

ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО / TECHNOLOGIES AND PRODUCTION

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-44-53

УДК 004.942

Метод планирования канальных ресурсов в бортовых сетях SpaceWire с технологией TDMA

И.Л. Коробков¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлен новый метод планирования канальных ресурсов в бортовых сетях SpaceWire с поддержкой технологии TDMA. Рассмотрены особенности сети на основе сетевого стандарта SpaceWire и транспортного протокола СТП-ИСС, предоставляющего технологию TDMA в виде механизма «Планирование». Данный механизм применяется в сетях с целью обеспечения детерминизма, разрешения конфликтов и блокировок при попытке одновременно двум или более устройствам передавать данные, занимая ограниченный канальный ресурс. Проведен сравнительный анализ существующих методов и алгоритмов планирования канальных ресурсов для построения таблицы расписания. Обоснован и представлен новый метод планирования канальных ресурсов в бортовых сетях SpaceWire. Проведена оценка производительности, демонстрирующая эффективность разработанного метода на значимых для космической отрасли параметрах.

Ключевые слова: бортовые сети, SpaceWire, СТП-ИСС, планирование, канальные ресурсы, построение расписания

Для цитирования:

Коробков И.Л. Метод планирования канальных ресурсов в бортовых сетях SpaceWire с технологией TDMA // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 4. С. 44–53. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-44-53

© Коробков И.Л., 2019



Method of scheduling channel resources for onboard SpaceWire networks with TDMA

I. L. Korobkov¹

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

The article presents a new method for scheduling channel resources in SpaceWire onboard networks with support for TDMA technology. The network features based on the SpaceWire network standard and the STP-ISS transport protocol, which provides TDMA technology in the form of the «Scheduling» mechanism, were considered. This mechanism is used in networks with the goal of providing determinism, resolving conflicts and blocks when two or more devices are simultaneously trying to transmit data, occupying a limited channel resource. A comparative analysis of existing methods and algorithms for scheduling channel resources to design a schedule table was conducted. A new method of scheduling channel resources in SpaceWire onboard networks was presented and substantiated. A performance evaluation was carried out using the parameters significant for the space industry. It demonstrates the effectiveness of the developed method.

Keywords: onboard networks, SpaceWire, STP-ISS, channel resources, scheduling, schedule table

For citation:

Korobkov I.L. Method of scheduling channel resources for onboard SpaceWire networks with TDMA. Radio industry (Russia), 2019, vol. 29, no. 4, pp. 44–53. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-4-44-53

Введение

При разработке современных и перспективных космических аппаратов задача планирования канальных ресурсов в бортовых компьютерных сетях (далее – бортовые вычислительные сети, БВС) космических аппаратов (КА) является одной из ключевых. С помощью технологии TDMA можно упорядочить информационные потоки в сети, избежать конфликтов при одновременном использовании ограниченных канальных ресурсов сети, а также в значительной степени обеспечить гарантированные задержки доставки данных в БВС КА. Для решения данного класса задач предназначены методы планирования канальных ресурсов в сетях. Планирование особенно актуально для бортовых сетей на основе стандарта SpaceWire [1], позволяющего строить сети из десятков и сотен узлов. Более подробно бортовая сеть на основе SpaceWire рассмотрена ниже.

Бортовая сеть SpaceWire

SpaceWire – это международный стандарт, описывающий построение бортовых сетей передачи, обработки данных и управления информацией на борту летательных и космических аппаратов. Интерфейс SpaceWire позволяет не только доставлять к центральному вычислительному ресурсу множественные потоки информации, но и по тем же каналам управлять работой датчиков – настраивать режимы и параметры функционирования, запускать диагностику и т.п. С помощью механизмов

распространения кодов времени (тайм-кодов) в сети SpaceWire можно синхронизировать работу датчиков в реальном масштабе времени с точностью до долей микросекунд – синхронизировать их таймеры, синхронно получать информацию по единому сигналу управления и т.п. [2]. Особенности SpaceWire подробнее рассмотрены, например, в [3]. Технологию SpaceWire активно применяют в European Space Agency (ESA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Canadian Space Agency (CSA) и China National Space Administration (CNSA) [4]. В России проводятся активные работы по внедрению SpaceWire [4, 5].

Для сети SpaceWire разработаны механизмы «Планирование», реализованные в SpaceWire-ориентированных протоколах: SpaceWire-RT [6], SpaceWire-T [7], SpaceWire-D [8], СТП-ИСС [9]. Все они основаны на общей идее разделения пропускной способности каналов с помощью кодов времени на серии временных интервалов (тайм-слотов). В настоящей статье более подробно рассматривается протокол СТП-ИСС, поскольку он обладает рядом ключевых особенностей для применения в БВС КА.

