

**МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ  
В СЕТЯХ СО СКВОЗНОЙ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ И ВРЕМЕННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ**

И. Л. КОРОБКОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия  
ilya.korobkov.l@gmail.com*

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ решений, предназначенных для оценки максимального времени передачи пакетов по маршруту в сетях авионики со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием. Предложен метод оценивания максимального времени передачи пакетов, учитывающий особенности рассматриваемых сетей авионики, включая таблицы расписаний и максимальное время ожидания освобождения канальных ресурсов. Проведена серия вычислительных экспериментов, продемонстрировавшая адекватность и работоспособность предложенного метода.

**Ключевые слова:** математическая модель, худший случай, максимальное время передачи пакетов, сети со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием, таблица расписаний

**Ссылка для цитирования:** Коробков И. Л. Метод оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 77—86. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86.

**METHOD FOR ESTIMATING THE MAXIMUM PACKET TRANSMISSION TIME  
IN NETWORKS WITH END-TO-END ROUTING AND TIME MULTIPLEXING**

I. L. Korobkov

*ITMO University, St. Petersburg, Russia  
ilya.korobkov.l@gmail.com*

**Abstract.** A comparative analysis of existing solutions to estimating the maximum packet transmission time in networks with end-to-end routing and time multiplexing is carried out. A method for estimating the maximum packet transmission time is proposed, with the account for the features of the considered avionics networks including schedule tables and the maximum waiting time for the release of channel resources. Presented results of a series of computational experiments demonstrate the adequacy and efficiency of the proposed method.

**Keywords:** mathematical model, worst case, maximum packet transmission time, networks with end-to-end routing and time multiplexing, scheduling table

**For citation:** Korobkov I. L. Method for estimating the maximum packet transmission time in networks with end-to-end routing and time multiplexing. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 77—86 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86.

**Введение.** Временное мультиплексирование (ВМ) применяется для упорядочивания потоков пакетов во времени в авиационных вычислительных системах (ВС) интегрированной модульной авионики. В основе компьютерных сетей, использующих временное мультип-

лексирование (КСВМ), лежат сетевые стандарты SpaceWire [1—5] и GigaSpaceWire [6] с транспортными протоколами, поддерживающими ВМ, а именно СТП-ИСС, SpaceWire-D [7], SpaceWire-T [8] (рассматривается в аспектах ВМ). Сети рассматриваются в научных и социально-экономических целях и системах. ВМ обеспечивает доставку пакетов в течение регламентированного времени ( $T_{\text{req}}$ ), несмотря на ограниченную пропускную способность каналов, обусловленную массогабаритными требованиями. При ВМ выдача данных в сеть осуществляется согласно расписаниям, состоящим из временных интервалов (тайм-слотов), в течение которых разрешена передача [9]. Таблица расписаний (ТР), содержащая расписания для узлов, описывает работу сети с ВМ.

Исследуемые сетевые стандарты SpaceWire и GigaSpaceWire полностью совместимы на сетевом уровне. В настоящей работе рассматривается пакетная передача, которая выполняется при помощи сквозной (или червячной, от англ. *wormhole*) маршрутизации. В транспортных протоколах с ВМ, использующихся поверх стандартов, могут быть указаны фиксированные приоритеты пакетов при выдаче с терминального узла (например, протокол СТП-ИСС), процесс передачи пакета не прерывается передачей высокоприоритетного пакета. ТР относится только к узлам с поддержкой СТП-ИСС, SpaceWire-D и SpaceWire-T (в части ТР на узлах), задано ограничение пропускной способности каналов (ОПК). В рамках одного трафика размеры пакетов фиксированные.

При проектировании ВС требуется проверить корректность ТР на худший случай — максимальное время передачи пакетов по маршруту ( $T_{\text{maxPath}}$ ). Если  $T_{\text{maxPath}} > T_{\text{req}}$ , пакеты будут доставлены по истечении заданного срока, что для чувствительных к задержкам систем недопустимо. Такие ТР не должны допускаться к эксплуатации, кроме отдельных исключительных случаев.

**Анализ подходов.** На сегодняшний день известны следующие подходы и программные инструменты для оценивания времени передачи пакетов: аналитические — модель Кнудсен—Мадсена [10]; модель Ренера [11]; Network Calculus [12]; метод расчета задержек для канальных контроллеров SpaceWire/GigaSpaceWire [13, 14]; инструменты проектирования и моделирования — TTEPlan [15], MASIW [16], OPNET [17], SNL [18], VisualSim [19], SWIS, SHINE [20], MOST [21].

Модель Кнудсен—Мадсена позволяет вычислить пропускную способность, на основе которой можно определить время передачи пакета: она не учитывает ТР, наличие приоритетности трафиков и максимально релевантного ожидания освобождения канального ресурса двумя и более трафиками.

