

5. Palkin M.V. Ballistic and navigation issues for satellite formation flying design. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie*, 2015, no. 6, pp. 22–32. (In Russ.)
6. Ovchinnikov M. Yu. Dynamics and control of promising multi-element orbital systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4 (2), pp. 255–257. (In Russ.)
7. Kubasov V.N. et al. *Methods of rendezvous in orbit*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 183 p. (In Russ.)
8. Konstantinov M.S. et al. *Mechanics of space flight: Textbook for Universities*; Ed. by V.P. Mishin. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 408 p. (In Russ.)
9. Markeev A.P. *Theoretical mechanics: Textbook for Universities*. Moscow: Chero, 1999, 572 p. (In Russ.)
10. International Space Station – history, device, facts. URL: <https://nauka-prosto.ru/page/mezhdunarodnaya-kosmicheskaya-stantsiya> (accessed: 10.11.2023). (In Russ.)

Received 14.11.2023

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

004.724.4

АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ ЗАДЕРЖЕК В СЕТИ TSN ETHERNET

Сударева М.Е.¹, Яшин В.Н.²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ

² Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: masha_sudareva@mail.ru

В статье описывается анализ граничных задержек в сетях TSN (Time-Sensitive Networking/ Синхронизирующиеся по времени сети) Ethernet с помощью детерминированного анализа, который строится на основе сетевого исчисления. Сегодня интернет-сети успешно сокращают операционные сквозные задержки до десятков миллисекунд, но современным приложениям необходимы более кратковременные задержки. Именно сверхкороткие или граничные задержки (ULL) позволяют реализовать требования к современным приложениям. Задержки являются критическим фактором в такой сфере, как телемедицина. Например, в телехирургии требуется подключение к сети практически в режиме реального времени. В статье представлены результаты проведенного анализа сети TSN Ethernet в графической форме наряду с графической интерпретацией оценки задержки в сети TSN Ethernet.

Ключевые слова: TSN, детерминированный анализ, сетевое исчисление, сквозная задержка, граничные задержки, кривая поступления, кривая обслуживания

Введение

Традиционные интернет-сети, которые обеспечивают сквозное соединение для пользователей, успешно сокращают операционные сквозные задержки только до десятков миллисекунд. Однако нынешние и будущие приложения требуют сверхнизкие или граничные задержки ULL (Ultra Low Latency) [1]. Критически важны задержки в медицинских приложениях для телехирургии и транспорта, так как требуют подключения к сети почти в реальном времени. Требования к пропускной способности в значительной степени зависят от потребностей приложений, которые могут широко варьироваться от небольших объемов данных интернет вещей IoT (Internet of Things) до крупных обменов мультимедийными данными, передаваемыми в облако и из облака [2].

Тематика исследования граничных задержек в сетях, чувствительных ко времени TSN (Time Sensitive Networking) Ethernet, заключается в том, что в таких разнородных средах, как автомобильные транспортные средства, дополненная и виртуальная реальность AR/VR (Augmented reality/ Virtual Reality), а также роботизированные приложения, которые необходимы для промышленного интернета вещей IIoT (Industrial Internet of Things), могут потребоваться как высокие скорости передачи данных, так и ULL [3]. Высокие скорости передачи данных могут потребоваться для передачи видеопотока с камер, которые используются для управления транспортными средствами и роботами, а в приложениях будет очень полезен специальный механизм для универсального удовлетворения разнообразных требований ULL.

Исходя из вышеперечисленных аспектов, можно сделать вывод, что данное исследование имеет актуальность [4].

Технология TSN Ethernet

Представим сеть TSN в виде графа, состоящего из набора узлов, которые могут быть либо конечными системами (ES), либо коммутаторами (SW), подключенными через физические каналы. Предполагается, что каналы являются полнодуплексными, что позволяет осуществлять связь в обоих направлениях. Пример проиллюстрирован на рисунке 1, где есть 4 конечных системы, от ES1 до ES4, и 3 переключателя, от SW1 до SW3.