Транспортный протокол СТП-ИСС

Передача данных по транспортному протоколу СТП-ИСС возможна как с установкой соединения, так и без нее. Протокол поддерживает механизмы обеспечения качества сервиса (Quality of Service, QoS):

«С приоритетом», «Гарантированная доставка данных», «Негарантированная доставка данных» и «Планирование». На передающей стороне протокола предусмотрен отдельный логический буфер для каждого из трех типов передаваемых данных: команды управления, срочные сообщения, обычные сообщения. На приемной стороне протокола – два буфера: для передачи данных без и с установкой соединения. Подробнее об СТП-ИСС написано в [9]. Особенности механизма «Планирование» представлены ниже.

Механизм «Планирование» СТП-ИСС

Для всей сети SpaceWire создается единое расписание. Оно регламентирует передачу данных для каждого узла в заданные для него временные интервалы (рис. 1).

Расписание и длительность временного интервала задаются на этапе конфигурации и хранятся в каждом узле сети. Таймер временного интервала (T_{TS}) используется для отсчета времени до окончания текущего временного интервала на локальном узле. Эпоха состоит из определенного количества временных интервалов. Таблица расписания описывает одну эпоху. Узел имеет право отправлять данные только в течение временных интервалов, в которые для этого узла запланирована отправка. В конце временного интервала узел, отправляющий пакет, должен остановить передачу данных только после того, как завершится передача текущего пакета. Если на передающей стороне есть данные для передачи, но узлу не разрешено отправлять данные в текущий временной интервал, то узел должен ожидать наступления следующего временного интервала.

В связи с тем, что в открытых источниках и в спецификации протокола СТП-ИСС не описан метод планирования канальных ресурсов для построения таблицы расписания СТП-ИСС, актуальной задачей является сравнительный анализ существующих

методов и алгоритмов, выбор одного из них и адаптация его к представленным выше особенностям протокола СТП-ИСС с учетом специфики БВС КА.

Сравнительный анализ существующих методов и алгоритмов планирования

Известны следующие алгоритмы и методы планирования канальных ресурсов для сети SpaceWire: «Циклическое планирование Round Robin» [10], «Эвристическая раскраска графа» [11, 12], «Ликвидное построение расписания» [13], «Генетический алгоритм» (ГА) [14]. Также известным алгоритмом является «Обслуживание в заданные сроки» [15].

Учитывая специфику функционирования БВС и информационных обменов, значимым является построение такого расписания, которое учитывало бы следующее:

- порядок выдачи пакетов с узлов;
- возможность выдачи подряд серии однотипных пакетов (далее – пачка);
- приоритеты отправки пакетов на транспортном уровне;
- наличие пакетов подтверждения и/или ответных пакетов в сети;
- наличие в сети трафиков, для которых не обеспечивается (отсутствует или выключен) механизм «Планирование»;
- максимально допустимые задержки передачи пакетов.

В табл. 1 приведены результаты сравнения рассмотренных выше методов и алгоритмов планирования канальных ресурсов.

Как видно из приведенного выше сравнения, на данный момент отсутствует метод, позволяющий выполнить планирование канальных ресурсов с учетом всех параметров, значимых для БВС КА, и учитывающий специфику СТП-ИСС. В связи

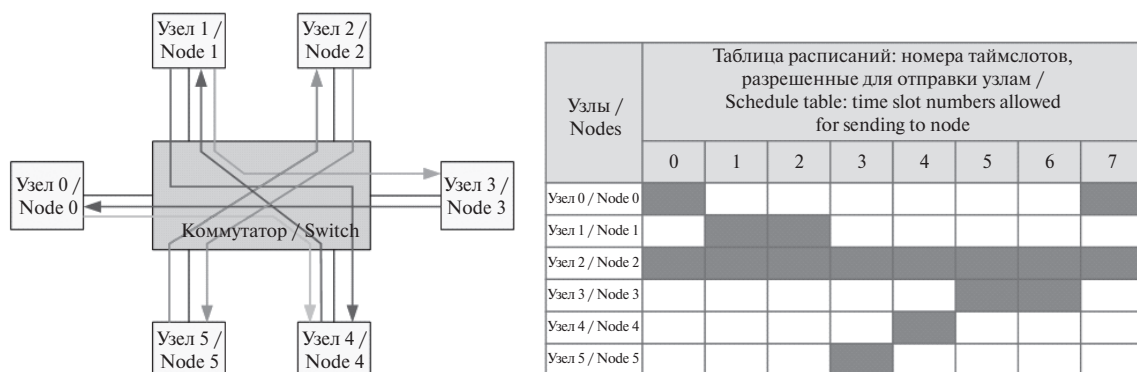


Рисунок 1. Пример потоков в сети и таблицы расписания
Figure 1. Network flows and schedule tables example

Таблица 1. Результаты сравнения методов и алгоритмов планирования канальных ресурсов
Table 1. Comparison results of channel resource planning methods and algorithms

