

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАДЕРЖЕК ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЯХ СЕТЕЙ SPACEWIRE

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-9-20-27

Оленев Валентин Леонидович,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, Valentin.Olenev@guap.ru

Manuscript received 05 August 2024;
Accepted 02 September 2024

Воронкова Анна Владимировна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,
Россия, anya.voronkova.03@mail.ru

Ключевые слова: SpaceWire, программная модель, аппаратура, задержки передачи, бортовая сеть

Целью данной статьи является проведения исследования значений задержек, полученных с помощью аппаратных стендов моделирования и программной модели работы сети SpaceWire. Результаты исследования должны показать, насколько отличаются характеристики передачи данных в реальной бортовой сети и ее программной модели-двойнике. Для работы использовались стенд комплексного тестирования бортовых информационных сетей SpaceWire АО "Решетнев" и аэрокосмический стенд SpaceWire для исследования, сертификации и тестирования ГУАП. Для программного моделирования использовалась система автоматизированного проектирования – SpaceWire Automated Network Design and Simulation (SANDS). В ходе исследования было запущено моделирование передачи данных на двух аппаратных стендах, и получены значения задержек для каждого передаваемого пакета данных. На тех же сетевых структурах и с аналогичными характеристиками оборудования была программно смоделирована работа сети с помощью SANDS. В результате были вычислены значения задержек для обеих схем, реализованных в аппаратуре, и проведено сравнение с реальными показателями. Для пакетов данных малого размера значения разницы задержек передачи оказались существенно выше, чем на пакетах большей длины. Это обусловлено временем обработки заголовков пакетов и увеличением задержек из-за частых переключений между портами. Важным результатом является, что значения задержек, полученных с помощью всех проведенных экспериментов, отличаются незначительно, отклонение составляет 0.1% - 4.5% для пакетов длины 1-2 Кбайт, что является очень хорошим результатом. Можно сделать вывод, что SANDS позволяет получить крайне точные значения, приближенные к реальному оборудованию, и может стать основным инструментом для разработчиков бортовых сетей SpaceWire, сократить сроки и стоимость разработки летательных аппаратов.

Информация об авторах:

Оленев Валентин Леонидович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем, директор центра аэрокосмических исследований и разработок, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия. <http://orcid.org/0000-0002-1817-2754>

Воронкова Анна Владимировна, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Оленев В.Л., Воронкова А.В. Анализ результатов измерения задержек передачи данных на аппаратных и программных реализациях сетей SpaceWire // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №9. С.20-27.

For citation:

Olenev V.L., Voronkova A.V. (2024). Analysis of measurement results of data transmission delays in hardware and software implementations of SpaceWire networks. T-Comm, vol. 18, no.9 pp. 20-27. (in Russian)

Введение

Технология SpaceWire – это совокупность современных коммуникационных стандартов для построения распределенных бортовых сетей, которая исторически создавалась для космического применения, но уже плотно вошла и в проекты по созданию авиационных и даже наземных сетей. Внедрение этой технологии в российской космической отрасли способствует обеспечению современных тактико-технических характеристик перспективных российских космических аппаратов (КА), конкурентоспособности на мировом рынке космических технологий и услуг, развитию международного сотрудничества в космической области с другими странами, совместимости и унификации разработок аппаратуры КА российских предприятий [1, 2].

Проектирование бортовой информационной сети КА является сложным процессом, который начинается с анализа требований, сформированных исходя из предполагаемого информационного взаимодействия в будущей сети. Одним из таких требований, предъявляемых к бортовой информационной сети КА, является передача информации с заданными временными ограничениями [3]. Следовательно, построенная сеть должна обеспечивать низкий уровень задержек.

Задержки передачи данных в бортовых сетях

Задержки при передаче данных по сети SpaceWire имеют следующие составляющие:

1. Задержка обработки – это время, которое необходимо маршрутизирующему коммутатору для получения пакета на входном интерфейсе, его обработки в соответствии с таблицей маршрутизации и последующей отправки на выходной интерфейс.

2. Задержка очереди – период времени, необходимый для передачи пакета от отправителя к получателю через физический канал связи.

3. Задержка распространения – это время, необходимое для передачи пакета от источника до получателя по физическому каналу связи.

Для сетей SpaceWire нет единого регламентированного правила измерения задержек передачи данных, соответственно, может быть рассмотрено несколько методов измерения данных величин.

Уже на этапе эскизного проектирования бортовой сети необходимо моделировать работу будущей сети космических и летательных аппаратов, представлять, какие будут задержки передачи данных и какими средствами нужно обеспечить требования по задержкам. Решая эту задачу, необходимо учитывать такую специфику сетей SpaceWire как червячная коммутация, поскольку методы расчета задержек для таких сетей отличаются [4-6]. Используемые методики достаточно сложны, поскольку учитывают весь передаваемый в сети трафик, поэтому используют программное обеспечение, которое этот расчет делает автоматически. Моделирование же такой сети тоже необходимо выполнять при помощи программных средств, еще до этапа эскизной сборки в аппаратуре. В следствии такой задачи возникает вопрос, возможно ли построить такое программное обеспечение, которое будет моделировать характеристики работы бортовой сети достаточно близко к аппаратным реализациям, с минимальной погрешностью.