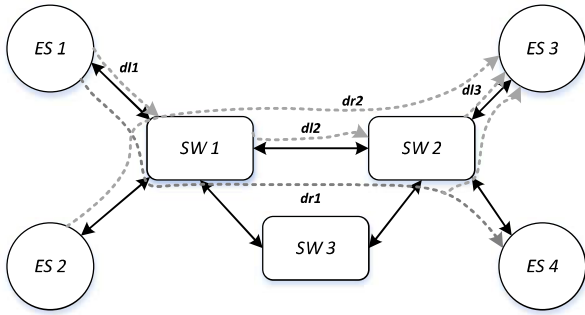


Рисунок 1. Пример топологии сети TSN

Топология сети TSN моделируется как неориентированный граф, где $V = ES \cup SW$ – это набор конечных систем (ES) и коммутаторов (SW), а E – набор физических каналов. Для рисунка 1

$V = ES \cup \{ES1; ES2; ES3; ES4\} \cup \{SW1; SW2; SW3\}$, а физические ссылки показаны двойными черными стрелками. Связь с потоком данных $dl_i = [v_a; v_b] \in L$, где L – это набор каналов передачи данных в сети, является направленным ребром от v_a к v_b , где v_a и $v_b \in V$ могут быть ESes или SWs. Скорость физического канала обозначается как $dl_k * C$. Предположим то, что все физические ссылки имеют одинаковую скорость C . Поскольку существует только один выходной порт для каждой ссылки потока данных, dl_k также может ссылаться на выходной порт h в v_a , связанный со ссылкой на v_b . Маршрутизация потока данных $dr_k \in R$ представляет собой упорядоченную последовательность каналов потока данных, соединяющих единственную исходную ES с одной или несколькими ES назначения. Например, на рисунке 1 $dr1$ соединяет исходную оконечную систему ES1 с оконечными системами назначения ES3 и ES4, а $dr2$ соединяет ES2 с ES3.

Задачи приложений, работающих в ESes, обмениваются данными через потоки, которые имеют один источник и могут иметь несколько пунктов назначения. Несмотря на то, что в сети может быть

некритическая связь, рассмотрим критические потоки, которые имеют требования в реальном времени. Определим $\tau = \bigcup_k \tau_{TTk}$ как множество всех критических потоков в сети TSN [5].

Как уже упоминалось, стандарт TSN поддерживает разные приоритеты для критических потоков TT (Time-Triggered). Предполагается, что приоритет P_m при $m \in [1; 8]$ для каждого критического потока TT был определен разработчиком системы. Более того, для каждого потока TT $\tau_{TTk} \in \tau$, известен размер кадра l_{TTk} , период P_{TTk} в исходной ES и статически определенную маршрутизацию dr_{TTk} .

Оценка наихудшего случая передаваемых в сети задержек и задержек потоков производится путем внедрения теории сетевого исчисления, которая, в свою очередь, разработана для детерминированного анализа производительности сетевой связи. Операция свертки min-plus алгебры ($\min; +$) определяет кривые поступления и обслуживания, которые для проведения анализа осуществляют их построение, а также описывают доступность сетевых узлов и поведение потоков.

$R(t)$ – это подсчитанное общее, входящее в сеть до момента t , количество битов, представляющее совокупность функции ввода потока, которые моделируют процесс поступления с помощью кривой поступления $\alpha(t)$. Только при:

$$R(t) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{R(s) + \alpha(t-s)\} = (R \otimes \alpha)(t),$$

где $R(s)$ – функция потока;

$\alpha(t)$ – кривая поступления, которая описывает границу потока $R(s)$;

$(t-s)$ – любой период, на интервале от 0 до t , в течение которого $\alpha(t)$ будет кривой поступления для потока $R(s)$;

$\otimes$ – операция свертки min-plus;

$\inf$ – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу.

Примером кривой поступления является модель маркерной корзины, описываемая максимальным скачок потока (σ) и верхней границей долгосрочной средней скорости потока (ρ) [6].

Кривая обслуживания $\beta(t)$ моделирует обрабатывающую способность доступного ресурса. Пусть, подсчитывает общее количество битов потока, выходящего из сетевого узла до момента времени t , процесс отправления $R^*(t)$, представляющий кумулятивную, т.е. накапливающую функцию выхода. Сетевой узел предлагает кривую обслуживания $\beta(t)$ для потока, если:

$$R(t) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{R(s) + \beta(t-s)\} = (R \otimes \beta)(t),$$

где $R(s)$ – функция потока;

$\beta(t)$ – кривая обслуживания, которая описывает границу потока $R(s)$;

$(t-s)$ – любой период, на интервале от 0 до t , в течение которого $\beta(t)$ будет кривой обслуживания для потока $R(s)$;

$\otimes$ – операция свертки min-plus;

$\inf$ – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу.