Алгоритмы и методы / Algorithms and methods	Достоинства / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Циклическое планирование	Простота реализации; отсутствие ограничений, свойственных ликвидному алгоритму	Нельзя получить оптимальную таблицу расписания, не все значимые параметры учитываются при построении расписания
Ликвидное построение расписания	Оптимальное использование узких мест сети; суммарная пропускная способность в 2 раза больше, чем в циклическом планировании; предсказуемые задержки	Сложность реализации; ограничения по применению – необходима предварительная проверка топологии сети на возможность создания ликвидного расписания, не все значимые параметры учитываются при построении расписания
Эвристическая раскраска графа	Использование узких мест в сети, отсутствие ограничений на топологию сети	Сложность в реализации, не все значимые параметры учитываются при построении расписания
Обслуживание в заданные сроки	Метод строит допустимое расписание, если оно возможно (имеется функция проверки возможности построить расписание); является полиномиальным алгоритмом ($O(n \log n)$)	Метод строит расписание для фиксированного набора работ, не учитывая их цикличность; не все значимые параметры учитываются при построении расписания
Генетический алгоритм	Гибкость – при построении расписания могут быть учтены все значимые параметры; поиск в эффективных областях решений; возможность распараллеливания; отсутствие ограничений, свойственных ликвидному алгоритму	Временная сложность выполнения генетического алгоритма может зависеть от временной сложности функции пригодности и операторов генетического алгоритма; скорость поиска решения зависит от операторов генетического алгоритма.

с этим была выполнена разработка такого метода. В методе использованы наиболее подходящие концепции существующих методов и алгоритмов: функции проверки возможности построения расписания на основе идей «Ликвидного планирования», а также концепция «Генетического алгоритма», связанная с итеративным поиском.

Новый метод планирования канальных ресурсов в бортовой сети SpaceWire

Разработанный метод планирования канальных ресурсов строит такое расписание, при котором время доставки всех пакетов всех трафиков не превышает максимально допустимую задержку, заданную пользователем для каждого трафика. Если достичь такого результата невозможно, то формируются рекомендации по корректировке входных данных, которые затем выдаются пользователю. При этом учитывается наличие в сети пакетов подтверждения, а также трафиков с выключенным или отсутствующим механизмом «Планирование».

Входными параметрами для метода являются:

- параметры трафиков: маршрут передачи, размер пакета, период генерации, гарантированная/негарантированная доставка, допустимая задержка пакета, допустимая задержка пакета подтверждения, степень значимости трафика (критически значимый или нет), порядок выдачи пакетов между трафиками;
- максимальное количество таймслотов;
- максимальная длительность: одной эпохи и одного таймслота;
- шаг времени между таймслотами;
- максимальная загрузка каналов в процентах;
- запас размера пакета.

В общем случае метод построения таблицы расписания можно представить в виде последовательности выполнения следующих шагов:

1. Загрузка и проверка корректности входных данных:

- загрузка всех входных данных и проверка их корректности. Если есть некорректные входные данные, то осуществляется переход к шагу 7;

- формирование ответных трафиков – трафиков пакетов подтверждений СТП-ИСС;
- определение маршрутов для каждого трафика на основании таблиц маршрутизации коммутаторов;
- формирование групп трафиков на основании заданной очередности выдачи пакетов;
- корректировка скоростей каналов и размеров пакетов с учетом макс. загрузки каналов и запаса размера пакетов.

Если есть некорректные входные данные, то осуществляется переход к шагу 7.

2. Проверка принципиальной возможности передачи пакетов с максимально допустимыми задержками:

- вычисляются минимальные задержки передачи каждого пакета каждого трафика по маршруту;
- проверяется наличие у устройств и каналов сети достаточных технических характеристик для передачи пакетов с максимальной допустимой задержкой. Сравниваются минимальные и максимальные допустимые задержки передачи пакетов. Если недостаточно, то осуществляется переход к шагу 7.

3. Определение длительности эпохи и временных интервалов:

- вычисляются длительности эпохи для обеспечения периодичности трафиков с учетом шага времени между временными интервалами;
- проверяется наличие в сети трафиков, периоды которых не позволяют рассчитать длительность одной эпохи, чтобы она была меньше заданной максимальной длительности эпохи. Если такие имеются, то осуществляется переход к шагу 7;
- вычисляется длительность временных интервалов с учетом рассчитанной длительности эпохи.

4. Проверка пропускной способности сети: достаточна ли она, чтобы передать все пакеты трафиков за время одной рассчитанной эпохи:

- вычисляется интенсивность поступления пакетов от всех трафиков за одну эпоху для каждого порта в узлах и коммутаторах;
- вычисляется максимальная интенсивность обслуживания пакетов всех трафиков с учетом тактов работы узлов и коммутаторов за одну эпоху;
- сравниваются интенсивности поступления пакетов с максимальными интенсивностями обслуживания пакетов для каждого порта в коммутаторах и узлах. Если интенсивность поступления

пакетов превышает интенсивность обслуживания, то осуществляется переход к шагу 7.