Поэтому целью данной статьи выбрано исследование разницы задержек при моделировании с помощью системы автоматизированного проектирования «SANDS» и с помощью аппаратно-программных реализаций бортовых информационных сетей. Система SANDS выбрана как один из наиболее ориентированных на эти задачи программных комплексов. Для аппаратного тестирования были выбраны два аппаратно-программных стенда: первый реализован с помощью зарубежного оборудования (предоставлен АО «Решетнев»), а второй с помощью отечественного оборудования (на базе Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения).

Программный комплекс для расчета задержек передачи данных на модели

Возможность проектирования и анализа характеристик бортовой сети до этапа ее реального создания является одним из важных факторов создания летательных и космических аппаратов нового поколения. Для этих целей была создана система автоматизированного проектирования сетей SpaceWire – «SANDS». Она позволяет не только спроектировать структуру сети, но и проанализировать ее характеристики, проложить маршруты передачи информации и промоделировать ее работу [3]. В соответствии с требованиями космической отрасли, на основании которых SANDS создавалась, система обеспечивает все необходимые функции для получения виртуального прототипа будущей бортовой сети.

SANDS логически разбита на четыре основных программных составляющих, каждая из которых выполняет определенную функцию, соответствующую конкретному этапу создания физического представления бортовой сети, а также настройке ее информационного обмена.

Графический интерфейс позволяет создать бортовую сеть из расширяемой библиотеки модулей, соединить их каналами передачи данных. Каждый канал и модуль представляет некий физический аналог, в соответствии с которым заданы его характеристики (длина, масса и т.п.). Спроектированная сеть может быть в автоматизированном режиме построена до необходимой отказоустойчивости. После завершения работ по созданию физической структуры сети автоматически прокладываются маршруты передачи данных с учетом характеристик трафика и потоков данных. Маршруты будут являться беступиковыми, учитывающими требования по задержке передачи данных. Важным аспектом является то, что учитывается и отказоустойчивость, то есть резервные маршруты передачи данных, через каналы и коммутаторы, которые находятся в холодном резерве. На основании проложенных маршрутов формируются таблицы коммутации, которые могут быть напрямую прошиты в маршрутизирующий коммутаторы SpaceWire.

Следующая важная функция SANDS – это автоматизированное формирование таблиц планирования передачи информации, которые являются частью сервиса «Планирование» протокола СТП-ИСС-14. Это перспективный протокол передачи данных транспортного уровня для бортовых сетей SpaceWire в Российской Федерации [7, 8], но также его использование рассматривается и для иностранных проектов [9]. В СТП-ИСС-14 есть возможность распределить пропускную

способность каналов между передающими данные приложениями, создав расписание доступа к каналам передачи. Для больших сетей с огромным количеством приложений создать такую таблицу вручную практически невозможно.

Таким образом, сеть спроектирована на всех уровнях, начиная от физического и заканчивая прикладным. И работу всей этой сети можно промоделировать в SANDS. Ядро этой модели написано на языке SystemC, который является одним из наиболее эффективных и точных средств для моделирования аппаратных и программных реализаций параллельных систем [10, 11]. Для моделирования предусмотрено два режима [12]: побитовый уровень, где модель оперирует полным стеком протоколов (SpaceWire, транспортные протоколы и приложения), и который отображает максимально детализированную информацию о работе бортовой сети; пакетный уровень, который описывает верхние уровни модели OSI, начиная с сетевого, поэтому моделирование в таком режиме осуществляется значительно быстрее. Анализ результатов работы модели осуществляется при помощи файлов с диагностической информацией и диаграмм со статистическими результатами симуляции.

Моделирование на стенде комплексного тестирования бортовых информационных сетей SpaceWire

Моделирование на стенде комплексного тестирования бортовых информационных сетей SpaceWire предлагается осуществлять с помощью следующих аппаратно-программных средств [13]:

1. Управляющий модуль – это компьютер, который управляет всеми компонентами моделирования. На нём установлено специальное программное обеспечение.

2. Имитаторы оконечных узлов (ИОУ) – это программные блоки, имитирующие функции оконечных узлов. Настройка производится на этапе конфигурации сети и поступает с управляющего модуля.

3. Интерфейсные мосты – это устройства, через которые проходит информация из управляющего модуля в сеть SpaceWire и обратно.

4. Маршрутизирующий коммутатор SpaceWire – это устройство, которое обеспечивает коммутацию в сети, устанавливая связывание элементов системы. Он отвечает за правильную маршрутизацию данных между устройствами в сети.

5. Сетевой анализатор – это устройство, устанавливающееся в разрыв соединения SpaceWire с целью записи всей происходящей по данному соединению информации.