Коммуникационная модель Ренера служит для вычисления задержек с учетом коммутационных элементов, количества обращений к памяти, шинам, арбитраж. Однако, как и в модели Кнудсен—Мадсена, не учитываются приоритет и выдача данных по ТР, в частности не учитывается механизм виртуальных каналов с разбиением пакетов на кадры и их передачи в разных тайм-слотах.

Система Network Calculus (NC) позволяет выполнять стохастическое (SNC) и детерминированное (DNC) алгебраическое моделирование. DNC дает прогноз худшего случая и гарантирует, что реальные задержки будут не превысят заданных пределов. Основными недостатками подходов SNC и DNC являются узконаправленная специфичность, чрезмерная вычислительная сложность при получении оценок, интенсивно прогрессирующая при росте сети [22]. В известных работах, описывающих применение DNC для анализа сетей, подобных SpaceWire, в совокупности не учитывается наличие в ВС трафиков, пакеты которых (например контрольно-сигнальные) могут выдаваться в любой тайм-слот [23].

В работе [14] предложен метод расчета средних значений временных задержек для канальных контроллеров, построенных на исследуемых сетях SpaceWire, GigaSpaceWire. Однако задержки вычисляются для канального соединения „точка—точка“, а не всего маршрута,

не учитывается выдача данных по TP, а также худший случай — максимальное ожидание освобождения канальных ресурсов сети.

TTEPlan — коммерческий инструмент планирования для сетей TTEthernet и AFDX. Учитываются требования по времени доставки сообщений, виртуальные каналы, размеры кадров. Однако TTEPlan не учитывает особенности сетей SpaceWire, GigaSpaceWire и является закрытым коммерческим продуктом.

MASIW (Modular Avionics System Integrator Workplace) — среда для автоматизации проектирования авионики, разработанная совместно коллективами ГосНИИАС и Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. Этот инструмент поддерживает широкие функциональные возможности (составление циклограмм расписаний запуска приложений на процессоре), включая расчеты времени доставки сообщений от отправителя к получателю путем имитационного моделирования. MASIW не позволяет работать с сетями SpaceWire, GigaSpaceWire.

Существует ряд систем моделирования, имитирующих обмена пакетами в сетях SpaceWire и позволяющих замерять время передачи пакетов: OPNET, SNL, VisualSim, SWIS, SHINE, MOST. Интерес представляют SHINE и MOST, выполняющие моделирование не только SpaceWire, но и SpaceFibre. Однако они не поддерживают стандарт GigaSpaceWire и транспортные протоколы с BM, специально разработанные для этих сетей, являются закрытыми коммерческими продуктами, что не позволяет удостовериться в адекватности получаемых результатов.

Следовательно, актуальной задачей является разработка универсального математического метода для оценки корректности TP по максимальному времени передачи пакетов для сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с поддержкой BM на транспортном уровне.

Метод оценки корректности таблиц расписаний. В выполнении следующих четырех общих шагов состоит суть предлагаемого универсального метода.

Начальное задание параметров элементам сети ( $a_i$ ) происходит на шаге 1: передающим портам узлов и коммутаторов  $a_i$  указывается расписание (или TP из одной строки тайм-слотов), приоритеты и ОПК (а также скорость, периодичность, размеры пакетов). Поскольку стандарты SpaceWire и GigaSpaceWire в коммутаторах не позволяют учитывать приоритеты пакетов и не поддерживают BM, то приоритеты указываются одинаковыми, передача разрешена в любой тайм-слот.

Для TP на шаге 2 (рис. 1) выполняется обособление тайм-слотов в отдельные группы — подрасписания  $h$ , в рамках которых наблюдается постоянство характеристик процесса передачи данных и участников обменов. Перечень подрасписаний обозначим множеством  $H$  ( $h \in H$ ).

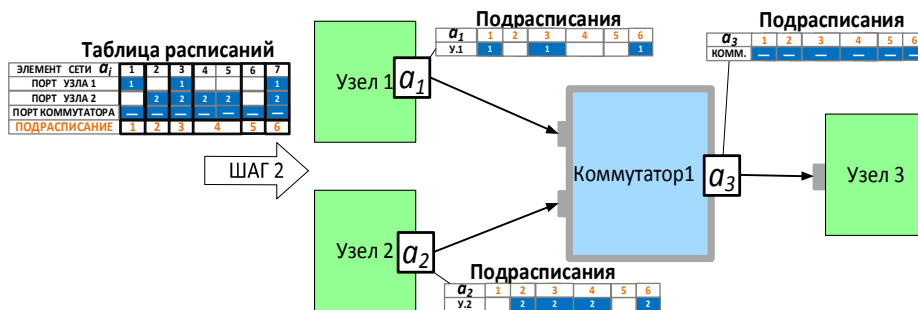


Рис. 1

Время выдачи пакетов является случайным, поскольку значимые для функционирования трафика с асинхронной генерацией в любой тайм-слот передаются в рамках одной проводной сети с периодическими потоками, что привносит стохастичность. Используется аналитическая модель разомкнутой сети систем массового обслуживания (СМО) для описания процесса передачи пакетов в КСВМ ВС, а именно  $a_i$  описывается отдельной СМО с относи-