5. Проверка необходимости планирования трафиков:

- для каждого трафика происходит поиск конфликтов между рассматриваемым трафиком и другими трафиками за доступ к порту одного из устройств на маршруте рассматриваемого трафика;
- определяется худшее время доставки пакета по маршруту;
- выполняется распределение трафиков на те, у которых худшее время доставки превышает максимально допустимое (значит, их нужно планировать во времени), и те, у которых не превышает.

6. Планирование. В основе планирования трафиков и построения расписания лежит концепция ГА и поиска с возвратом, состоящая в том, что происходит итеративный процесс разрешения всех ранее найденных конфликтов. Для этого определяется расстановка начальных моментов генерации пакетов трафиков, предварительно вычисляется нижняя и верхняя граница расстановок, вовлеченных в конфликт или могущих оказать на него влияние. При этом учитывается очередность трафиков, заданная пользователем. От этой расстановки происходит расчет и планирование передачи пакетов во времени по сети с учетом пакетов подтверждения. Также принимается во внимание наличие приоритетов у пакетов при отправке с узла. Для этого выполняется корректировка расчета, чтобы учесть, что, например, обычный пакет СТП-ИСС будет отправлен только после ухода с узла более высокоприоритетного пакета подтверждения, команды управления или срочного пакета. Полученный расчет оценивается. Если по результатам оценки конфликты отсутствуют, выполняется очередность трафиков и время доставки пакетов укладывается в максимально допустимое, то решение найдено – на основании расчета формируется таблица расписания для каждого узла с включенным механизмом «Планирование». Если не все конфликты были разрешены, время доставки пакетов превышало максимально допустимое, не выполнялась очередность хотя бы одного трафика или пакет одного из трафиков уходил за рассчитанную эпоху, то происходит модификация расстановки и расчет выполняется заново. При невозможности определить такую расстановку трафиков, которая давала бы решение, выдается сообщение с рекомендациями по корректировке настроек трафиков, узлов, коммутаторов и других входных параметров.

7. Вывод результатов работы: рекомендаций, таблицы расписаний, длительности рассчитанной эпохи и др.

Оценка производительности

На основании предложенного метода планирования канальных ресурсов в бортовой сети SpaceWire было разработано программное обеспечение на Qt/C++. Для оценки производительности и демонстрации работоспособности была проведена серия вычислительных экспериментов. Топология сети (рис. 2) и параметры трафиков, взятые для исследования, основываются на параметрах, значимых для космической отрасли и опубликованных в открытой печати [16], а также материалах проекта САПР [17].

Оценивалось время построения расписания. Оценка производилась в зависимости от размера таблицы расписания и количества трафиков, участвующих в построении. Исследование проводилось на компьютере со следующими характеристиками: Windows 10 x64; процессор IntelCore i52.5Гц; ОЗУ 8 ГБ; жесткий диск SSD256 ГБ. Параметры трафиков и направления передачи данных приведены в табл. 2.

Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Получены первые результаты оценки производительности разработанного метода. Из рис. 3 и 4 видно, что с увеличением размера таблицы расписания и количества трафиков увеличивается и время выполнения программы. При этом имеет место неярко выраженный полиномиальный рост

временной сложности на первых десяти трафиках, переходящий затем в линейную тенденцию с флуктуациями (см. рис. 4). Это связано с тем, что после первого десятка перестановок трафиков может быть найдено приемлемое расписание. В результате расписание определяется за достаточно короткое время. Нельзя исключать, что в худшем случае может потребоваться длительный поиск расписания. В этом случае характер временной сложности будет приближаться к экспоненциальному росту, что является частым случаем для NP-трудных задач построения расписания. При таком сценарии программа может быть остановлена. Имеется возможность добавить вывод пользователю последнего наилучшего рассмотренного расписания с рекомендациями по корректировке параметров трафиков. Этого в большинстве случаев может быть достаточно для внесения необходимых корректировок во входные параметры, после чего расписание будет найдено за приемлемое время. Схожий подход был применен при создании системы построения расписаний в Институте системного программирования РАН [18]. Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что для практически значимых задач временные затраты реализованного алгоритма являются приемлемыми.