Для моделирования работы сети, использовалось следующее оборудование:

1. СБИС 1931KX014 – радиационно-стойкая отказоустойчивая СБИС программируемого мастер-коммутатора 3-го уровня с программируемой приоритизацией маршрутов, аппаратным СФ-блоком сетевого транспортного протокола взаимодействия бортовой аппаратуры КА по сети SpaceWire в 352 выводном металлокерамическом корпусе МК 4254.352-2 [14].

2. 4Links DSI – это интерфейс, установленный в стойке, который обеспечивает передачу и прием пакетов SpaceWire через Ethernet с использованием соединения TCP/IP. Диагностический интерфейс SpaceWire (DSI) представляет собой

мощный мост между Ethernet и SpaceWire, способный передавать данные с одного TCP/IP соединения на до восьми двунаправленных портов SpaceWire, работающих одновременно.

Этот интерфейс предоставляет возможность удаленного доступа к сети SpaceWire, что делает возможным программное моделирование различных устройств, удаленный мониторинг их работы и распределенную интеграцию всей системы. Кроме того, он позволяет подробно анализировать работу компонентов сети SpaceWire, включая маршрутизирующие коммутаторы, что способствует лучшему пониманию их функционирования и производительности.

3. 4Links MSR анализатор сети – многопечечный рекордер SpaceWire. Записывает до четырех потоков трафика SpaceWire, имеет соединение, позволяющее подключать несколько устройств для синхронизации внутренних часов. Временные метки синхронизируются точностью < 3нс, даже на расстоянии между устройствами до 50 м. Отдельно записанные потоки данных можно объединить в один временно согласованный поток.

Изображение анализатора 4Links DSI/MSR представлено на рисунке 1.



Рис. 1. Оборудование 4Links DSI/MSR

В качестве примера сети, для которой будут рассчитываться задержки каналов передачи данных может быть рассмотрена сеть, представленная на рисунке 2.

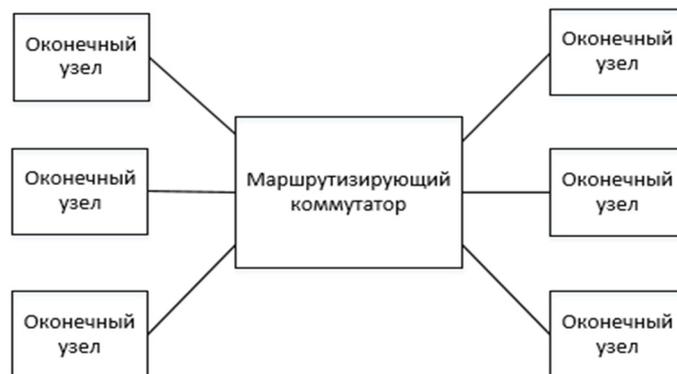


Рис. 2. Моделируемая сеть

На каждом из оконечных узлов может функционировать несколько приложений, формирующих свои информационные потоки. Для моделирования работы сети, рассмотренной на рисунке 1, предлагается задание информационных потоков оконечных узлов, представленных в таблице 1. Форматы передающихся пакетов выполнены в соответствии протокола СТП-ИСС-14 [15].

В рамках данной статьи анализ задержек передачи данных осуществляется для информационных потоков П1, П3 оконечного узла 4 и П1, П2 оконечного узла 6.

Таблица 1

Исходные данные для информационных потоков (П) конечных узлов (ОУ)

Параметр	Объем передаваемых данных, байт	Период передачи данных, мс	Задержка перед отправкой данных, мс	ОУ назначения
ОУ 1	П1	64	100	ОУ 2
	П2	16	100	ОУ 3
	П3	128	100	ОУ 4
ОУ 2	П1	256	300	ОУ 1
	П2	32	300	ОУ 3
	П3	4	300	ОУ 4
ОУ 3	П1	64	50	ОУ 1
	П2	4	50	ОУ 2
	П3	128	50	ОУ 4
ОУ 4	П1	32	50	ОУ 6
	П2	256	50	ОУ 2
	П3	16	50	ОУ 6
ОУ 5	П1	1024	2000	ОУ 1
	П2	2048	2000	ОУ 2
ОУ 6	П1	1024	2000	ОУ 4
	П2	2048	2000	ОУ 4

Назначение применяемого для моделирования оборудования представлено в таблице 2.

Таблица 2

Применяемое оборудование

Аппаратура	Назначение	Количество
Компьютер	Управляющий модуль	1
4Links DSI	Интерфейсный мост	2
Микросхема интегральная 1931KX014	Маршрутизирующий коммутатор SpaceWire	1
4Links MSR	Сетевой анализатор	1

Для моделирования была собрана схема, представленная на рисунке 3, с помощью аппаратно-программных средств, описанных в таблице 2.

