в полученной СМО будем использовать математический аппарат теории сетевого исчисления (Network Calculus), для чего определим необходимые характеристики СМО.

2. Основы теории сетевого исчисления

Ввиду ограниченного освещения в отечественной литературе теории сетевого исчисления (Network Calculus) в данном разделе приведем краткие сведения из этой области знаний в виде нескольких определений и утверждений, которые необходимы для дальнейшего анализа сквозных задержек в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G на основе названной теории. Более подробную информацию про сетевое исчисление можно найти в [6–8].

Базовые принципы теории сетевого исчисления были сформулированы Р. Крузом в 1991 году в двух его работах [9, 10]. Математически сетевое исчисление основано на идемпотентной $(\min, +)$ -алгебре [11], в которой операция идемпотентного сложения (обозначим ее $\wedge$) заменяется вычислением инфимума $a \wedge b := \inf(a, b)$ (или минимума $a \wedge b := \min(a, b)$, если он существует), в то время как операция идемпотентного умножения превращается в классическую операцию сложения $a \times b := a + b$. Основными операциями в $(\min, +)$ -алгебре являются $(\min, +)$ -свертка и $(\min, +)$ -обратная свертка. Приведем ряд определений, необходимых для пояснения основных положений теории сетевого исчисления.

Определение 1 ((Min,+)-свертка). Пусть x и y – две функции, возрастающие в широком смысле. (Min,+)-свертка этих функций равна

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

где $\inf$ обозначает инфимум (нижнюю границу) функции.

Определение 2 ((Min,+)-обратная свертка). Пусть x и y – две функции, возрастающие в широком смысле. (Min,+)-обратная свертка этих функций равна

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

где $\sup$ означает супремум (верхнюю границу) соответствующей функции.

В сетевом исчислении используют понятия кривой поступления и кривой обслуживания для описания характеристик входного потока трафика и обслуживающего устройства соответственно.

Определение 3 (Кривая поступления). Для возрастающей в широком смысле функции $\alpha(t)$, $t \geq 0$, говорят, что поток $A(t)$ ограничен сверху функцией $\alpha(t)$ тогда и только тогда, когда для всех $\tau \leq t$

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

Говорят, что поток $A(t)$ имеет кривую поступления $\alpha(t)$ (рис. 3).

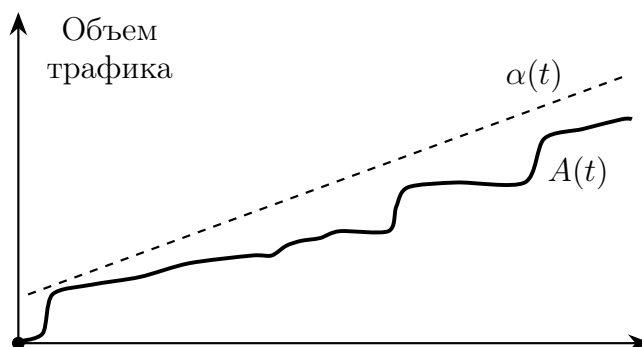


Рис. 3. Кривая поступления $\alpha(t)$ для функции входящего потока $A(t)$

Fig. 3. Arrival curve $\alpha(t)$ for the input traffic function $A(t)$

Определение 4 (Кривая обслуживания). Пусть $A(t)$ и $D(t)$ – возрастающие в широком смысле функция объема входного потока с кривой поступления $\alpha(t)$ и функция объема потока на выходе этого устройства соответственно (рис. 4). Говорят, что обслуживающее устройство реализует для входящего потока $A(t)$ кривую обслуживания $\beta(t)$, если $\beta(t)$ является возрастающей в широком смысле функцией и $D(t) \geq A(t) \otimes \beta(t)$.

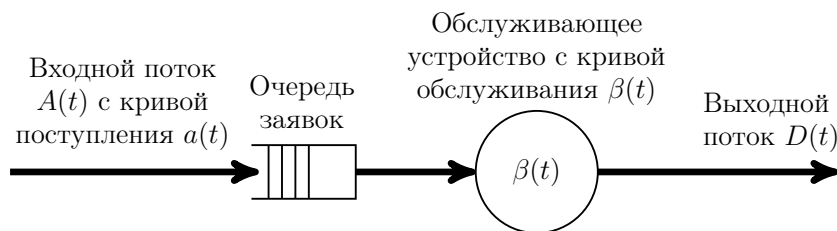


Рис. 4. К определению кривой обслуживания

Fig. 4. Illustration of the service curve

Одним из главных результатов теории сетевого исчисления является возможность определения верхних границ задержки потоков трафика. В [3, 6] доказано, что граница задержки $w(t)$ в системе массового обслуживания с кривой поступления $\alpha(t)$ и кривой обслуживания $\beta(t)$ определяется как