Выводы

В данной работе при решении задачи планирования канальных ресурсов в бортовой сети SpaceWire с технологией TDMA, представленной механизмом «Планирование» транспортного протокола

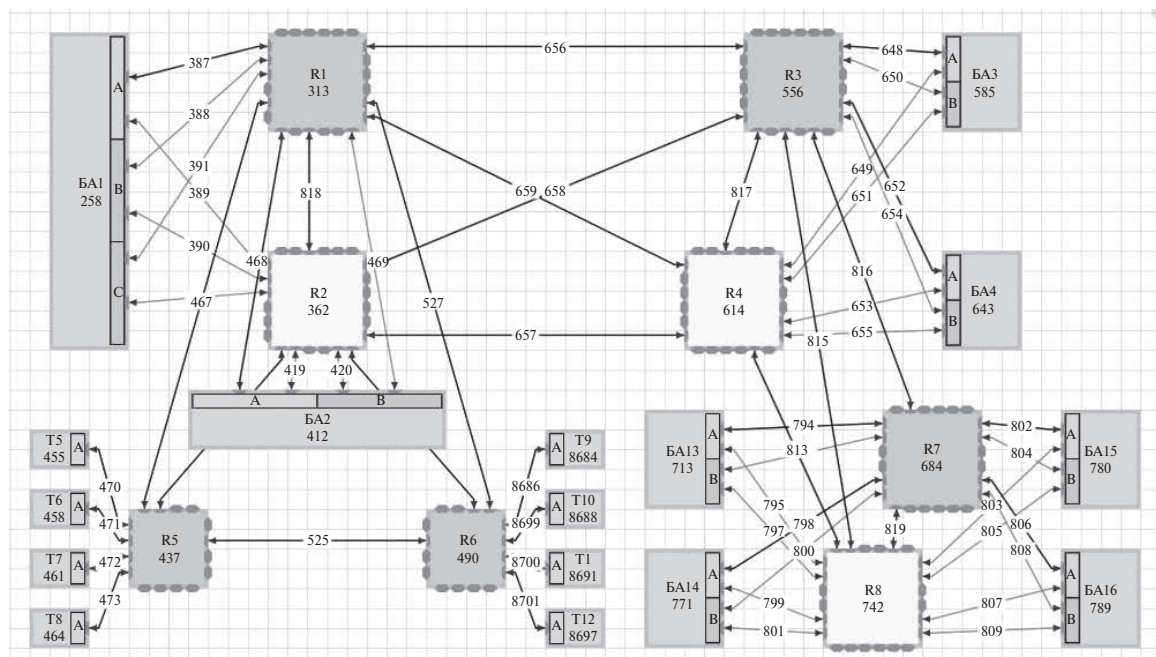


Рисунок 2. Топология сети для оценки производительности
Figure 2. Network topology for performance measurement

Таблица 2. Параметры для оценки производительности
Table 2. Parameters for evaluating the performance

Тип пакета / Package type	Идентификатор узла отправителя / Sender node ID	Идентификатор узла получателя / Recipient node ID	Размер пакета, байт / Packet size, bytes	Период выдачи пакетов, мс / Packet delivery period, ms	Макс. допустимая задержка, мс / Max. allowable delay, ms	Подтверждения / Confirmations
Срочный	258	412	256	50	2	Нет
Обычный	258	585	1024	50	5	Нет
КУ	412	258	19	1	0,7	Да
АСК	412	258	19	1	0,7	Нет
КУ	412	585	19	1	0,7	Да
АСК	412	585	19	1	0,7	Нет
КУ	455	412	19	200	5	Нет
КУ	458	412	19	200	5	Нет
КУ	461	412	19	200	5	Нет
КУ	464	412	19	200	5	Нет
КУ	585	643	19	1	1,3	Нет
Обычный	585	643	1024	50	5	Нет
Обычный	585	412	1024	50	5	Нет
Срочный	643	585	256	50	5	Нет
Срочный	643	258	256	50	5	Нет
Срочный	643	412	256	50	5	Нет
Обычный	713	643	1024	50	5	Нет
Обычный	771	643	1024	50	5	Нет
Обычный	780	643	1024	50	5	Нет
Обычный	789	643	1024	50	5	Нет
КУ	8684	412	19	200	5	Нет
КУ	8688	412	19	200	5	Нет
КУ	8691	412	19	200	5	Нет
КУ	8697	412	19	200	5	Нет

СТП-ИСС, были получены следующие результаты: обоснован и разработан новый метод планирования канальных ресурсов в бортовой сети SpaceWire; разработано программное обеспечение формирования таблиц расписания. При невозможности построить расписание выдаются рекомендации для корректировки входных параметров и последнее рассмотренное расписание; проведена временная оценка производительности разработанного

программного обеспечения, демонстрирующая эффективность предложенного метода планирования канальных ресурсов на значимых для космической отрасли параметрах. Разработанный метод планирования ресурсов в бортовой сети SpaceWire может быть применен для построения расписаний не только для СТП-ИСС, но и для других протоколов со схожими механизмами «Планирование», например, SpaceWire-D и др.