тельными приоритетами. В практических задачах используется подобная практика применения теории массового обслуживания [24].

Максимальная задержка передачи пакетов  $i$  информационного потока по  $h$  ( $h \in H$ ) для  $a_i$  ( $T_i^{(h)}$ ) вычисляется на шаге 3. Для этого применяется специально разработанная СМО [25], поскольку обладает универсальностью и может быть применена для оценки сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с протоколами SpaceWire-D, СТП-ИСС, позволяет учесть фиксированные приоритеты и червячную маршрутизацию при предположении, что в роли заявки СМО выступает пакет.

Вычисляется  $T_i^{(h)}$  в предположении того, что пакеты одновременно поступают во входной интерфейс порта выдачи пакетов, наибольший по размеру пакет имеет высший приоритет и будет передан первым, пакет с меньшим приоритетом пойдет в отдельный буфер (очередь):

$$\forall i \in I_{a_i}^{(h)}, T_i^{(h)} = \max_{g \in I_{a_i}^{(h)}, g \neq i} (T_{\text{packetPort}}(g)) + T_{\text{packetPort}}(i) z_{\max}(i) + \Psi(i), \quad (1)$$

где  $I_{a_i}^{(h)}$  — конечное множество потоков, проходящих через  $a_i$  при подрасписании  $h$ ;  $T_{\text{packetPort}}$  — время прохождения пакета через порт;  $z_{\max}$  — худшее, т.е. наибольшее, количество пакетов в буфере ожидания для  $i$  потока;  $\Psi(i)$  — время, за которое пакеты с более высокими приоритетами ( $\tau$ ) и пакеты с равным приоритетом ( $\gamma$ ) освободят порт, и отправка пакета  $i$  потока станет возможной.

Параметр  $z_{\max}(i)$  является стохастической величиной из-за асинхронного характера генерации и прихода пакетов:

$$z_{\max}(i) = \sum_{j=1}^{K(i)} j \cdot p_{q,\max}(i, j), \quad (2)$$

$$p_{q,\max}(i, j) = \begin{cases} 1, & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) \geq 1, \\ p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j), & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) < 1, \end{cases}$$

где  $K(i)$  — размер очереди для пакетов  $i$  потока:  $z_{\max}(i) \leq K(i)$ . Вероятность  $p_q(i, j)$  того, что в буфере (очереди) для  $i$  потока ожидают  $j$  пакетов (заявок), вычисляется как сумма предельных вероятностей  $p_{i_0, i_1, \dots, i_{N-1}, i_N}$ , соответствующих состояниям системы, при которых в очереди СМО  $i$  потока находятся  $j$  заявок [25];  $p_{q,\max}(i, j)$  — максимальная вероятность, что в очереди  $i$  трафика ожидают обслуживания  $j$  заявок.

$\zeta_{\max}(i, j)$  — абсолютная погрешность разброса  $p_{q,\max}(i, j)$  от величины  $p_q(i, j)$ . Для того чтобы  $z_{\max}$  отражала не среднее, а худшее максимальное, введено  $\zeta_{\max}(i, j)$ . Имеется практика применения вероятностных величин марковских процессов для определения максимального количества заявок и времени обслуживания, например, в работе [26].

Метод Корнфельда [2] используется для расчета  $\zeta_{\max}(i, j)$ . В методе Корнфельда абсолютная погрешность вычисляется следующим образом:

$$\Delta X = (X_{\max} - X_{\min}) / 2, \quad X_{\max} = X_{\text{avg}} + \Delta X \quad (3)$$

где  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  — максимальное и минимальное значение измеряемой случайной величины. Случайной величиной является вероятность нахождения СМО в одном из состояний. Такая величина может принимать теоретические экстремумы: 0 или 1, тогда  $\Delta X = (1-0)/2 = 0,5$ .

Максимум случайной величины СМО теоретически составит:

$$P_{\max, \text{теор}} = P_{i_0, \dots, i_{N-1}, i_N} + 0,5. \quad (4)$$

В теории ошибок обосновано использование метода Корнфельда для оценок максималь-

ного отклонения случайной величины от среднего значения [27].