Типичным примером кривой обслуживания является кривая обслуживания «скорость-задержка» вида:

$$\beta_{R,T}(t) = R[t - T]^+,$$

где R – скорость обслуживания;

t – момент времени;

T – задержка обслуживания;

$[x]^+$ – равна x , если $x \geq 0$, и 0 в противном случае.

Задержка, которую испытывает поток в сетевом узле, будет ограничена между графиками двух кривых, тогда максимальное горизонтальное отклонение будет:

$$h(\alpha, \beta) = \sup \{ \inf \{ \tau \geq 0 \mid \alpha(s) \leq \beta(s + \tau) \} \},$$

где $\sup$ – точная верхняя граница или супремум;

$\inf$ – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу;

$\alpha(t)$ – кривая поступления, которая ограничивает поток $R(s)$;

$\beta(t)$ – кривая обслуживания, которая описывает границу потока $R(s)$.

Проанализируем ограниченный маркерной корзиной поток $\alpha_{\sigma,\rho}(t)$ и кривую обслуживания скорость/время ожидания, в узле $\beta_{R,T}(t)$ [5].

Наихудшая задержка проиллюстрирована с помощью двойной серой стрелки, обозначенной буквой $h(\alpha; \beta)$ на рисунке 2.

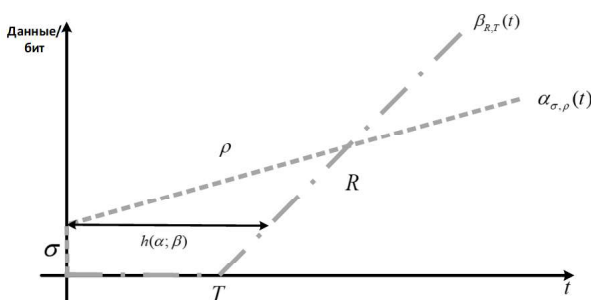


Рисунок 2. Основная схема снятия

Наихудшая сквозная задержка потока представляет собой сумму пределов задержки в сетевых узлах вдоль его маршрутизированного пути виртуального канала [7].

Важно получить суммарную кривую поступления, для потоков, которые конкурируют

на выходном порту, а также предоставленную устройством кривую обслуживания, чтобы получить для критического потока в узле входного порта задержку. По маршрутизированному пути распространяются границы задержки, из чего и получается для критического потока наихудшая сквозная задержка WCD (Worst-Case end-to-end Delay).

Существует с разными уровнями приоритета $P_m (1 \leq m \leq n)$ для критического трафика $n (1 \leq n \leq 8)$ очередей. В свою очередь в те же очереди входят с разными уровнями приоритета критические потоки P_m . Кадры в каждой очереди следуют порядку «первым пришел – первым обслужен» FIFO (First in, First out), и кадры имеют более высокий приоритет в очереди Q_{P_m} , чем в очереди $Q_{P_{m+1}}$. Пересылка кадров осуществляется тогда, когда связанный со шлюзом G_{P_m} , для управляемой GCL очереди Q_{P_m} , которая в свою очередь управляется открытыми $G_{P_m}(t)=1$ и закрытыми состояниями $G_{P_m}(t)=0$, шлюз открыт. На рисунке 3 проиллюстрировано открытие и открытие-закрытие шлюза G_{P_m} , цикл которого равен T_{P_m} , длина же в цикле открытия-закрытия в свою очередь равна L_{P_m} .