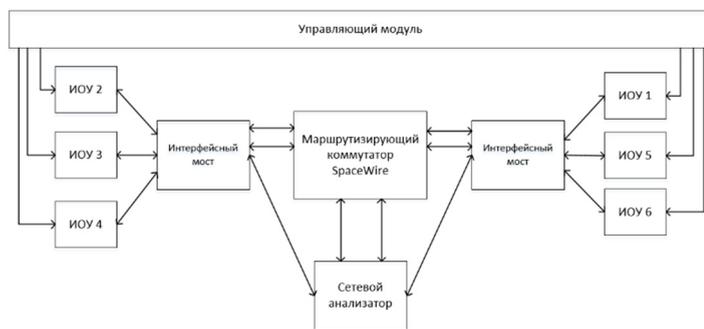


Рис. 3. Модель сети

Далее была запущена работа сети по команде с управляющего модуля. После окончания была зафиксирована информация, полученная сетевым анализатором, исходя из которой для пакетов было определено время начала передачи данных (отправка первого байта информации) и её окончания (получения узлом-приёмником символа End Of Packet (EOP)). Таким образом, время задержки вычисляется путём вычитания

из времени прихода символа EOP времени начала его передачи. Результаты расчёта задержек передачи пакетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты вычисления задержки передачи пакетов на стенде

Номер пакета	Размер пакета, байт	Задержка передачи данных, нс	
ОУ 4	П1	16	7199
	П3	32	10440
ОУ 6	П1	1024	208893
	П2	2048	413637

Моделирование с помощью системы автоматизированного проектирования SANDS (схема 1)

Для моделирования работы сети в SANDS была собрана схема, представленная на рисунке 4.

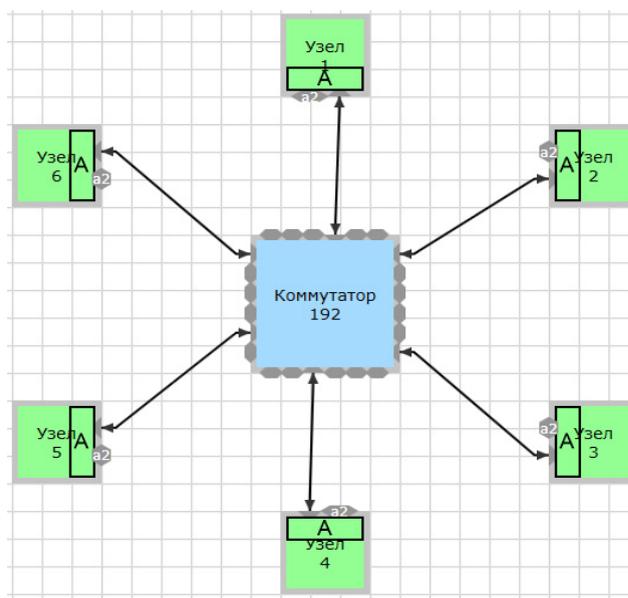


Рис. 4. Схема, собранная в SANDS

Для определения времени передачи данных был запущен Компонент моделирования бортовой сети. В результате было получено время начала отправки пакета и время получения символа EOP, как представлено на рисунке 5. Время задержки рассчитывалось как разность времени получения символа EOP и времени отправки пакета. Результат работы Компонента моделирования бортовой сети представлен на рисунке 5.

Id пакета	Запрос на отправку	Отправка	Принят	Буфер	Приложение
ID пакета: 59	Время: 740000 мкс	Время: 740000 мкс	Время: 740009,9 мкс	Время: 740009,9 мкс	Время: 740009,9 мкс
Тип пакета: Обычное сообщение	Протокол: STP_ISS_13 Узел: 374	Сеть: SpaceWire	Сеть: SpaceWire	Протокол: STP_ISS_13 Узел: 342	Статус: Ok Узел: 342
Размер пакета: 46 байт	Комплект: A			Комплект: A	Комплект: A

Рис. 5. Пример результата работы поле моделирования (Компонент 4) для первого пакета четвертого ОУ

Полученные с помощью двух методов результаты задержек передачи данных представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты работы

Номер потока	Размер пакета, байт	Показания на стенде, нс	Показания на SANDS, нс	Разница задержек, нс	Разница задержек в процентах	
ОУ 4	П1	16	7199	6700	499	7%
	П3	32	10440	9900	540	5%
ОУ 6	П1	1024	208893	208300	593	0,3%
	П2	2048	413637	413100	537	0,1%

Моделирование на аэрокосмическом стенде SpaceWire

Вторая часть эксперимента по аппаратному моделированию работы сети производилась с применением бортовой сети, находящейся в составе аэрокосмического стенда для исследования, сертификации и тестирования оборудования, работающего в соответствии со стандартом SpaceWire-RUS. Фотография стенда представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Стенд «АССИСТ»

Стенд «АССИСТ» использует реальное радиационно-стойкое оборудование, имеющее возможность передавать данные по каналам SpaceWire: это вычислительные узлы и коммутатор. На стенде можно проводить тестирование нового оборудования на совместимость с оригинальным стандартом SpaceWire, поскольку используемое оборудование и программное обеспечение считается эталонным. Это удобно тем, что уже на реальном примере бортовой сети можно испытать новые технические средства, программные реализации драйверов, приложений и др. Использование различных сценариев передачи данных и настройки позволяют верифицировать аппаратные и программные реализации сторонних производителей, и насколько это оборудование соответствует стандарту SpaceWire-RUS. В основе верификации лежат формальные методики.