Благодаря наличию нормировочного условия

$$p_{0,0,\dots,0,0} + \sum_{j=0}^K p_{1,0,\dots,0,j} + \sum_{j=0}^K p_{1,0,\dots,1,j} + \dots + \sum_{j=0}^K p_{N,K,\dots,K,j} = 1$$

указанные рассуждения можно применить и для  $p_q(i,j)$ . В результате  $\zeta_{\max}(i,j)$  составит:

$$\zeta_{\max}(i,j) = \frac{1-0}{2} = 0,5. \quad (5)$$

Следует указывать  $\zeta_{\max}(i,j) = \sup(1) = 0,9$  для гарантированно худшего случая. На основе статистических испытаний величина  $\zeta_{\max}(i,j)$  может быть уточнена.

Предлагается следующая формула для вычисления  $\Psi(i)$ :

$$\Psi(i) = \sum_{\tau \in hp(i)} T_{\text{packetPort}}(\tau) z_{\max}(\tau) + \sum_{\gamma \in ep(i)} T_{\text{packetPort}}(\gamma) \cdot \min(z_{\max}(i), z_{\max}(\gamma)), \quad (6)$$

где  $z_{\max}(\tau)$  и  $z_{\max}(\gamma)$  — максимальное количество пакетов в очереди  $\tau$  и  $\gamma$  потоков. Расчеты  $z_{\max}(\tau)$ ,  $z_{\max}(\gamma)$  аналогичны  $z_{\max}(i)$ .

Приведенные рассуждения справедливы лишь для случая, что был хотя бы передан хотя один байт пакета на  $h$ :

$$\Omega_{\max}(i) \cdot S_{N\text{Char}}(i) \geq 1, \quad (7)$$

где  $\Omega_{\max}(i)$  — максимальное количество переданных пакетов на  $h$ ;  $S_{N\text{Char}}$  — пакет максимального размера в потоке.

Стохастический параметр  $\Omega_{\max}(i)$  зависит от  $\varepsilon_{\max}(i)$  — абсолютной погрешности разброса  $p_{e,\max}(i)$  от величины  $p_e(i)$ , т.е. вероятности того, что пакет  $i$  потока будет передан, вычисляемой как сумма предельных вероятностей  $p_{i_0,i_1,\dots,i_{N-1},i_N}$ , нахождения СМО в состояниях, при которых пакет (заявка) будет принят к обслуживанию, т.е. передачи.  $\varepsilon_{\max}(i)$  необходима, чтобы  $\Omega_{\max}(i)$  соответствовала худшему случаю.  $\Omega_{\max}(i)$  вычислим:

$$\Omega_{\max}(i) = \lambda_i p_{e,\max}(i) T_h, \quad (8)$$

$$p_{e,\max}(i) = \begin{cases} 1, & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) \geq 1, \\ p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i), & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) < 1; \end{cases} \quad (9)$$

$$p_e(i) = 1 - p_f(i), \quad (10)$$

где  $p_f(i)$  соответствует сумме предельных вероятностей состояний системы  $p_{i_0,i_1,\dots,i_{N-1},i_N}$ , при которых очереди для пакетов  $i$  потока полностью заняты;  $T_h$  — время  $h$  исполнения подрасписания.

Также используется метод Корнфельда для определения величины  $\varepsilon_{\max}(i)$ . Для гарантированно худшего случая  $\varepsilon_{\max}(i) = \sup(1) = 0,9$ .

Важно учесть, что в крайний тайм-слот могла быть начата передача пакета максимального размера, назначенного на предыдущее подрасписание  $h$ . Передача пакета не прерывается. Следовательно, на следующем подрасписании  $h+1$  следует уменьшить свободное время для выдачи пакета:  $T_h = T_h - \max_{u \in I_{ai}^{(h-1)}} (T_{\text{packetPort}}(u))$ .

Кроме того, пакет может быть так велик, что займет целиком чужой тайм-слот, и ожидающий в буфере пакет так и не будет передан. С учетом вышесказанного получим окончательные формулы для  $T_i^{(h)}$ :

$$\forall i \in I_{a_i}^{(h)}, T_i^{(h)} = \begin{cases} \max_{g \in I_{a_i}^{(h)}, g \neq i} (T_{\text{packetPort}}(g)) + T_{\text{packetPort}}(i)z_{\max}(i) + \\ + \sum_{\tau \in hp(i)} T_{\text{packetPort}}(\tau)z_{\max}(\tau) + \\ + \sum_{\gamma \in ep(i)} T_{\text{packetPort}}(\gamma) \min(z_{\max}(i), z_{\max}(\gamma)), \quad \Omega_{\max}(i) \cdot S_{\text{NChar}}(i) \geq 1, \\ T_h, \quad \Omega_{\max}(i) \cdot S_{\text{NChar}}(i) < 1 \wedge z_{\max}(i) > 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\Omega_{\max}(i) = \lambda_i p_{e,\max}(i) \left( T_h - \max_{u \in I_{a_i}^{(h-1)}} (T_{\text{packetPort}}(u)) \right), \quad (12)$$