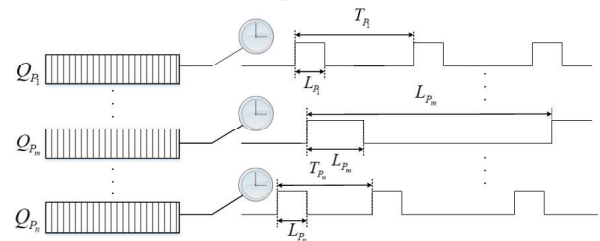


Рисунок 3. Процесс открытия и открытия входа каждой очереди

До момента закрытия шлюза, определяется время отправки всего кадра, которое в свою очередь определяет механизм опережающего просмотра, для каждого класса трафика, утвержденный стандартом 802.1Qbv. Время простоя, т.е. защитная полоса, определяется, когда переадресация кадра до следующего открытого окна не может быть возможна и возникает в конце текущего открытого окна. Максимальный размер передаваемого блока Ethernet MTU (Maximum Transmission Unit) в 1500 байтов в худшем случае больше защитной полосы. Критический кадр, уже находящийся на передаче, не может быть прерван кадром с более высоким приоритетом. Это подразумевает политика не приоритетного прерывания, т.е. отсутствие поддержки IEEE 802.1Qbu, если шлюзы открыты в то же время. Из-за возможного перекрытия с открытыми окнами других важных очередей, служебный ре-

курс, во время открытого окна Q_{P_m} для трафика P_m может быть не выделен [8].

Взаимоисключающей и специализированной для каждого класса трафика является услуга TDMA (Time Division Multiple Access), которая отличается от службы в одном узле для критического трафика с P_m . Из этого следует то, что повторяется, с фиксированной длиной цикла, временной интервал TDMA для трафика с нижней границей, т.е. гарантированной услугой. Но, как можно предположить, может возникнуть перекрытие, и для трафика P_m не будет выделен временной интервал обслуживания, управляемый GCL (Gate Control List) в TSN.

Необходимо получить длительность $\overline{L_{P_m}}$ временного интервала, для гарантированного обслуживания в каждом открытом окне Q_{P_m} от P_m , чтобы получить кривую обслуживания для трафика P_m . На рисунке 4 проиллюстрирована связь максимальной защитной полосы перед каждым открытым окном Q_{P_m} , которая зависит не только от наихудшего перекрытия критического трафика с более высоким и низким приоритетом.

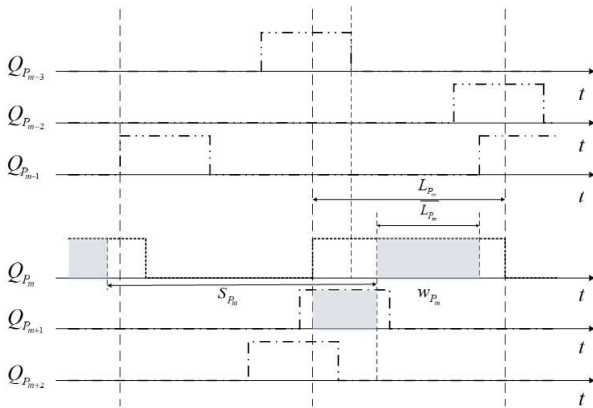


Рисунок 4. Гарантированный временной интервал в открытом окне

Первый кадр периода ожидания P_m получает услугу из соответствующего временного интервала что является максимальным временем ожидания S_{P_m} , которое в свою очередь связано с наихудшим перекрытием с другим приоритетным трафиком и максимальным размером кадра в Q_{P_m} .

Из-за различных ситуаций перекрытия с очередями с более высоким и более низким приоритетом, длина временного интервала $\overline{L_{P_m}}$ гарантированного обслуживания является переменной в разных открытых окнах Q_{P_m} , что и отмечено на рисунке 5 как $\overline{L_{P_m}}^1$, $\overline{L_{P_m}}^2$ и $\overline{L_{P_m}}^3$.

Первый кадр периода ожидания P_m получает услугу из соответствующего временного интервала что является максимальным временем ожидания S_{P_m} , которое в свою очередь связано с наихудшим

перекрытием с другим приоритетным трафиком и максимальным размером кадра в Q_{P_m} [9].

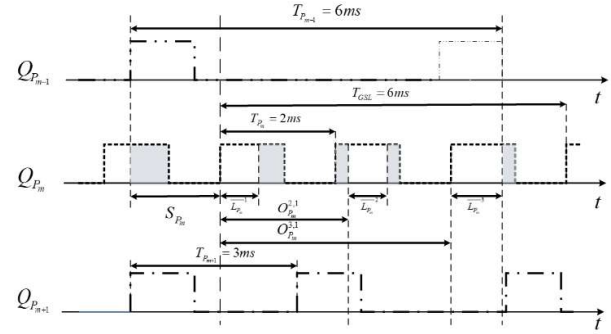


Рисунок 5. Гарантированный временной интервал в открытом окне

Из-за различных ситуаций перекрытия с очередями с более высоким и более низким приоритетом, длина временного интервала $\overline{L_{P_m}}$ гарантированного обслуживания является переменной в разных открытых окнах Q_{P_m} , что и отмечено на рис. 6 как $\overline{L_{P_m}}^1$, $\overline{L_{P_m}}^2$ и $\overline{L_{P_m}}^3$.