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

При графическом изображении кривых поступления и обслуживания (рис. 5) горизонтальное расстояние между этими кривыми определяет значение задержки потока $w(t)$ согласно (3), в то время как вертикальное расстояние $q(t)$ показывает загрузку СМО (число заявок в очереди и обслуживающем устройстве) в момент времени t . Следовательно, максимальные расстояния между кривыми дают верхние границы задержки и загрузки.

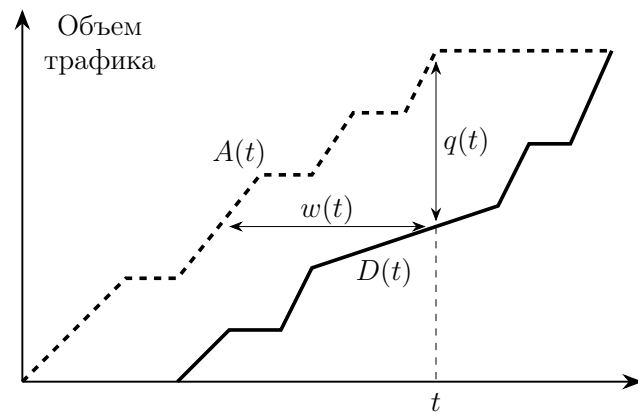


Рис. 5. Определение задержки передачи трафика и загрузки системы обслуживания

Fig. 5. Illustration of the traffic transmission delay and service system load

3. Кривые поступления трафика интерфейса eCPRI

Избегая использования вероятностных распределений для описания потоков трафика интерфейса eCPRI в транспортном сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G, будем использовать теорию сетевого исчисления и детерминированные метрики трафика, которые легко получить на практике. В качестве таких метрик чаще всего используют среднюю скорость поступления трафика ρ – количество пакетов (кадров), поступающих в потоке в среднем за единицу времени, и пачечность (берстность) трафика σ – количество пакетов (кадров), которые могут поступить одновременно в потоке. Следовательно, кривая поступления для потока трафика i -го типа интерфейса eCPRI определяется выражением $\alpha_i(t) = \rho_i t + \sigma_i$, где ρ_i – средние скорости потоков трафика i -го типов, $i \in (h, m, l)$, которые соответствуют высшему, среднему и низшему приоритетам соответственно, а σ_i – пачечность этих потоков.

Во избежание бесконечной длины очередей трафика интерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul ограничим скорость поступления трафика при заданной пропускной способности сегмента R согласно следующему предположению.

Предположение. Если скорость передачи (пропускная способность) сегмента Fronthaul равна R , то суммарная скорость передачи потоков трафика интерфейса eCPRI всех трех приоритетов $\rho_h + \rho_m + \rho_l \leq R$. В противном случае загрузка сегмента будет стремиться к бесконечности.

Действительно, если $\rho_h + \rho_m + \rho_l > R$, то вертикальный разрыв между кривыми поступления и обслуживания, т. е. полная загрузка сегмента Fronthaul потоками трех приоритетов трафика, увеличивается до бесконечности (рис. 6).

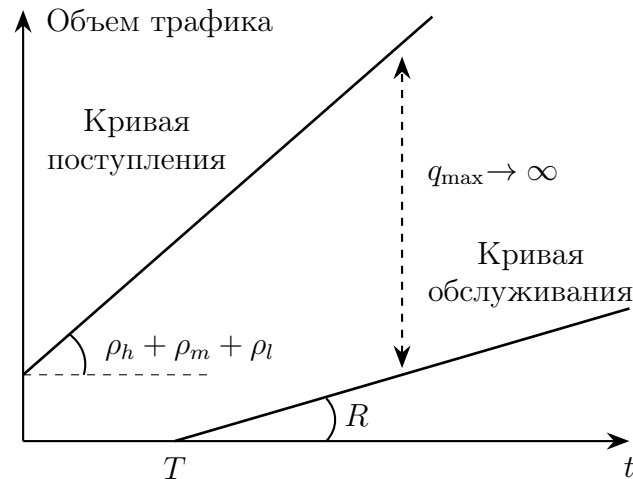


Рис. 6. Пример перегрузки сегмента Fronthaul

Fig. 6. Example of the fronthaul segment congestion

4. Кривые обслуживания трафика интерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul

Зная кривые поступления потоков трафика интерфейса eCPRI разных приоритетов и задав скорость обслуживания трафика в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G постоянной и равной R , с использованием базовых положений теории сетевого исчисления можно получить выражения для кривых обслуживания трафика каждого приоритета в виде следующих трех теорем.