$$p_{e,\max}(i) = \begin{cases} 1, & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) \geq 1, \\ p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i), & p_e(i) + \varepsilon_{\max}(i) < 1; \end{cases}$$

$$z_{\max}(i) = \sum_{j=1}^{K(i)} j \cdot p_{q,\max}(i, j), \quad (13)$$

$$p_{q,\max}(i, j) = \begin{cases} 1, & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) \geq 1, \\ p_q(i, j) + \zeta(i, j), & p_q(i, j) + \zeta_{\max}(i, j) < 1. \end{cases}$$

На шаге 4 предлагаемого метода оценки корректности ТР вычисляется  $T_{\text{maxPath}}$ . Передача пакетов информационного потока представляется в виде упрощенного конвейерного процесса, в котором время передачи пакета складывается из двух величин: время передачи первого байта пакета через весь маршрут и следующий за ним без промедления оставшейся части пакета, что соответствует червячной маршрутизации. Передача пакета осуществляется с максимальной задержкой — используется „худшее“ время передачи байта пакета через элементы маршрута:

$$T_{\text{maxPath}}(i) = T_{\text{worstVertex}}(i) \cdot (Q_A + S_{\text{NChar}}), \quad (14)$$

$$T_{\text{worstVertex}} = \max(T_{\text{maxSch}}(1), T_{\text{maxSch}}(2), \dots, T_{\text{maxSch}}(a_i), \dots, T_{\text{maxSch}}(Q_A)) / S_{\text{NChar}}, \quad (15)$$

$$T_{\text{maxSch}}(a_i) = \max(T_i^{(1)}, T_i^{(2)}, \dots, T_i^{(h)}, \dots, T_i^{(Q_H)}), \quad (16)$$

где  $T_{\text{worstVertex}}$  — максимальная задержка передачи байта пакета  $i$  потока через элементы сети (худший случай), встречающиеся по маршруту, при рассмотрении подрасписания, вносящего максимальную задержку;  $Q_A$  — число элементов сети на маршруте;  $T_{\text{maxSch}}$  — максимальная задержка при прохождении пакета по расписанию среди  $h$ .

ТР корректна по максимальному времени передачи пакета, если  $T_{\text{maxPath}} \leq T_{\text{req}}$  для потока  $i$ . В некоторых случаях требуется найти величину запаздывания пакета (джиттер). Это можно сделать следующим образом:  $T_{\text{maxPath}} - T_{\text{avgPath}}$ , где  $T_{\text{avgPath}}$  — среднее время передачи пакетов через весь маршрут. Для получения  $T_{\text{avgPath}}$  следует придерживаться рассуждений, как для  $T_{\text{maxPath}}$ , однако с поправкой: брать среднее арифметическое вместо максимума на шагах 3 и 4.

**Вычислительные эксперименты.** Проведены вычислительные эксперименты для оценки адекватности разработанной СМО и предложенного метода оценки корректности таблиц расписаний на компьютерной модели коммутатора SpaceFibre, разработанной на SystemC/C++ с применением Cadence VSP. Модель коммутатора SpaceFibre сконфигурирована таким образом, что приоритеты, ассоциированные с потоками данных, имели фиксированные приоритеты, которые не меняли своего значения, отсутствовали повторяющиеся значения приоритетов. При таких настройках можно пренебречь различием в механизмах управле-

ния потоком и подтверждениями. Поскольку потоки по приоритетам не пересекаются, а подтверждения не образовывали очередей, при такой настройке логика передачи пакетов соответствовала механизмам сети SpaceWire/GigaSpaceWire с транспортным протоколом VM, например, СТП-ИСС. Характеристики потоков приведены в табл. 1. Количество итераций моделирования TP ~15 000.

Таблица 1

Параметры для вычислительных экспериментов	
Параметр	Значение
Число трафиков	8
Размер пакетов, байт	256, 512, 768, 1024, 1280, 1536, 1792, 2048
Периодичность выдачи, мкс	~158,4
Размер таблицы расписаний	15 тайм-слотов
Размер тайм-слота, мкс	65,234375
Скорость в каналах, Гбит/с	1,25

Полученные результаты представлены на рис. 2.