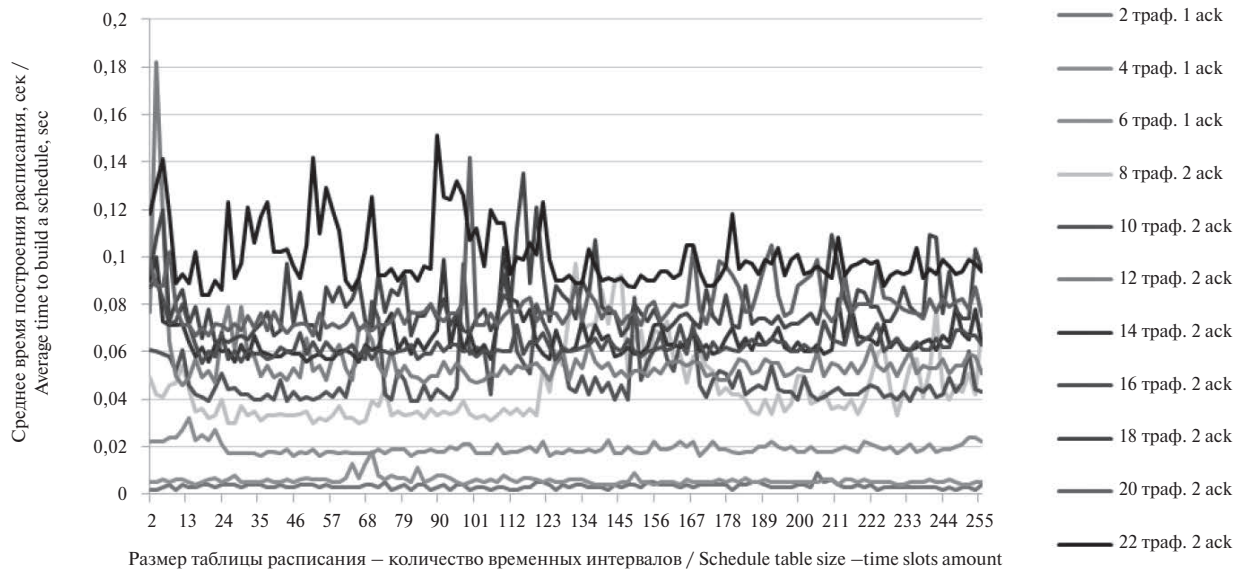


Рисунок 3. Зависимость между временем выполнения и размером таблицы расписания
 Figure 3. Relationship between the runtime and schedule table size