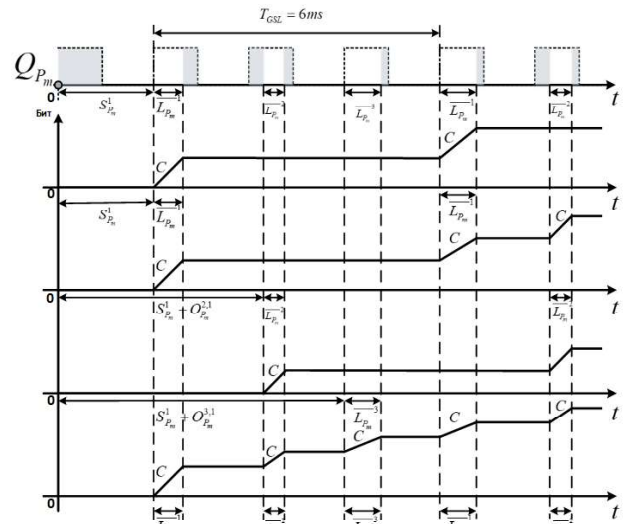


Рисунок 6. Гарантированные временные интервалы для P_m

Стоит обратить внимание на то, что наименьшим общим кратным LCM (Least Common Multiple) циклов открытия-закрытия T_{P_m} ($1 \leq m \leq n$) для всех очередей приоритета критического трафика, является GCL выходной порт, перекрывающийся отношением повторяющегося гиперпериода T_{GCL} . Для гарантированного временного интервала трафика P_m , существует ограничение количества случаев длины L_{P_m} , которое обозначается как N_{P_m} . Например, N_{P_m} равно 3, когда $T_{P_m-1} = 6$ мс, $T_{P_m} = 2$ мс, $T_{P_m+1} = 3$ мс и, следовательно, гиперпериод $T_{GCL} = 6$ на рисунок 6 [10].

Гарантированное обслуживание для P_m , трафика теряет периодичность T_{P_m} . Чтобы представить взаимное расположение соседнего гарантиро-

ванного временного интервала, определим относительное смещение $\sigma_{P_m}^{j,i} (j \in [i+1, i+N_{P_m}-1])$, которое представляет собой временной интервал между временем начала i -го и j -го гарантированных временных интервалов для P_m трафика, если принять i -й гарантированный временной интервал в качестве эталона. Например, на рисунке 6, $\sigma_{P_m}^{2,1}$ и $\sigma_{P_m}^{3,1}$ соответственно представляют относительные смещения между $\overline{L}_{P_m}^1$ и $\overline{L}_{P_m}^2$, а также между $\overline{L}_{P_m}^1$ и $\overline{L}_{P_m}^3$, принимая гарантированное окно обслуживания с длиной $\overline{L}_{P_m}^1$ в качестве эталона. Обратите внимание, что $\sigma_{P_m}^{j,i}$ равно 0, если $j = i$.

Теорема 1: возможная кривая обслуживания $\beta_{P_m}^i(t)$ для критического трафика приоритета P_m с учетом гарантированного временного интервала $\overline{L}_{P_m}^i (i = 1; \dots; N_{P_m})$ в качестве эталона определяется формулой (5) и (6):

$$\beta_{P_m}^i(t) = \sum_{j=i}^{i+N_{P_m}-1} \beta_{P_m}^{j,i}(t),$$

где

$$\beta_{P_m}^{j,i}(t) = \beta_{T_{GCL}, \overline{L}_{P_m}^j}(t + T_{GCL} - \overline{L}_{P_m}^j - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}),$$

$\beta_{T,L}$ – классическая кривая обслуживания моделей изменяющегося потока в сочетании с протоколом TDMA [11].

$$\beta_{T,L}(t) = C * \max\left[\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor L, t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor (T - L)\right].$$

Доказательство: принятие гарантированного временного интервала $\overline{L}_{P_m}^i$ в качестве эталона означает, что первый кадр периода отставания P_m получит услугу, начиная с временного интервала $\overline{L}_{P_m}^i$. Затем отдельно рассматривается N_{P_m} – последовательности периодических гарантированных временных интервалов, которые отдельно повторяются в соответствии с гиперпериодом T_{GCL} , чтобы получить кривую обслуживания, например, на рисунке 7.