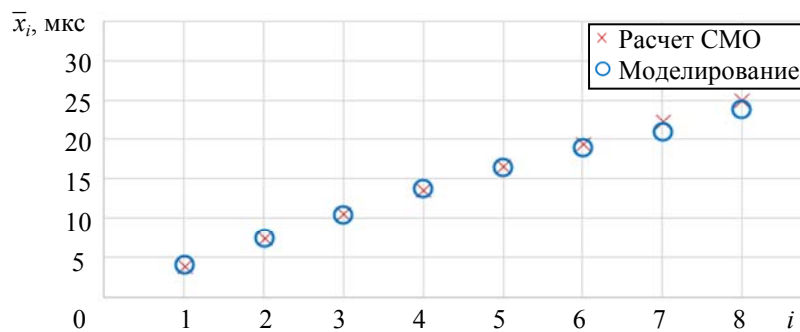


Рис. 2

Относительная погрешность между компьютерным моделированием и расчетами на СМО составила 3,5 %, среднее квадратическое отклонение  $\sigma_i=2,12$  мкс. Полученные результаты позволяют удостовериться, что СМО адекватно описывает процесс приоритетного обслуживания пакетов.

Также проведено моделирование случая одновременного поступления пакетов синхронно-периодических пяти трафиков во входной интерфейс порта, оценивалось максимальное время передачи пакетов по расписанию  $T_{\max\text{Sch}}$ . Вычислена вероятность  $P_{\max}$  того, что время передачи составит  $T_{\max\text{Sch}}$  по формуле:

$$P_{\max}(i) = 1 - F(T_{\max\text{Sch}}, \bar{x}_i, \sigma_i), \quad (17)$$

где  $F$  — функция нормального распределения;  $\bar{x}_i$  — среднее время передачи пакетов по расписанию. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	График				
	1	2	3	4	5
Приоритеты фиксированные, неповторяющиеся	0	1	2	3	4
Размер пакетов, байт	256	2048	256	256	256
Период пакетов, мкс	5000	16000	20000	1500	1000
$T_{\max\text{Sch}}$ , мкс	4,224	78,144	80,256	82,37	84,48
$T_{\max\text{SchSim}}$ , мкс	4,152	71,97	52,83	57,06	61,28
$\bar{x}_i$ , мкс	2,161	33,668	29,745	8,65	12,19
$\sigma_i$ , мкс	0,266	12,211	7,663	1,086	1,087
$P_{\max}(i)$	$4,4 \cdot 10^{-15}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$7,4 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-13}$

Из табл. 2 видно, что для всех трафиков  $T_{\max\text{Sch}} > T_{\max\text{SchSim}}$  ( $T_{\max\text{SchSim}}$  — результат компьютерного моделирования), а  $P_{\max}$  крайне мало и близко к нулю.  $T_{\max\text{Sch}}$ , рассчитанное при помощи метода оценки корректности ТР на основе разработанной СМО, является максимальным временем передачи пакетов по расписанию. Поскольку в дальнейшем при вычислении  $T_{\max\text{Path}}$  используются худшие оценки ( $T_{\max\text{Sch}}$ ), то  $T_{\max\text{Path}}$  не превысит  $T_{\text{req}}$ . Следовательно, данный метод позволяет вычислять действительно максимальное время передачи пакетов по маршруту в сетях SpaceWire, GigaSpaceWire с временным мультиплексированием на транспортном уровне.