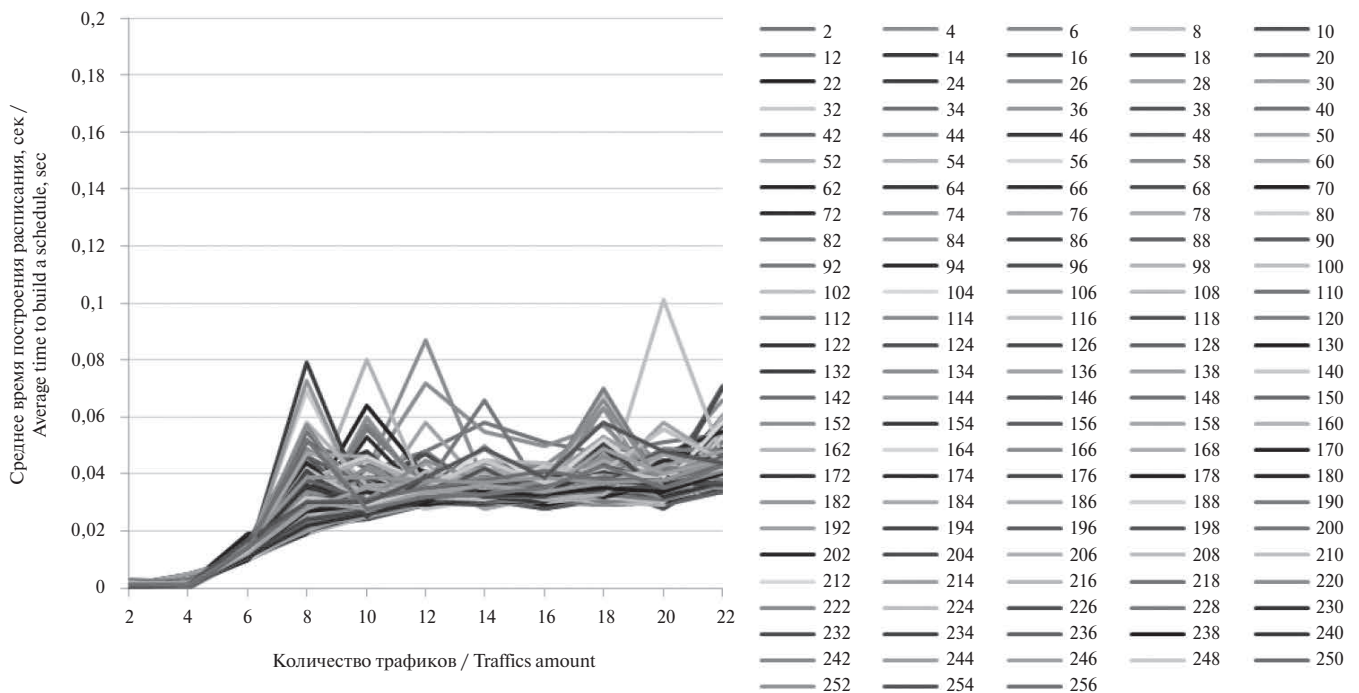


Рисунок 4. Зависимость между временем выполнения и количеством трафиков
 Figure 4. Relationship between the runtime and traffics amount

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование получило финансирование от Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части федерального задания по контракту № 8.4048.2017/4.6 от 31.05.2017.

ACKNOWLEDGMENT

The study received funding from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the design part of the federal assignment under contract No. 8.4048.2017/4.6 dated 05/31/2017.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *ECSS-E-ST-50-12C*. Space engineering SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. Noordwijk. ESA Requirements and Standards Division ESTEC, 2008, 137 p.
2. Тюнягин Д.В. Распределенная система управления легких космических аппаратов, построенная на базе технологий «Система на кристалле» и SpaceWire // Вестник СибГАУ. 2009. № 2. С. 182–187.
3. Иванов М.А., Кириллов К.Ю. Бортовой комплекс управления для искусственного спутника Луны // Исследования наукограда. 2014. № 1 (7). С. 4–11.
4. Ханов В.Х. Сетевые технологии для бортовых систем космического аппарата: опыт разработки // Доклады ТУСУР. 2014. № 2 (32). С. 287–293.
5. Тульский И.Н. Применение SpaceWire в экспериментальном бортовом приборе космического аппарата «Глонасс-GPS» для улучшения динамических характеристик // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. С. 196–197.
6. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceNet – SpaceWire-RT Initial Protocol Definition (A2.1). Dundee. Space Technology Centre, 2008, 120 p.
7. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceNet – SpaceWire-T Initial Protocol Definition (A3.1), Dundee, Space Technology Centre, 2009, 83 p.
8. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceWire-D – Deterministic Control and Data Delivery Over SpaceWire Networks (B). Dundee. Space Technology Centre, 2010, 20 p.
9. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire / Ю.Е. Шейнин, В.Л. Оленев, И.Я. Лавровская, Д.В. Дымов, С.Г. Кочура // Исследования наукограда. 2016. № 1–2 (16). С. 21–30.
10. Абрамов А.Д. Программное обеспечение автоматизированного формирования информационно-логической конфигурации распределенной вычислительной сети // Научная сессия ГУАП. Сб. докладов. Ч. I. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2012. С. 58–61.
11. Marx A. D. Graph colorings problems and their applications in scheduling. Periodica Polytechnica, Electrical Engineering, 2004, no. 48, pp. 11–16.
12. Разживин Д.Б. Эффективное использование полосы пропускания в сетях с временным мультиплексированием // Научная сессия ГУАП. Сб. докладов. Ч. I. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2012. С. 109–111.
13. Gabrielyan E., Hersch R. D. Efficient Liquid Schedule Search Strategies for Collective Communications. Published in ICON2004. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Networks. Singapore, 2004, Vol. 2, pp. 760–766. DOI: 10.1109/ICON.2004.1409279.
14. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 159 с.
15. Танаев В.С., Гордон В.В., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. М.: Наука, 1984. 384 С.
16. Коробков И., Лавровская И., Оленев В. Анализ транспортных протоколов для бортовых сетей SpaceWire на соответствие современным требованиям российской космической промышленности // Научная сессия ГУАП. Сб. докладов. Ч. I. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2014. С. 87–92.
17. Sheynin Y., Olenov V., Korobkov I., Lavrovskaya I., Kurbanov L., Dymov D. Computer-Aided Design System for Onboard SpaceWire Networks. In: Proceedings of 8th International SpaceWire Conference 2018 (ISC2018). USA, Los Angeles, 2018, pp. 220–227.
18. Третьяков А. Автоматизация построения расписаний для периодических систем реального времени // Труды Института системного программирования РАН. 2012. Т. 22. С. 375–400.