Обслуживание трафика P_m не может быть гарантировано ни в каком временном интервале $0 \leq \Delta = t - t_0 < S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i}$, тогда для периодической последовательности временных интервалов обслуживания длина равна $\overline{L}_{P_m}^j (i \leq j \leq i + N_{P_m} - 1)$. В любом временном интервале $S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} \leq \Delta \leq S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + \overline{L}_{P_m}^j$, можно гарантировать обслуживание $C * (\Delta - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i})$ [12].

Кроме того, поскольку гарантированный временной интервал $\overline{L}_{P_m}^j$ повторяется с T_{GCL} , услуга в течение любого временного интервала $S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + \theta$.

$$T_{GCL} + \overline{L}_{P_m}^j \leq \Delta < S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} \quad (\forall \theta \in N)$$

не может быть гарантирован для P_m – трафика, в то время, как обслуживание $C * (\Delta - (S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL}))$ в любом временном интервале

$$\begin{aligned} S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} &\leq \Delta \leq \\ &\leq S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} + \overline{L}_{P_m}^j, \end{aligned}$$

может быть гарантирована для трафика P_m . Для последовательности периодических временных интервалов с длиной $\overline{L}_{P_m}^j$, кривая обслуживания задается как:

$$\beta_{P_m}^{j,i}(t) = \beta_{T_{GCL}, \overline{L}_{P_m}^j}(t + T_{GCL} - \overline{L}_{P_m}^j - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}),$$

где $\beta_{T_{GCL}, \overline{L}_{P_m}^j}(t)$ – классическая кривая обслуживания TDMA;

$S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}$ – относительное смещение от времени начала t_0 периода до времени начала гарантированного временного интервала $\overline{L}_{P_m}^j$ [7].

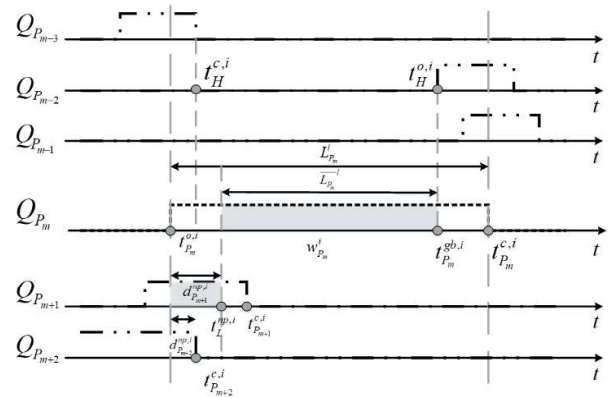


Рисунок 7. Граничный вид обслуживания на основе эталонного теста

В качестве эталона из суммы кривых обслуживания каждой периодической последовательности, состоящей из временных интервалов длиной $\overline{L}_{P_m}^j (i \leq j \leq i + N_{P_m} - 1)$ как показано, например, на рисунке 6.

Получается возможная кривая обслуживания для трафика P_m с использованием гарантированного временного интервала $\overline{L}_{P_m}^i$, что и проиллюстрировано на рисунке 6.

До сих пор были выведены возможные кривые N_{P_m} обслуживания $\beta_{P_m}^i(t) (i = 1; \dots; N_{P_m})$ для трафика P_m , рассмотренные различными гарантированными временными интервалами в гиперпериоде в качестве эталонов. Тогда кривая обслуживания $\beta_{P_m}(t)$ для трафика P_m является наихудшим случаем из всех возможных кривых обслуживания, то есть нижней огибающей $\beta_{P_m}^i(t)$:

$$\beta_{P_m}(t) = \min_{1 \leq i \leq N_{P_m}} \{\beta_{P_m}^i(t)\},$$

где $\beta_{P_m}^i(t)$ – кривая обслуживания для трафика P_m .