**Заключение.** В настоящей работе при решении задачи оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях авионики на основе сетей SpaceWire, GigaSpaceWire с поддержкой протоколов транспортного уровня при временном мультиплексировании: проведен сравнительный анализ подходов, рассмотрены их недостатки, разработан метод оценки корректности таблиц расписаний согласно показателю максимального времени передачи пакетов по маршруту, проведена серия вычислительных экспериментов, позволяющая удостовериться в возможности применения предложенного метода для рассматриваемой задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов В. А., Оводенко А. А., Буков В. Н., Шейнин Ю. Е., Шурман В. А., Боблак И. В. Опыт создания технологии проектирования и производства информационно-вычислительной среды для комплексов авиационного бортового оборудования на основе концепций интегрированности, модульности и необслуживаемости // Вестн. академии военных наук. 2012. № 3(40). С. 132—138.
2. Стратегическая программа исследований и разработок, Технологическая платформа „Авиационная мобильность и авиационные технологии“. Ч. 1. 2015. 155 с.
3. Авакянян А. А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Электронный журнал „Труды МАИ“. 2013. Вып. 65. С. 1—15.
4. Новиков В. М., Платошин Г. А., Шейнин Ю. Е. Особенности применения интерфейса SpaceWire в комплексах бортового оборудования // Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. 2018. Вып. 7(40). С. 41—55.
5. Озеров Е. В., Савченко А. Ю., Кривцов В. А. Сетевые протоколы, применяемые в системах бортового оборудования летательных аппаратов // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Сб. докл. VI МНПК „АБИАТОР“. 2019. С. 192—194.
6. Яблоков Е. Н., Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А., Солохина Т. В., Глушков А. В., Алексеев И. Н. Гигабитные каналы в сетях SpaceWire // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 1, № 2. С. 24—36.
7. Gibson D., Parkes S., McClements C., Mills Gibson S. SpaceWire-D prototype and demonstration system: Networks & protocols, long paper // 2016 Intern. SpaceWire Conf. 2016. P. 298—304.
8. Parkes S., Ferrer A. SpaceNet – SpaceWire-T initial protocol definition (A3.1). Dundee, 2009. 83 p.
9. Freeman R. L. Fundamentals of telecommunications. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 704 p.
10. Knudsen P., Madsen J. Integrating communication protocol selection with hardware/software codesign // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1999. Vol. 18, N 8. P. 1077—1095.
11. Renner F.-M. Automated Communication Synthesis for Architecture-Precise Rapid Prototyping of Real-Time Embedded Systems // Proceedings of the International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP-2000). February 2000. P. 154—159. DOI:10.1109/IWRSP.2000.855215.
12. 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.
13. Yablokov E. N. Application of queueing theory to the analysis of GigaSpaceWire protocol // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication (WECONF). 2020. P. 9131460.
14. Яблоков Е. Н. Методы исследования и разработки сетевых контроллеров канального уровня для высокоскоростных бортовых вычислительных сетей аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2018. 140 с.



15. TTEPlan, TTEthernet/AFDX® network planning tool [Электронный ресурс]: <<https://www.tttech.com/products/products/aerospace/development-test-vv/development-tools/tte-plan>>.
16. Буздалов Д. В., Зеленов С. В., Корныхин Е. В., Петренко А. К., Страх А. В., Угненко А. А., Хорошилов А. В. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, № 1. С. 201—230.
17. Jianru H., Xiaomin C., Huixi S. An OPNET Model of SpaceWire and Validation // Proc. 2012 Intern. Conf. on Electronics, Communications and Control. Zhoushan, 2012. P. 792—795.
18. Leeuwen B., Eldridge J., Leemaster J. SpaceWire Model Development Technology for Satellite Architecture // Sandia Report, Sandia National Laboratories. 2011. 30 p.
19. Mirabilis Design, Mirabilis VisualSim data sheet. 2003. 4 p.
20. Leoni A., Nannipieri P., Davalle D. et al. SHINe: Simulator for Satellite on-Board High-Speed Networks Featuring SpaceFibre and SpaceWire Protocols // Aerospace. 2019. Vol. 6, N 4. 43 p.
21. Dellandrea B., Gouin B., Parkes S., Jameux D. MOST: Modeling of SpaceWire & SpaceFibre Traffic-Applications and Operations: On-Board Segment // Proc. of DASIA 2014 Conf. Warsaw, 2014.
22. Schmitt J., Bondorf S., Poe W. Y. The Sensor Network Calculus as Key to the Design of Wireless Sensor Network with Predictable Performance // Sensor and Actuator Networks. 2017. Vol. 6. P. 21—30.
23. Dang D.-H., Ahlem M. Timing Analysis of TDMA-based Networks using Network Calculus and Integer Linear Programming // IEEE 22nd Intern. Symp. on Modelling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems. 2014. P. 21—30.
24. Homomenko A. D., Starobinets D. Y., Lohvitskiy V. A. Model for assessing operational efficiency of the on-board control complex for spacecraft for remote sensing of Earth // St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences. 2016. N 3(46). P. 49—64.
25. Korobkov I. L. Queuing system for the SpaceFibre standard // Proc. of 22th Conf. of FRUCT association. 2018. P. 79—87.
26. Sadowsky J. S., Szpankowski W. Maximum queue length and waiting time revisited. Purdue: Department of computer science, 1991. 17 p.
27. Taylor J. R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements University Science Books. 1997. 327 p.

#### Сведения об авторе

**Илья Леонидович Коробков** — магистр; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; соискатель; E-mail: [ilya.korobkov.l@gmail.com](mailto:ilya.korobkov.l@gmail.com)

Поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 03.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

#### REFERENCES

1. Chernyshov V.A., Ovodenko A.A., Bykov V.N., Sheynin Y.E., Shurman V.A., Boblak I.V. *Proc. of Academy of Military Sciences*, 2012, no. 3(40), pp. 132–138. (in Russ.)
2. *Strategicheskaya programma issledovaniy i razrabotok, Tekhnologicheskaya platforma "Aviatsionnaya mobil'nost' i aviatsionnyye tekhnologii"* (Strategic Research and Development Program, Technological Platform "Air Mobility and Aviation Technologies"), Pt. 1, 2015, 155 p. (in Russ.)
3. Avakanyan A.A. *Electronic journal "Proceedings of MAI"*, 2013, is. 65, pp. 1–15. (in Russ.)
4. Novikov V.M., Platoshin G.A., Sheynin Y.E. *Proceedings of GosNIIAS. Avionics issues*, 2018, no. 7(40), pp. 41–55. (in Russ.)
5. Ozerov E.V., Savchenko A.Y., Krivtsov V.A. *Aktual'nyye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivaniye, razrabotki* (Actual Research Issues in Avionics: Theory, Maintenance, Development), Proc. of VI ISPC "AVIATOR", 2019, pp. 192–194. (in Russ.)
6. Yablokov E.N., Sheynin Y.E., Suvorova E.A., Solohina T.V., Glushkov A.V., Alekseev I.N. *Questions of Radio Electronics*, 2012, no. 2(1), pp. 24–36. (in Russ.)
7. Gibson D., Parkes S., McClements C., Mills Gibson S. *2016 International SpaceWire Conference*, 2016, pp. 298–304.
8. Parkes S., Ferrer A. *SpaceNet - SpaceWire-T initial protocol definition (A3.1)*, Dundee, 2009, 83 p.
9. Freeman R.L. *Fundamentals of telecommunications*, Wiley, John Wiley & Sons, Inc., 2013, 704 p.
10. Knudsen P., Madsen J. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999, no. 8(18), pp. 1077–1095.
11. Renner F.-M. *Proceedings of the International Workshop on Rapid System Prototyping*, 2000, pp. 154–159.

- DOI:10.1109/IWRSP.2000.855215.
12. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. *Infocommunication technologies*, 2013, no. 3(11), pp. 34–39.
  13. Yablokov E.N. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication*, (WECONF), 2020, p. 9131460.
  14. Yablokov E.N. *Metody issledovaniya i razrabotki setevykh kontrollerov kanal'nogo urovnya dlya vysokoskorostnykh bortovykh vychislitel'nykh setey apparatov* (Research and Development Methods for Network Data Link Controllers for High-Speed On-Board Computer Networks), Extended abstract of candidate's thesis, St. Petersburg, 2018, 140 p. (in Russ.)
  15. *TTEPlan*, TTEthernet/AFDX network planning tool, <https://www.tttech.com/products/products/aerospace/development-test-vv/development-tools/tte-plan>.
  16. Buzdalov D.V., Zelenov S.V., Kornukhin E.V., Petrenko A.K., Strakh A.V., Ugnenko A.A., Khoroshilov A.V. *Proc. of the Institute for System Programming of the RAS*, 2014, no. 1(26), pp. 201–230. (in Russ.)
  17. Jianru H., Xiaomin C., Huixi S. *Proc. 2012 International Conference on Electronics, Communications and Control*, Zhoushan, 2012, pp. 792–795.
  18. Leeuwen B., Eldridge J., Leemaster J. *SpaceWire Model Development Technology for Satellite Architecture*, Sandia Report, Sandia National Laboratories, 2011, 30 p.
  19. *Mirabilis Design, Mirabilis VisualSim data sheet*, 2003, 4 p.
  20. Leoni A., Nannipieri P., Davalle D. et al. *Aerospace*, 2019, no. 4(6), pp. 43.
  21. Dellandrea B., Gouin B., Parkes S., Jameux D. *Proceedings of DASIA 2014 conference*, Warsaw, 2014.
  22. Schmitt J., Bondorf S., Poe W.Y. *Sensor and Actuator Networks*, 2017, vol. 6, pp. 21–30.
  23. Dang D.-H., Ahlem M. *IEEE 22nd International Symposium on Modelling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2014, pp. 21–30.
  24. Homonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lohvitsky V.A. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2016, no. 3(46), pp. 49–64. (in Russ.)
  25. Korobkov I.L. *Proc. of 22th conference of FRUCT association*, 2018, pp. 79–87.
  26. Sadowsky J.S., Szpankowski W. *Maximum queue length and waiting time revisited*, Purdue, Department of computer science, 1991, 17 p.
  27. Taylor J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements University Science Book*, 1997, 327 p.

**Data on author**

**Ilya L. Korobkov** — MSc; ITMO University, Faculty of Secure Information Technologies; PhD Student;  
E-mail: [ilya.korobkov.l@gmail.com](mailto:ilya.korobkov.l@gmail.com)

The article was submitted 12.11.2021; approved after reviewing 03.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.