Теорема 1. *Кривая обслуживания потока трафика интерфейса eCPRI низшего приоритета $A_l(t)$ определяется выражением*

$$\beta_l(t) = (R - \rho_h - \rho_m) \left(t - \frac{\sigma_h + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m} \right)^+,$$

где $\forall x \in \mathbf{R}$

$$(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Доказательство. Пусть до момента времени τ система была пуста, и в этом момент начинается очередной период загрузки системы. Поскольку поток A_l имеет низший приоритет, то его трафик будет обслуживаться только после обслуживания потоков более высоких приоритетов. Таким образом, для любого момента времени t , $t > \tau$, объем обслуженного трафика потока A_l за интервал времени $(\tau, t]$ может быть определен как

$$D_l(t) - D_l(\tau) = R(t - \tau) - (D_h(t) - D_h(\tau)) - (D_m(t) - D_m(\tau)). \quad (4)$$

Так как в момент времени τ обслуживается только поток A_l , то потоки с более высокими приоритетами A_m и A_h отсутствуют и для них справедливы следующие равенства

$$A_h(t) - D_h(\tau) = 0, \quad A_m(t) - D_m(\tau) = 0.$$

Поэтому в момент времени τ для потока высшего приоритета объем трафика на выходе будет равен объему поступившего трафика:

$$D_h(t) - D_h(\tau) = D_h(t) - A_h(\tau). \quad (5)$$

Однако для любого момента времени t , $t > \tau$, справедливо неравенство $D_h(t) \leq A_h(t)$. Поэтому (5) можно переписать в виде неравенства

$$D_h(t) - D_h(\tau) \leq A_h(t) - A_h(\tau). \quad (6)$$

С учетом определения кривой поступления (2) правую часть (6) можно записать в виде

$$D_h(t) - D_h(\tau) \leq \alpha_h(t - \tau). \quad (7)$$

Аналогичное неравенство можно записать и для потока среднего приоритета A_m :

$$D_m(t) - D_m(\tau) \leq \alpha_m(t - \tau). \quad (8)$$

Подставив (7) и (8) в (4), получим

$$D_l(t) - D_l(\tau) \geq (R(t - \tau) - \alpha_h(t - \tau) - \alpha_m(t - \tau))^+. \quad (9)$$

Определим правую часть этого неравенства как функцию $\beta_l(t - \tau)$, тогда (9) можем переписать как

$$D_l(t) - D_l(\tau) \geq \beta_l(t - \tau). \quad (10)$$

Для произвольного момента времени t неравенство (10) можно привести к виду

$$D_l(t) \geq D_l(\tau) + \beta_l(t - \tau), \quad D_l(t) \geq \inf_{0 \leq \tau \leq t} (D_l(\tau) + \beta_l(t - \tau)). \quad (11)$$

С учетом определения $(\min, +)$ -свертки (1) соотношение (11) можно записать в виде $D_l(t) = A_l(t) \otimes \beta_l(t)$.

Ранее было определено, что $R \geq \rho_h + \rho_m + \rho_l$, поэтому функция $\beta_l(t)$ возрастающая в широком смысле. Согласно выражению (3) можно утверждать, что функция $\beta_l(t)$ является кривой обслуживания потока A_l . Следовательно, имеем

$$\begin{aligned} \beta_l(t) &= [Rt - \alpha_h(t) - \alpha_m(t)]^+ = [Rt - (\rho_h \times t + \sigma_h) - (\rho_m \times t + \sigma_m)]^+, \\ \beta_l(t) &= (R - \rho_h - \rho_m) \left(t - \frac{\sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h - \rho_m} \right)^+. \end{aligned}$$

Теорема доказана. □

Теорема 2. Кривая обслуживания потока трафика интерфейса eCPRI среднего приоритета $A_m(t)$ определяется выражением

$$\beta_m(t) = (R - \rho_h) \left(t - \frac{\sigma_h}{R - \rho_h} \right)^+. \quad (12)$$