Стенд также позволяет протестировать новые приложения или протоколы вышележащих уровней, которые спроектированы для сетей SpaceWire. При необходимости разработчик бортовой сети может вносить изменения в разрабатываемый протокол и отлаживать его работу без потери времени и средств на создание дополнительных средств отработки [16].

Стенд УНУ «АССИСТ» собран из следующих компонентов:

1. Вычислительный узел №1 (САЛЮТ-ЭЛ240М1), который предназначен для отладки прикладных программ пользователя, создания макетов систем интеллектуального управления, цифровой обработки сигналов.

2. Вычислительный узел №2 (МС-30SF6ЕМ-6U), который предназначен для анализа аппаратно-программных средств микросхемы, макетирования систем.

3. Коммутатор МСК-02REM-3U, предназначенный для макетирования пользовательских систем.

Для эксперимента была смоделирован простой сегмент бортовой сети, представленный на рисунке 7.



Рис. 7. Моделируемая сеть 2

Для моделирования работы сети, представленной на Рисунке 1, будем передавать пакеты разной длины со скоростью передачи 50Мбит/с. Задание параметров информационных потоков оконечных узлов представлено в таблице 5. Форматы передающихся пакетов выполнены в соответствии с протоколом СТП-ИСС-14.

Таблица 5

Исходные данные для передаваемых пакетов оконечных узлов

Параметр	Объем передаваемых данных, байт	Период передачи данных, мс	Задержка перед отправкой данных, мс	ОУ назначения	
ОУ 1	П1	100	1000	25	ОУ 2
	П2	512	1000	50	ОУ 2
	П3	1024	1000	100	ОУ 2
ОУ 2	П1	2048	20000	200	ОУ 1
	П2	4096	20000	450	ОУ 1
	П3	16384	20000	700	ОУ 1
	П4	32768	20000	2000	ОУ 1

Назначение применяемого в моделировании оборудования представлено в таблице 6.

Таблица 6

Применяемое оборудование

Аппаратура	Назначение
Вычислительный узел САЛЮТ-ЭЛ240М1	Имитатор оконечного узла
Вычислительный узел МС-30SF6ЕМ-6U	Имитатор оконечного узла
Коммутатор МСК-02REM-3U	Маршрутизирующий коммутатор SpaceWire
Сетевой мост Ethernet-SpaceWire	Интерфейсный мост
Управляющий компьютер Raspberry-R13	Управляющий модуль

Для моделирования была собрана схема, представленная на рисунке 8, с помощью аппаратно-программных средств, описанных в таблице 6.

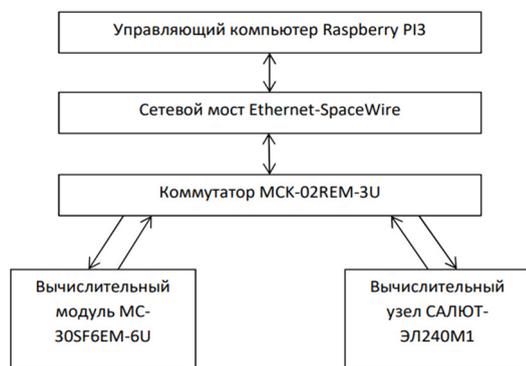


Рис. 8. Модель сети

Далее была запущена работа сети по команде с управляющего модуля. После окончания была зафиксирована информация, полученная сетевым анализатором, исходя из которой для пакетов было определено время начала передачи данных (отправка первого байта информации) и её окончания (получения узлом-приёмником символа End Of Packet (EOP)).

Таким образом, время задержки вычисляется так же, как вычисляли в ходе работы с первым стендом (путём вычитания из времени прихода символа EOP времени начала его передачи).

Таблица 7

Результаты расчёта задержек передачи информации

Номер пакета	Размер пакета, байт	Задержка передачи данных, нс
ОУ 4	П1	16
	П3	32
ОУ6	П1	1024
	П2	2048

Моделирование с помощью системы автоматизированного проектирования SANDS (схема 2)

Далее смоделируем работу сети, указанной на рисунке 8, в среде разработки SANDS. Получившаяся модель сети представлена на рисунке 9.



Рис. 9. Модель сети, собранная в SANDS

Далее для коммутатора и для каждого окончного узла были установлены характеристики, соответствующие значениям характеристик реального оборудования. Для определения времени передачи данных был запущен Компонент моделирования бортовой сети. В результате было получено время начала отправки пакета и время получения символа EOP. Время задержки рассчитывалось как разность времени получения символа EOP и времени отправки пакета. Результат работы Компонента моделирования бортовой сети представлен на рисунке 10.