REFERENCES

1. *ECSS-E-ST-50-12C*. Space engineering SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. Noordwijk. ESA Requirements and Standards Division ESTEC, 2008, 137 p.
2. Tyunyagin D. V. Distributed control system for light spacecraft based on the «System on a Chip» and SpaceWire technologies. *Vestnik SibGAU*, 2009, no. 2, pp. 182–187. (In Russian).
3. Ivanov M. A., Kirillov K. Yu. Onboard control system for moon artificial satellite. *Issledovaniya naukograda*, 2014, no. 1 (7), pp. 4–11. (In Russian).
4. Khanov V. Kh. Network technologies for on-board systems spacecraft: development experience. *Doklady TUSUR*, 2014, no. 2 (32), pp. 287–293. (In Russian).
5. Tulsii I. N. Space Wire application in experimental onboard instrument satellites to handle precision basic generator «Glonass-GPS». *Reshetnevskie chteniya*, 2012, vol. 1, pp. 196–197. (In Russian).
6. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceNet – SpaceWire-RT Initial Protocol Definition (A2.1). Dundee. Space Technology Centre, 2008, 120 p.
7. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceNet – SpaceWire-T Initial Protocol Definition (A3.1), Dundee, Space Technology Centre, 2009, 83 p.
8. Parkes S. M., Ferrer-Florit A. SpaceWire-D – Deterministic Control and Data Delivery Over SpaceWire Networks (B). Dundee. Space Technology Centre, 2010, 20 p.
9. Sheinin Yu. E., Olenov V. L., Lavrovskaya I. Ya., Dymov D. V., Kochura S. G. Development, analysis and modeling of STP-ISS transport protocol for spacewire onboard networks. *Issledovaniya naukograda*, 2016, no. 1–2 (16), pp. 21–30. (In Russian).
10. Abramov A. D. Programnoe obespechenie avtomatizirovannogo formirovaniya informatsionno-logicheskoi konfiguratsii raspredelennoi vychislitel'noi seti. In: *Nauchnaya sessiya GUAP. Sbornik dokladov. Ch. I. Tekhnicheskie nauki* [Scientific session of SUAI. Collection of reports. Part I. Engineering]. St. Petersburg, GUAP Publ., 2012, pp. 58–61. (In Russian).

11. Marx A.D. Graph colorings problems and their applications in scheduling. *Periodica Polytechnica, Electrical Engineering*, 2004, no. 48, pp. 11–16.
12. Razzhivin D.B. Effektivnoe ispol'zovanie polosy propuskaniya v setyakh s vremennym mul'tipleksirovaniem. In: *Nauchnaya sessiya GUAP. Sbornik dokladov. Ch. I. Tekhnicheskie nauki* [Scientific session of SUAI. Collection of reports. Part I. Engineering]. St. Petersburg, GUAP, 2012, pp. 109–111. (In Russian).
13. Gabrielyan E., Hersch R.D. Efficient Liquid Schedule Search Strategies for Collective Communications. Published in ICON2004. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Networks*. Singapore, 2004, Vol. 2, pp. 760–766. DOI: 10.1109/ICON.2004.1409279
14. Panteleev A.V. Metaevristicheskie algoritmy poiska global'nogo ekstremuma [Metaheuristic algorithms of searching for a global extremum]. Moscow, Izdatelstvo MAI-PRINT Publ., 2009, 159 p. (In Russian).
15. Tanaev V.S., Gordon V.V., Shafranskii Ya.M. *Teoriya raspisaniy. Odnostadiinnye sistemy* [Schedule theory. Single-stage systems]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 384 p. (In Russian).
16. Korobkov I., Lavrovskaya I., Olenev V. Analiz transportnykh protokolov dlya bortovykh setei SpaceWire na sootvetstvie sovremennym trebovaniyam rossiiskoi kosmicheskoi promyshlennosti. *Nauchnaya sessiya GUAP. Sbornik dokladov. Ch. I. Tekhnicheskie nauki* [Scientific session of SUAI. Collection of reports. Part I. Engineering]. St. Petersburg, GUAP Publ., 2014, pp. 87–92. (In Russian).
17. Sheynin Y., Olenev V., Korobkov I., Lavrovskaya I., Kurbanov L., Dymov D. Computer-Aided Design System for Onboard SpaceWire Networks. In: *Proceedings of 8th International SpaceWire Conference 2018 (ISC2018)*. USA, Los Angeles, 2018, pp. 220–227.
18. Tretyakov A. Automation of scheduling for periodic real-time systems. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN*, 2012, vol. 22, pp. 375–400. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коробков Илья Леонидович, магистр техники и технологии, младший научный сотрудник Института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, тел.: +7 (952) 225-44-37, e-mail: ilya.korobkov@guap.ru.

AUTHOR

Ilya L. Korobkov, M.Sc. of technique and technology, junior research assistant at the Institute of High-Performance Computer and Network Technologies, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, ulitsa Bolshaya Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia, tel.: +7 (952) 225-44-37, e-mail: ilya.korobkov@guap.ru.

Поступила 18.03.2019; принята к публикации 30.07.2019; опубликована онлайн 28.11.2019.
Submitted 18.03.2019; revised 30.07.2019; published online 28.11.2019.