Доказательство. Аналогично доказательству теоремы 1 будем предполагать, что в момент времени τ система начинает обслуживать поток среднего приоритета A_m , т. е. в этот момент в системе нет трафика потока высшего приоритета A_h , а поток A_l не может обслуживаться из-за более низкого приоритета. Поэтому имеет место следующее уравнение:

$$D_m(t) - D_m(\tau) = R(t - \tau) - (D_h(t) - D_h(\tau)). \quad (13)$$

Поскольку трафик потока A_h отсутствует, неравенство (7) также выполняется. Подставив его в (13), получим

$$D_m(t) - D_m(\tau) \geq (R(t - \tau) - \alpha_h(t - \tau))^+. \quad (14)$$

Обозначив правую часть неравенства (14) через $\beta_m(t - \tau)$, получим

$$D_m(t) - D_m(\tau) \geq \beta_h(t - \tau).$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} D_m(t) &\geq D_m(\tau) + \beta_m(t - \tau), \\ D_m(t) &\geq \inf_{0 \leq \tau \leq t} (D_m(\tau) + \beta_m(t - \tau)), \\ D_m(t) &= A_m(t) \otimes \beta_m(t). \end{aligned}$$

Так как $\beta_m(t - \tau)$ является функцией, возрастающей в широком смысле, можно утверждать, что она является кривой обслуживания потока A_m . Используя правую часть уравнения (14) и подставив выражение для кривой поступления потока A_h , получим для $\beta_m(t)$ формулу (12). Теорема доказана. $\square$

Теорема 3. *Кривая обслуживания потока трафика интерфейса eCPRI высшего приоритета $A_h(t)$ определяется выражением $\beta_h(t) = R(t - 0)^+$.*

Доказательство. Поскольку поток A_h имеет высший приоритет, система прекратит обслуживание текущего потока более низкого приоритета, если поступит трафик потока A_h . Предположим, что обслуживание системой потока A_h начинается в момент времени τ . В течение интервала времени $(\tau, t]$ при входном потоке A_h выходной поток системы будет равен

$$D_h(t) - D_h(\tau) = R(t - \tau). \quad (15)$$

Обозначив правую часть (15) через $\beta_h(t)$, можно записать

$$\begin{aligned} D_h(t) &= D_h(\tau) + \beta_h(t - \tau), \\ D_h(t) &\geq \inf_{0 \leq \tau \leq t} (D_h(\tau) + \beta_h(t - \tau)), \\ D_h(t) &= A_h(t) \otimes \beta_h(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Для $\beta_h(t)$ справедлива формула $\beta_h(t) = R(t - 0)^+$. Эта функция является возрастающей в широком смысле, поэтому с учетом неравенства (16) можно утверждать, что она является кривой обслуживания потока A_h . Теорема доказана. $\square$

5. Верхние границы задержек трафика интерфейса eCPRI

На основе полученных выражений для кривых поступления и кривых обслуживания для каждого потока трафика интерфейса eCPRI соответствующего приоритета обслуживания можно получить верхние границы задержки потоков в сегменте Fronthaul на основе следующих теорем.

Теорема 4. *Верхняя граница задержки потока с низшим приоритетом A_l определяется выражением*

$$w_l = \frac{\sigma_h + \sigma_m + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m}.$$

Доказательство. Согласно (3) задержка потока A_l в наихудшем случае – это верхний предел горизонтального отклонения между кривой поступления $\alpha_l(t)$ и кривой обслуживания $\beta_l(t)$:

$$w_l = \sup_{t \geq 0} \{ \inf \{ w \geq 0 : \alpha_l(t) \leq \beta_l(t + w) \} \}. \quad (17)$$

Для $\alpha_l(t) \leq \beta_l(t + w)$, используя кривую поступления потока (2) и кривую обслуживания, согласно теореме 1 получим

$$\rho_l t + \sigma_l \leq (R - \rho_h - \rho_m) \left(t + w - \frac{\sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h - \rho_m} \right)^+. \quad (18)$$

После преобразований (18) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} w &\geq \frac{\rho_l t + \sigma_l + \sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h - \rho_m} - t, \\ w &\geq \frac{(\rho_l + \rho_h + \rho_m - R)t + \sigma_l + \sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h - \rho_m}. \end{aligned}$$