Id пакета	Запрос на отправку	Отправка	Принят	Буфер	Приложение
ID пакета: 66	Время: 200000 мкс			Время: 200415,763321 мкс	Время: 200415,763321 мкс
Тип пакета: Обычное сообщение	Протокол: STP_ISS_14 Узел: 255	Время: 200000 мкс Сеть: SpaceWire	Время: 200415,763321 мкс Сеть: SpaceWire	Протокол: STP_ISS_14 Узел: 250	Статус: Ok Узел: 250
Размер пакета: 2062 байта	Комплект: A Название: Узел 255			Название: Узел 250 Комплект: A	Название: Узел 250 Комплект: A

Рис. 10. Пример результата работы после моделирования (Компонент 4) для второго пакета второго ОУ

По итогам моделирования данной сети были получены значения задержек, рассчитанные с помощью моделирования на стенде УНУ АССИСТ и в системе SANDS. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8

Результат работы для моделирования 2

Номер потока	Размер пакета, байт	Показания на стенде, мкс	Показания на SANDS, мкс	Разница задержек, мкс	Разница задержек в процентах
ОУ 1	П1	16	47	10	37,7%
	П2	32	46	13	33,7%
ОУ 2	П1	1024	221	211	4,5%
	П2	2048	426	416	2,3%

Задержка для пакетов малого размера связана с особенностями аппаратной реализации коммутатора. Эта задержка чаще всего обусловлена временем обработки заголовков пакетов и увеличением задержек из-за частых переключений между портами. На пакетах большого размера такая задержка менее заметна из-за большего времени передачи пакета.

В связи с этими особенностями, для анализа и оценки производительности сети мы будем опираться на данные, полученные для пакетов большой длины, так как это позволит более точно моделировать общую динамику работы сети и коммутатора.

Заключение

В рамках проведенного исследования было осуществлено физическое моделирование работы бортовой информационной сети с помощью двух различных аппаратно-программных схем, и произведена оценка задержки передачи данных на реальном оборудовании (иностранном и отечественном). Моделирование работы выполнялось на стенде комплексного тестирования бортовых информационных сетей SpaceWire и на аэрокосмическом стенде SpaceWire для исследования, сертификации и тестирования. Далее было произведено сравнение результатов физического моделирования с программным моделированием, которое осуществлялось при помощи системы автоматизированного проектирования и моделирования SANDS.

По итогам проведённой работы было выяснено, что значения задержек, полученных с помощью стендов комплексного тестирования бортовых информационных сетей SpaceWire оказались несколько выше, чем значения полученные с помощью системы автоматизированного проектирования SANDS. Для пакетов данных среднего размера (1-2 Кбайт) разница значений для первой схемы моделирования лежит в пределах 0.1% – 7%, для второй схемы моделирования в пределах 2.3% – 4.5%. График, отражающий значения задержек для пакетов, размером 1024 байт и 2048 байт представлен на рисунке 10.

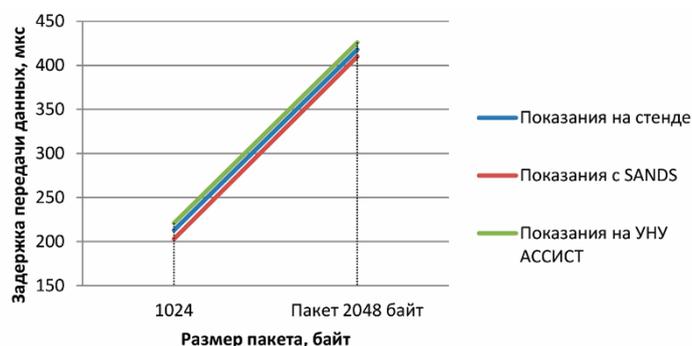


Рис. 10. График зависимости значений задержек передачи данных от размера пакетов

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что значения оценки задержек на реальном оборудовании и в программной системе моделирования SANDS имеют достаточно небольшую разницу: от 0,1% до 4,5%. Это очень хороший результат для программной модели, позволяющий оценить работу будущей бортовой сети летательного и космического аппарата еще на этапе концептуального проектирования.

Настолько точный результат на модели достигается благодаря использованию ядра SystemC, которое имеет потактовый режим работы, точную нотацию модельного времени, возможности выставления задержек в процессе моделирования. Таким образом, любую аппаратную реализацию можно представить как самостоятельный объект в SANDS и гибко настроить параметры генерации, обработки, и задержки данных.

Система автоматизированного проектирования и моделирования SANDS может стать серьезным помощником для разработчиков бортовых сетей SpaceWire, сократить сроки и стоимость разработки летательных аппаратов.