Заключение

Что бы рассмотреть проблему анализа граничных задержек в сетях TSN, была построена прикладная модель сети TSN в виде графа и осуществлен детерминированный анализ сети. В данном анализе была представлена модель сети TSN Ethernet на базе теории сетевого исчисления, в которой была произведена оценка наихудшего случая передаваемых в сети задержек и задержек потоков. Для получения суммарной кривой поступления, для потоков, конкурентов на выходном порту, была применена оценка критического трафика.

Литература

1. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 1. С. 18–22.
2. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 2. С. 22–27.
3. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN / А.В. Росляков [и др.] // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53.
4. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (дата обращения: 08.11.2023).
5. Бина Ш., Брукнер Д., Васина А.С. OPC UA TSN как технология для обеспечения связи на всех уровнях автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2019. № 2. С. 26–34.
6. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5524098> (дата обращения: 01.11.2023).
7. Performance impact of the interactions between time-triggered and rate-constrained transmissions in TTEthernet. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01255939> (дата обращения: 03.11.2023).
8. Timing analysis of TDMA-based networks using network calculus and integer linear programming. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/703363> (дата обращения: 05.11.2023).
9. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8430063> (дата обращения: 08.11.2023).
10. Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's time-aware and peristaltic shapers. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7385584> (дата обращения: 09.11.2023).
11. A calculus for network delay. I. Network elements in Isolation. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/61109> (дата обращения: 07.11.2023).
12. A new Solution for Industrial Communication / D. Bruckner [et al.]. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).

Получено 09.11.2023

Сударева Мария Евгеньевна, ассистент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 937 171-12-01. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

Яшин Владимир Николаевич, к.т.н., доцент кафедры информационных технологий Самарского государственного технического университета. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 987 913-40-52. E-mail: vlyashin@yandex.ru

ANALYSIS OF BOUNDARY LATENCIES IN THE TSN ETHERNET NETWORK

Sudareva M.E.¹, Yashin V.N.²

¹*Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

²*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: masha_sudareva@mail.ru

The article describes analysis of boundary latencies in the TSN Ethernet network using deterministic analysis, based on network calculations. Today Internet networks have successfully reduced end-to-end operational latencies to tens of milliseconds only, but modern applications require even lower latencies. It is so called ultrashort or edge latency (ULL), that fulfil requirements of modern applications. Latencies are very critical factor in such area as telemedicine because telesurgery needs almost

real-time network connection. The article provides results of TSN Ethernet network analysis in the form of a graph.

Keywords: *TSN, deterministic analysis, network calculus, end-to-end delay, boundary delays, arrival curve, service curve*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.06

Sudareva Maria Evgenievna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Assistant Advanced Aerospace Engineering School. Tel. +7 937 171-12-01. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

Yashin Vladimir Nikolaevich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Associate Professor of Information Technologies Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 987 913-40-52. E-mail: vlyashin@yandex.ru

References

1. Vorobiev S. TSN – time synchronized network. Part 1. *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2020, no. 1, pp. 18–22. (In Russ.)
2. Vorobiev S. TSN – time synchronized network. Part 2. *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2020, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.)
3. Roslyakov A.V. et al. Time sensitive networking standardization. *Standarty i kachestvo*, 2021, no. 4, pp. 48–53. (In Russ.)
4. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (accessed: 08.11.2023).
5. Bina Sh., Bruckner D., Vasina A.S. OPC UA TSN as a technology for communication at all levels of automation. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 2, pp. 26–34. (In Russ.)
6. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5524098> (accessed: 01.11.2023).
7. Performance impact of the interactions between time-triggered and rate-constrained transmissions in TTEthernet. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01255939> (accessed: 03.11.2023).
8. Timing analysis of TDMA-based networks using network calculus and integer linear programming. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/703363> (accessed: 05.11.2023).
9. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8430063> (accessed: 08.11.2023).
10. Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's time-aware and peristaltic shapers. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7385584> (accessed: 09.11.2023).
11. A calculus for network delay. I. Network elements in Isolation. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/61109> (accessed: 07.11.2023).
12. Bruckner D. et al. A new Solution for Industrial Communication. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (accessed: 10.03.2021).

Received 09.11.2023

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.896

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОДСЧЕТА ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Альгашев Г.А., Солдатова О.П.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ

E-mail: algashev@live.com