Теперь (17) можно представить как

$$w_l = \sup_{t \geq 0} \left\{ \inf \left\{ w \geq 0 : w \geq \frac{(\rho_h + \rho_m + \rho_l - R)t + \sigma_h + \sigma_m + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m} \right\} \right\}.$$

Так как $\rho_h + \rho_m + \rho_l < R$, то функция

$$\frac{(\rho_h + \rho_m + \rho_l - R)t + \sigma_h + \sigma_m + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m}$$

строго уменьшается с увеличением $t \geq 0$, достигая максимального значения при $t = 0$. Из этого следует, что

$$w_l = \inf \left\{ w \geq 0 : w \geq \frac{\sigma_h + \sigma_m + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m} = \frac{\sigma_h + \sigma_m + \sigma_l}{R - \rho_h - \rho_m} \right\}.$$

Теорема доказана. $\square$

Теорема 5. Верхняя граница задержки потока со средним приоритетом A_m определяется выражением

$$w_m = \frac{\sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h}.$$

Доказательство. Аналогично доказательству теоремы 4 имеем

$$\begin{aligned} w_m &= \sup_{t \geq 0} \{ \inf \{ w \geq 0 : \alpha_m(t) \leq \beta_m(t + w) \} \} = \inf \{ w \geq 0 : \alpha_m(0) \leq \beta_m(w) \}, \\ w_m &= \inf \{ w \geq 0 : \sigma_m \leq (R - \rho_h)w - \sigma_h \} = \inf \left\{ w \geq 0 : w \geq \frac{\sigma_h + \sigma_m}{R - \rho_h} \right\}. \end{aligned}$$

Теорема доказана. $\square$

Теорема 6. Верхняя граница задержки потока с высшим приоритетом A_h определяется выражением

$$w_h = \sigma_h / R. \quad (19)$$

Доказательство. Аналогично доказательству теоремы 4 имеем

$$\begin{aligned} w_h &= \sup_{t \geq 0} \{ \inf \{ w \geq 0 : \alpha_h(t) \leq \beta_h(t + w) \} \} = \inf \{ w \geq 0 : \alpha_h(0) \leq \beta_h(w) \}, \\ w_h &= \inf \{ w \geq 0 : \sigma_h \leq R w \} = \inf \left\{ w \geq 0 : w \geq \frac{\sigma_h}{R} \right\}. \end{aligned}$$

Теорема доказана. $\square$

6. Численное моделирование

С использованием полученных аналитических результатов было проведено численное моделирование верхних границ задержек передачи трафика интерфейса eCPRI в сегменте Fronthaul мобильных сетей 4G/5G. Предположим, что для реализации сегмента Fronthaul используется технология 10G TSN Ethernet со скоростью передачи 10 Гбит/с, тогда с учетом максимального размера кадра Ethernet в 1522 байта скорость передачи трафика интерфейса eCPRI составит $R = 9.852$ Гбит/с. Рассмотрим случаи подключения к данному сегменту Fronthaul трех, шести или девяти радиоголовок. Согласно (19) максимальная задержка трафика высшего приоритета при фиксированной скорости сегмента Fronthaul зависит только от пачечности этого трафика. Следовательно, при допустимой задержке трафика высшего приоритета в 0.1 мс (см. табл. 1) пачечность данного трафика не должна превышать 128 Кбайт, что хорошо согласуется с технологией Ethernet, в которой максимальный размер полезной нагрузки в кадре не превышает 1.522 Кбайт. Были проведены расчеты верхних границ задержек трафика интерфейса eCPRI разных приоритетов в зависимости от числа радиоголовок RRH, подключенных к сегменту Fronthaul. При расчетах принималось, что пачечность трафика всех трех приоритетов одинакова ($\sigma_h = \sigma_m = \sigma_l$) и равна максимальному размеру кадра Ethernet 1.522 Кбайт.

Результаты моделирования показали, что верхние границы задержек трафика высшего приоритета значительно меньше нормируемой допустимой задержки в 100 мкс даже при подключении девяти радиоголовок (рис. 7).

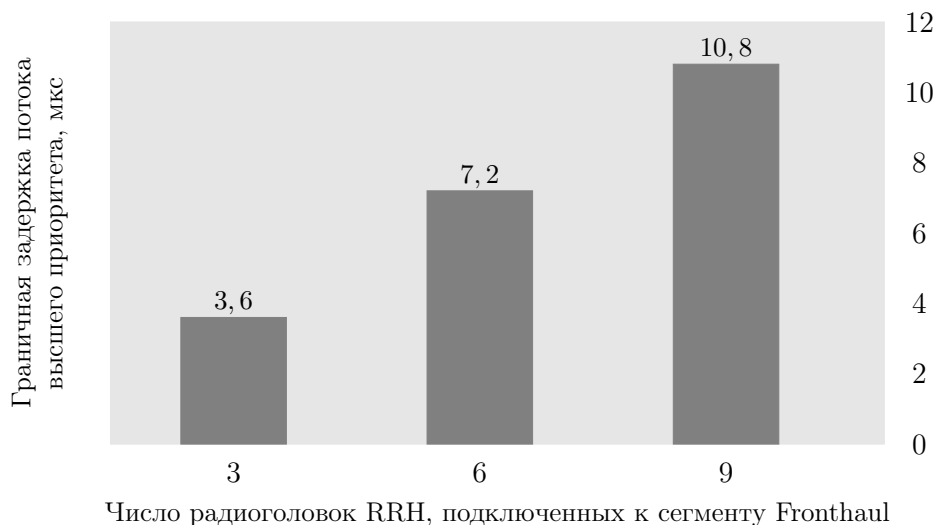


Рис. 7. Результаты расчетов задержек трафика высшего приоритета

Fig. 7. Delay bounds for high-priority traffic

Результаты моделирования максимальных задержек трафика среднего приоритета, приведенные на рис. 8, показали, что они больше задержек высокоприоритетных потоков, но даже при девяти подключенных радиоголовках не превышают нормируемой допустимой задержки в 1 мс при условии, что каждая радиоголовка создает трафик высшего приоритета, занимающий 10 % полосы пропускания сегмента Fronthaul.

Полученные результаты расчетов верхних границ задержки потоков трафика низшего приоритета (рис. 9) свидетельствуют о том, что такой трафик имеет задержки больше,

чем трафик высшего и среднего приоритетов. Но эти задержки также не превышают максимально допустимой величины в 100 мс.

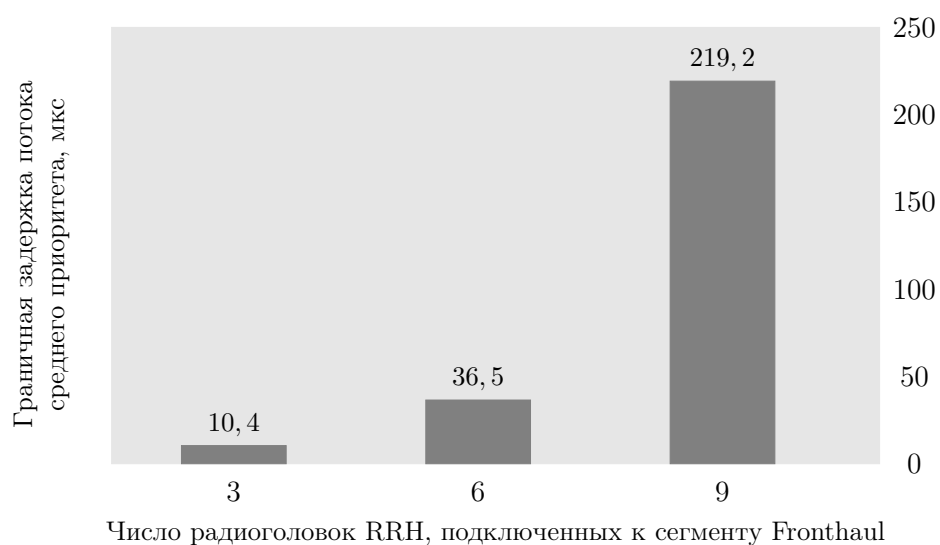


Рис. 8. Результаты расчетов задержек трафика среднего приоритета

Fig. 8. Delay bounds for medium-priority traffic

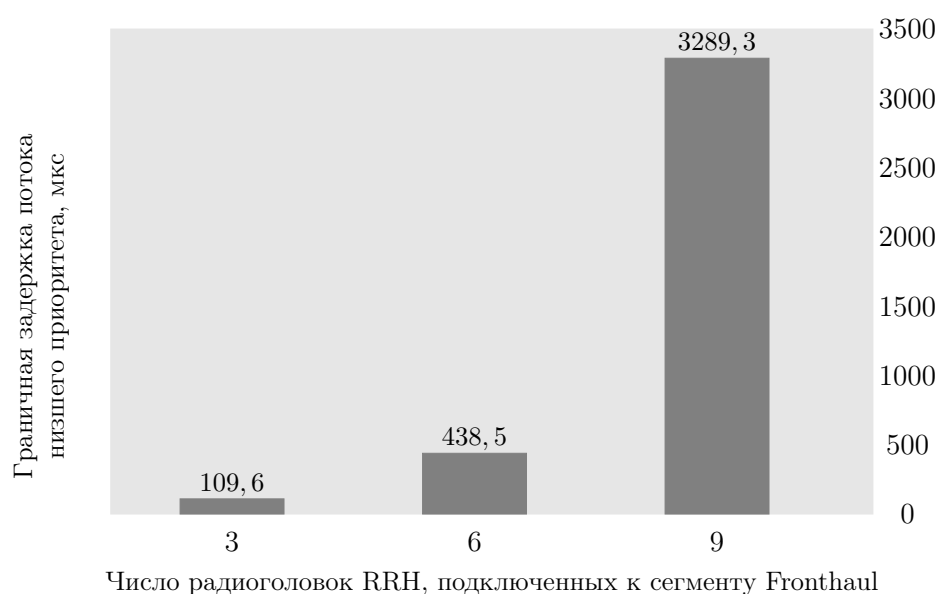


Рис. 9. Результаты расчетов задержек трафика низшего приоритета

Fig. 9. Delay bounds for low-priority traffic

Следует отметить, что все приведенные выше расчеты относились к задержкам кадров Ethernet в очередях потоков разных приоритетов трафика и не учитывали времени передачи сигналов интерфейса eCPRI в физическом канале связи. В мобильных сетях 4G/5G транспортный сегмент Fronthaul на физическом уровне чаще всего реализуется с использованием оптоволоконных кабелей, в которых 1 км оптического волокна вносит задержку распространения света около 5 мкс. Поэтому к полученным выше значениям верхних

границ задержки потоков трафика интерфейса eCPRI разных приоритетов необходимо добавить фиксированную задержку, зависящую от физической длины оптоволоконного кабеля.

Так, если эта длина кабеля равна 10 км, то дополнительная фиксированная задержка будет 50 мкс, что составляет 50 % от максимальной допустимой задержки потоков трафика высшего приоритета.

Предложенная методика расчетов задержек передачи трафика интерфейса eCPRI различных приоритетов в сегменте Fronthaul на практике может быть использована и для решения обратной задачи – при заданных величинах трафика и норм на его максимальные задержки можно определить необходимую скорость (пропускную способность) транспортного сегмента Fronthaul мобильных сетей 4G/5G и выбрать необходимую технологию его реализации.

Заключение

Использование математического аппарата теории сетевого исчисления позволило достаточно просто построить аналитическую модель транспортного сегмента Fronthaul в мобильных сетях 4G/5G и определить с ее помощью верхние граничные оценки задержек различного вида трафика интерфейса eCPRI. Эти теоретические результаты позволяют на практике рассчитать минимальную требуемую пропускную способность транспортного сегмента Fronthaul в сетях 4G/5G. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что получаемые границы задержки трафика интерфейса eCPRI с различным приоритетом в сегменте Fronthaul обладают большим потенциалом для помощи оператору мобильной сети при развертывании и эксплуатации отечественных сетей 4G/5G.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Росляков А.В., Герасимов В.В. Анализ сквозной задержки в транспортном сегменте Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN // Тр. учебн. завед. связи. 2024. Т. 10, № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84>.
2. Караулова О.А., Киреева Н.В., Чупахина Л.Р. Анализ времени ожидания в G/G/1 очереди // ИКТ. 2018. Т. 16, № 4. С. 393–399. <https://doi.org/10.18469/ikt.2018.16.4.05>.
3. Le Boudec J.-Y., Thiran P. (Eds.) Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Ser.: Lecture Notes in Computer Science. V. 2050. Springer, 2001. xx, 276 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-45318-0>.
4. Common public radio interface: Requirements for the eCPRI transport network. eCPRI Transport Network Requirements Specification. Ver. 1.1. Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corp., Nokia, 2018. 14 p.
5. Росляков А.В., Герасимов В.В. Реализация сегмента Fronthaul сетей 4G/5G на базе технологии TSN // Перв. мял. 2024. № 3. С. 42–50. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2024.119.3.42.50>.

6. Росляков А.В., Лысков А.А. Сетевое исчисление (Network Calculus) и его применение для оценки сетевых характеристик. Самара: ПГУТИ, 2019. 222 с.
7. Кудрявцева Е.Н., Росляков А.В. Базовые принципы и перспективы использования теории сетевого исчисления (Network Calculus) // ИКТ. 2013. Т. 11, № 3. С. 34–39.
8. Росляков А.В., Лысков А.А., Витевский В.Д. Сетевое исчисление (Network Calculus). Часть 1. Теоретические основы // ИКТ. 2018. Т. 16, № 1. С. 19–33.
9. Cruz R.L. A calculus for network delay, part I: Network elements in isolation // IEEE Trans. Inf. Theory. 1991. V. 37, No 1. P. 114–131. <https://doi.org/10.1109/18.61109>.
10. Cruz R.L. A calculus for network delay, part II: Network analysis // IEEE Trans. Inf. Theory. 1991. V. 37, No 1. P. 132–141. <https://doi.org/10.1109/18.61110>.
11. Кривулин Н.К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2009. 256 с.

References

1. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Analysis of end-to-end delay in the transport segment of Fronthaul 4G/5G networks based on TSN technology. *Tr. Uchebn. Zaved. Svyazi*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 73–84. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-1-73-84>. (In Russian)
2. Karaulova O.A., Kireeva N.V., Chupakhina L.R. Analysis of the waiting time in a G/G/1 queue. *Infokommun. Tekhnol.*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 393–399. <https://doi.org/10.18469/ikt.2018.16.4.05>. (In Russian)
3. Le Boudec J.-Y., Thiran P. (Eds.) *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet*. Ser.: Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2050. Springer, 2001. xx, 276 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-45318-0>.
4. Common public radio interface: Requirements for the eCPRI transport network. eCPRI Transport Network Requirements Specification. Ver. 1.1. Ericsson AB, Huawei Technologies Co. Ltd, NEC Corp., Nokia, 2018. 14 p.
5. Roslyakov A.V., Gerasimov V.V. Realisation of the Fronthaul segment of 4G/5G networks based on TSN technology. *Pervaya Milya*, 2024, no. 3, pp. 42–50. <https://doi.org/10.22184/2070-8963.2024.119.3.42.50>.
6. Roslyakov A.V., Lysikov A.A. *Setevoe ischislenie (Network Calculus) i ego primenenie dlya otsenki setevykh kharakteristik* [Network Calculus and Its Application for Network Performance Evaluation]. Samara, PGUTI, 2019. 222 p. (In Russian)
7. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. Basic principles and perspectives of Network Calculus application. *Infokommun. Tekhnol.*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 34–39. (In Russian)
8. Roslyakov A.V., Lysikov A.A., Vitevskiy V.D. Network Calculus. Part 1. Theoretical foundations. *Infokommun. Tekhnol.*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 19–33. (In Russian)
9. Cruz R.L. A calculus for network delay, part I: Network elements in isolation. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1991, vol. 37, no. 1, pp. 114–131. <https://doi.org/10.1109/18.61109>.
10. Cruz R.L. A calculus for network delay, part II: Network analysis. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1991, vol. 37, no. 1, pp. 132–141. <https://doi.org/10.1109/18.61110>.

11. Krivulin N.K. *Metody idempotentnoi algebry v zadachakh modelirovaniya i analiza slozhnykh sistem* [Methods of Idempotent Algebra for Solving Problems in Modeling and Analysis of Complex Systems]. St. Petersburg, Izd. S.-Peterb. Univ., 2009. 256 p. (In Russian)

Информация об авторах

Александр Владимирович Росляков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

E-mail: a.roslyakov@psuti.ru

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

Вячеслав Васильевич Герасимов, старший преподаватель кафедры сетей и систем связи, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

E-mail: v.gerasimov@psuti.ru

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

Author Information

Aleksandr V. Roslyakov, Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, Head of Department of Networks and Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

E-mail: a.roslyakov@psuti.ru

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

Vyacheslav V. Gerasimov, Senior Lecturer, Department of Networks and Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics

E-mail: v.gerasimov@psuti.ru

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

Поступила в редакцию 29.10.2024

Принята к публикации 20.03.2025

Received October 29, 2024

Accepted March 20, 2025