Литература

1. Шейнин Ю.Е., Солохина Т.В., Петричкович Я.Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2007. № 1. С. 38-49.
2. Liu W., Cheng B., Pang Y., Niu Y. Building an onboard high-performance computing platform based on SpaceWire and SpaceFibre // *2022 4th International Conference on Intelligent Information Processing (IIP) – Guangzhou, China, 2022*. P. 287-292. DOI: 10.1109/IIP57348.2022.00066.
3. Mills S. et al. SpaceWire Test and Development with STAR-System and the SpaceWire PCIe Mk2 // *2022 International SpaceWire & SpaceFibre Conference (ISC) – Pisa, Italy, 2022*. С. 1-4.

4. Коробков И.Л. Метод оценивания максимального времени передачи пакетов в сетях со сквозной маршрутизацией и временным мультиплексированием // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2022. Т. 65, № 2. С. 77-86. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86.

5. Оленев В.Л. Автоматизированное прокладывание беступиковых маршрутов в сетях с червячной коммутацией // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2024. Т. 16. № 4. С. 1-17.

6. Alexeeva K.I., Kurbanov L.I., Suvorova E.A. Calculation of Control Codes Delays in Onboard SpaceWire Networks // *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECNF) – St. Petersburg, Russia, 2019*. P. 1-8. DOI: 10.1109/WECNF.2019.8840642.

7. Максютин А.С., Кирилкин М.А., Осипов И.О., Ивлеников Д.В. Разработка рабочего места для исследования передачи информации с использованием механизмов СТП-ИСС // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. 2021. № 1-2. С. 148-150.

8. Максютин А.С., Д.С. Казайкин, Д.В. Дымов. Применение аппаратно-программного комплекса автономного тестирования узла SpaceWire для проведения испытаний СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2023. Т. 10, № 2. С. 63-72. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.63.72.

9. Attanasio B., Dellandrea B., Ballatore E., Jameux D. STP-ISS Assessment in Deterministic SpaceWire Network with MOSTNS3 SpaceWire Simulator // *2022 International SpaceWire & SpaceFibre Conference (ISC) – Pisa, Italy, 2022*. P. 01-04.

10. Galassi A., Pomante L., Nardocci V. Application of a system-level HW/SW co-design methodology to an industrial embedded system – 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) – Budva, Montenegro – 2024. P. 1-7. DOI: 10.1109/MECO62516.2024.10577912.

11. Оленев В.Л., Суворова Е.А., Синёв Н.И. Проектирование и моделирование коммуникационных систем: монография / СПб.: ГУАП, 2024. 328 с.

12. Olenov V., Lavrovskaya I., Korobkov I., Sinyov N., Sheynin Y. Hierarchical Simulation of Onboard Networks // *Intelligent Distributed Computing XIII – IDC 2019. Studies in Computational Intelligence*, vol. 868. Springer. 2019. P. 191-196.

13. Максютин А.С., Казайкин Д.С., Дымов Д.В. Разработка программного обеспечения для сетевого анализатора каналов SpaceWire // *Электронные средства и системы управления*. № 1. Томск, 2023. С. 14-17.

14. Максютин А.С., Мурыгин А.В., Ивлеников Д.В., Дымов Д.В. Разработка рабочего места и алгоритмов тестирования бортового оборудования SpaceWire // *Сибирский аэрокосмический журнал* – №4. 2021. С. 613-623.

15. Шейнин Ю.Е., Оленев В.Л., Лавровская И.Я., Дымов Д.В., Кочура С.Г. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire // *Исследования наукограда. Железногорск*, 2014. № 1-2. С. 21-30.

16. Синев Н.И., Астахов Д.М., Воронов И.М., Яцкевич Д.И. Разработка и реализация протокола для информационного обмена между устройствами УНУ АССИСТ // *Системный анализ и логистика*. 2023. № 3(37). С. 104-121. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-104-121.

ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS OF DATA TRANSMISSION DELAYS IN HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATIONS OF SPACEWIRE NETWORKS

Valentin L. Olenev, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, Valentin.Olenev@guap.ru
Anna V. Voronkova, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, anya.voronkova.03@mail.ru

Abstract

The aim of this article is to conduct a research of the delay values obtained using hardware simulation stands and a software model of the SpaceWire network operation. The results of the study should demonstrate how the data transmission characteristics differ between an actual onboard network and its software model counterpart. The testing utilized the comprehensive testing stand for onboard information networks SpaceWire from JSC "ISS" and the aerospace SpaceWire stand for research, certification, and testing at the SUAI. For the software modeling, the SpaceWire Automated Network Design and Simulation (SANDS) system was used. During the study, data transmission simulation was launched on two hardware stands, and delay values for each transmitted data packet were obtained. Using the same network structures and similar equipment characteristics, the network operation was modeled using SANDS. As a result, delay values for both implementations in hardware were computed and compared with the actual metrics. For small data packets, the differences in transmission delay values were significantly higher than for larger packets. This is attributed to the processing time of packet headers and increased delays due to frequent switching between ports. An important result is that the delay values obtained from all conducted experiments differ only slightly, with a deviation of 0.1-4.5% for packets of lengths 1-2 KB, which is a very good result. It can be concluded that SANDS allows for obtaining highly accurate values that are close to those of real equipment, and it can become a primary tool for developers of SpaceWire onboard networks, reducing the timelines and costs of aircraft development.

Keywords: SpaceWire, software model, hardware implementations, transmission delays, onboard network

References

1. Y.E. Sheinin, T.V. Solokhina, Y.Y. Petrichkovich, "SpaceWire Technology for Parallel Systems and Onboard Distribution Complexes," *Electronics: Science, Technology, Business*. Moscow, 2007. No. 1, pp. 38-49.
2. W. Liu, B. Cheng, Y. Pang and Y. Niu, "Building an onboard high-performance computing platform based on SpaceWire and SpaceFibre," *2022 4th International Conference on Intelligent Information Processing (IIP)*, Guangzhou, China, 2022, pp. 287-292, doi: 10.1109/IIP57348.2022.00066
3. S. Mills et al., "SpaceWire Test and Development with STAR-System and the SpaceWire PCIe Mk2," *2022 International SpaceWire & SpaceFibre Conference (ISC)*, Pisa, Italy, 2022, pp. 1-4.
4. I.L. Korobkov, "Method for Evaluating Maximum Packet Transmission Time in Networks with End-to-End Routing and Time Multiplexing," *Bulletin of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, No. 2, pp. 77-86, doi: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-77-86
5. V.L. Olenyev, "Automated Routing of Non-Blocking Paths in Networks with Wormhole Switching," *High-tech Technologies in Earth Space Research*. 2024. Vol. 16. No. 4, pp. 1-17.
6. K.I. Alexeeva, L.I. Kurbanov, and E.A. Suvorova, "Calculation of Control Codes Delays in Onboard SpaceWire Networks," *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/WECONF.2019.8840642
7. A.S. Maksutin, M.A. Kirilkin, I.O. Osipov, D.V. Ivlenkov, "Development of a Workplace for Information Transmission Research Using STP-ISS Mechanisms," *Collection of Selected Articles from the TUSUR Scientific Session*. 2021. No. 1-2, pp. 148-150.
8. A.S. Maksutin, D.S. Kazaykin, D.V. Dymsov, "Application of Hardware and Software Complex for Autonomous Testing of the SpaceWire Node to Conduct Tests of the Information and Control Interface Controller IC," *Rocket and Space Instrumentation and Information Systems*, 2023. Vol. 10, No. 2, pp. 63-72., doi: 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.63.72
9. B. Attanasio, B. Dellandrea, E. Ballatore and D. Jameux, "STP-ISS Assessment in Deterministic SpaceWire Network with MOSTNS3 SpaceWire Simulator," *2022 International SpaceWire & SpaceFibre Conference (ISC)*, Pisa, Italy, 2022, pp. 01-04.
10. A. Galassi, L. Pomante and V. Nardocci, "Application of a system-level HW/SW co-design methodology to an industrial embedded system," *2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Budva, Montenegro, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/MECO62516.2024.10577912
11. V.L. Olenyev, E.A. Suvorova, N.I. Sinyov, "Design and Modeling of Communication Systems: Monograph," St. Petersburg: GUAP, 2024. 328 p.
12. V. Olenev, I. Lavrovskaya, I. Korobkov, N. Sinyov, Y. Sheynin, "Hierarchical Simulation of Onboard Networks," *Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence*, vol 868. Springer. 2019, pp. 191-196.
13. A.S. Maksutin, D.S. Kazaykin, D.V. Dymsov, "Development of Software for a SpaceWire Channel Network Analyzer," *Electronic Devices and Control Systems*. Tomsk, 2023. No. 1, pp. 14-17.
14. A.S. Maksutin, A.V. Murigin, D.V. Ivlenkov, D.V. Dymsov, "Development of a Workplace and Testing Algorithms for SpaceWire Onboard Equipment," *Siberian Aerospace Journal*. 2021. No. 4, pp. 613-623.
15. Y.E. Sheinin, V.L. Olenev, I.Ya. Lavrovskaya, D.V. Dymsov, S.G. Kochura, "Development, Analysis, and Design of the STP-ISS Transport Protocol for SpaceWire Onboard Networks," *Research of Science Cities. Zheleznogorsk*, 2014. No. 1-2, pp. 21-30.
16. N.I. Sinev, D.M. Astakhov, I.M. Voronov, D.I. Yatskevich, "Development and Implementation of a Protocol for Information Exchange Between Devices of the Assistant UNU," *System Analysis and Logistics*. 023. No. 3(37), pp. 104-121, doi: 10.31799/2077-5687-2023-3-104-121

Information about authors:

Valentin L. Olenev, Candidate of science, Docent, Head of the Department for aerospace computer and software systems, Director of Aerospace R&D Centre, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia. <http://orcid.org/0000-0002-1817-2754>
Anna V. Voronkova, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia