



АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ ОТРАБОТКА КОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ

Н. И. Синёв, А. А. Карандашев, В. Л. Оленев, Н. Ю. Чумакова, А. Ю. Сыщиков

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассматривается проблема аппаратно-программного исследования коммуникационных протоколов для бортовых сетей. Представлена система, позволяющая тестировать разрабатываемое сетевое оборудование SpaceWire и SpaceFibre. Определение основных этапов разработки рассматриваемой системы для технологии SpaceWire демонстрирует различные сетевые структуры, отвечающие заявленным требованиям по аппаратно-программному тестированию сетевого оборудования, и определяет необходимые устройства для реализации теории на практике. Один из разделов статьи демонстрирует успешное внедрение предлагаемой теории на практике. Описанные проблемы реализации подобного исследовательского комплекса для технологии SpaceFibre помогают определить вектор дальнейших исследований.

Ключевые слова: бортовая сеть, протоколы передачи данных, стенд, межсетевое взаимодействие, SpaceWire, SpaceFibre, аппаратно-программное тестирование.

Для цитирования:

Синёв Н. И., Карандашев А. А., Оленев В. Л., Чумакова Н. Ю., Сыщиков А. Ю. Аппаратно-программная отработка коммуникационных протоколов для бортовых сетей // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №1(31), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с. 44-62. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-1-44-62.

HARDWARE AND SOFTWARE TESTING OF COMMUNICATION PROTOCOLS FOR ON-BOARD NETWORKS

N. I. Sinyov, A. A. Karandashev, V. L. Olenov, N. Y. Chumakova, A. Y. Syschikov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article deals with the problem of hardware-software research of communication protocols for on-board networks. A system is presented that allows testing the developed SpaceWire and SpaceFibre network equipment. Determination of the main stages of development of the system under consideration for SpaceWire technology demonstrates various network structures that meet the stated requirements for hardware and software testing of network equipment and determines the necessary devices for implementing the theory in practice. One of the sections of the article demonstrates the successful implementation of the proposed theory in practice. The described problems of implementing such a research complex for SpaceFibre technology help to determine the vector of further research.

Keywords: on-board network, communication protocols, stand, interconnection network, SpaceWire, SpaceFibre, hardware-software testing.

For citation:

Sinyov N. I., Karandashev A. A., Olenov V. L., Chumakova N. Y., Syschikov A. Y. Hardware and software testing of communication protocols for on-board networks // System analysis and logistics.: №1(31), ISSN 2007–5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p 44-62. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-1-44-62.

Введение

В настоящее время развитие информационных технологий и освоение космического пространства идёт особо быстрыми темпами. Этот факт прежде всего связан с интересом человечества к изучению окружающего нас мира, познанием законов природы и своего места во Вселенной. Для изучения космоса требуются постоянные разработки и технологические новинки, которые бы позволяли раздвинуть границы познания и улучшить условия жизни на самой Земле. Требуется создание более совершенных телескопов, спутников, новых моделей луноходов, марсоходов и других аппаратов для освоения внеземного пространства. Учёные и разработчики со всего мира прикладывают усилия для совершенствования существующих и создания новых технологий. Так, например, американская компания Northrop Grumman объявила, что собирается запустить новую роботизированную сервисную станцию по обслуживанию спутников на околоземной орбите [1, 2]. Такая многоразовая станция должна



стыковаться с уже функционирующими спутниками на и производить их дозаправку, продлевая их срок жизни. Таким образом компания предлагает избежать появления лишнего космического мусора, проблема которого особенно актуальна в последнее десятилетие [3]. Дозаправка позволит продлить работу существующих старых спутников ещё на пять-шесть лет. На данный момент существует уже две подобные станции, работающие с 2020 года. В феврале этого года Northrop Grumman заявили, что введут третью станцию в эксплуатацию к 2024 году [1]. Приведённый пример особенно актуален, поскольку на 2022 год более 90 стран и организаций имеют собственные спутники [4]. Важно отметить, что это далеко не единственный пример появления новых систем и технологий в космосе. Последние достижения в программах России изучению Марса и освоению Луны, Китая по созданию собственной космической станции и США по созданию новых многоразовых ракет-носителей лишь подтверждают заинтересованность всего мира в технологическом прогрессе [5, 6, 7].

Появляется всё больше фирм-производителей различного космического оборудования, позволяющих создавать космические аппараты. Обеспечение высокого качества каждого технического элемента чрезвычайно важно для подобных наукоёмких и дорогостоящих проектов. Ключевую же роль играют системы, образующие бортовое автоматическое обеспечение. Так, например, в последнее время появилось много фирм, производящих различное сетевое оборудование, которое позволяет поддерживать функционал всего космического аппарата. Большинство из них работают с общепризнанными международными протоколами передачи данных, такими как SpaceWire [8]. Однако, многие производители уже ведут свои разработки для создания сетевых устройств нового поколения, поддерживающих технологию SpaceFiber [9].

1. Проблема тестирования элементов бортовых космических сетей SpaceWire и SpaceFibre

SpaceWire и SpaceFibre – стандарты коммуникационных бортовых сетей космических и летательных аппаратов. Одной из основных целей стандарта SpaceWire является обеспечение совместимости с различными видами оборудования и многофункциональное использование конечных элементов и подсистем. Стоимость системы может сокращаться благодаря использованию процессорных устройств, модулей массивной памяти, аппаратных телеметрических систем, для решения разных задач. Кроме того, увеличивается надёжность и производительность [8].

Благодаря технологии SpaceWire появляется возможность строить высокоскоростную коммуникационную инфраструктуру для всех видов бортовых коммуникаций. Среди них: обмен данными между вычислительными модулями параллельных вычислительных систем или распределённых вычислительных комплексов; передача высокоскоростных цифровых сигналов между источниками/приемниками сигналов, процессорами цифровой обработки и устройствами отображения.

Среди достоинств технологии SpaceWire стоит выделить: синхронное распространение меток времени и распределённых прерываний; высокая надёжность системы в целом; низкое удельное энергопотребление; автоматическое восстановление соединений и перезапуск передач при сбоях; небольшой размер и вес целевого оборудования, полученный за счёт уменьшения числа кабелей до одной пары.

Стандарт SpaceFibre разработан в рамках развития технологии SpaceWire и направлен на дополнение функциональных и скоростных возможностей [9]. SpaceFibre обеспечивает новый диапазон характеристик для построения высокоэффективных бортовых сетей. Посредством значительного увеличения скорости передачи данных, уменьшения массы кабеля, а также предоставления возможности гальванической развязки SpaceFibre позволяет передавать данные как по оптоволоконным, так и по электрическим кабелям. SpaceFibre позволяет создать единую бортовую инфраструктуру для различных космических миссий, что позволяет снизить стоимость и предоставляет возможность повторного использования схемы. SpaceFibre



использует формат пакета, совпадающий с форматом пакета SpaceWire, таким образом, обеспечивая простую связь между существующим оборудованием SpaceWire и высокоскоростных каналов, и сетей SpaceFibre.

Ключевыми возможностями технологии SpaceFibre, отличающими её от SpaceWire, являются:

- Гарантированное качество сетевого сервиса, QoS.
- Развитая система защиты от ошибок и сбоев внутри сети
- Высокая скорость передачи информации
- Возможность гальванической развязки в канале
- Большие длины, расстояния канала точка-точка между узлами сети; при использовании ВОЛС – до 150 м.
- Технология, эффективная для реализации в бортовой ЭКБ

Как видно из представленного описания, рассматриваемые технологии являются сложной системой, обеспечивающей высокоскоростную и надёжную передачу данных. Разработка устройств, реализующих подобную сетевую структуру, представляет собой длительное и дорогостоящее занятие. Причём на выходе необходимо иметь полноценное надёжное устройство, позволяющее работать даже в тяжёлых условиях космоса. Цена даже незначительной ошибки может оказаться очень высокой, как по временным и материальным затратам, так и по отношению к жизни людей, работающих на космических станциях. Поэтому необходима система, позволяющая контролировать процесс разработки новых технических устройств для автоматизированных бортовых космических сетей SpaceWire и SpaceFibre. Подобная система позволила бы избежать не только возможных ошибок при разработке, но и финансовых потерь. Необходима система, которая позволит:

1. Проводить тестирование нового технического оборудования на совместимость с конкретным оборудованием, обеспечивающим работу бортовой сети SpaceWire и SpaceFibre. Такая проверка позволит испытать технические средства в реальной бортовой сетевой структуре, где в состав сети включено оборудование от различных фирм-производителей.
2. Проверять соответствуют ли новые технические решения стандартам SpaceWire и SpaceFibre. Различные сценарии моделирования передачи данных и технических сбоев позволят проверить корректность аппаратной и программной реализаций и их соответствие букве стандарта.
3. Проверять работоспособность устройств, обеспечивающих передачу информации на стыке сетей SpaceWire и SpaceFibre. Подобные технические средства будут востребованы, как только начнётся внедрение элементов сети нового стандарта SpaceFibre в существующие космические системы SpaceWire.
4. Проводить тестирование новых протоколов, работающих поверх стандартов SpaceWire и SpaceFibre.

Для реализации подобной системы прежде всего необходимо определить основные этапы и принципы разработки. Необходимо обеспечить модульность разрабатываемой системы. Каждая структура бортовой сети, как стандарта SpaceWire так и стандарта SpaceFibre, должна реализовываться в виде отдельной независимой системы или отдельного лабораторного стенда. Подобный подход позволит после завершения разработки проводить, как отдельные экспериментальные проверки на каждом из рассматриваемых стандартов, так и проверки, связанные с совместимостью устройств на стыке сетевых структур.

Необходимо рассмотреть каждый из стендов в отдельности и определить основные этапы разработки. Каждый этап должен формировать законченную сетевую структуру и при его успешной реализации, предоставлять пользователю функционал для тестирования.



2. Лабораторный стенд SpaceWire

В лабораторном стенде бортовой космической сети SpaceWire следует использовать различное сетевое оборудование от широкого спектра производителей. Составленная таким образом сеть, позволит проверять новые тестируемые на стенде технологии не только на совместимость со стандартом SpaceWire, но и на совместимость с оборудованием, которое используется в настоящих сетевых структурах [8].

Предполагается несколько этапов реализации стенда для аппаратно-программной отработки SpaceWire (сокращенно С АПО-SpW). Каждый из этапов позволит внедрить новое оборудование и новые фирмы-производители в структуру сети передачи данных. Благодаря этому с каждым разом будет расширяться доступный для тестирования функционал. Возрастет количество элементов сети, а вместе с тем повысится и охват различных технологий и устройств, использующихся в настоящих функционирующих сетях. Благодаря стандартной классификации сетевых устройств и при наличии нескольких экземпляров одного типа устройств от разных производителей получится проверить совместимость и взаимозаменяемость существующих и будущих перспективных технологических решений.

2.1. Первый этап

Первый этап предполагает формирование прототипа сети, позволяющего реализовать базовое соединение типа «точка-точка». С АПО-SpW при этом должен иметь функционал по обмену данными между двумя сетевыми устройствами:

- Должна быть продемонстрирована наглядная сетевая структура простой цепи подключённых друг к другу устройств;
- Сетевая структура и процесс обмена данными должны соответствовать стандарту SpaceWire;
- Обмен данными должен наглядно демонстрироваться на мониторах, подключённых к оконечным устройствам сети;
- Должна присутствовать возможность регулирования процессом обмена данными.

Заявленные требования помогут реализовать простейшую сетевую структуру, предоставляющую инструменты управления передачей данных и наглядно демонстрирующей корректность работы задействованных в сетевой структуре устройств от разных производителей.

На первом этапе предполагается использование двух типов устройств, необходимых для реализации поставленной задачи:

1. Мост Ethernet-SpaceWire от компании MiT [10].



Рис. 1 – Мост Ethernet-SpaceWire от компании MiT

Мост Ethernet-SpaceWire предназначен для подключения к сети SpaceWire (SpW) вычислительных машин и комплексов, имеющих интерфейс сети Gigabit Ethernet. Позволяет передавать и принимать данные и управляющие коды между сетью Ethernet и сетью SpaceWire. Наглядное представление устройства представлено на Рис. 1.



Среди необходимых свойств моста для реализации требуемого функционала стенда особенно стоит выделить [10]:

- a. Передача и прием данных и управляющих кодов между сетью Ethernet и сетью SpaceWire;
- b. Транзитная передача данных из порта SpaceWire в порт SpaceWire моста;
- c. Фильтрация пакетов, приходящих из сети SpaceWire;
- d. Управление режимами работы, установка скоростей канала SpaceWire, настройка логических адресов абонента в сети SpaceWire;
- e. Настройки локального и удаленного MAC-адреса сети Ethernet.

Типовые применения [10]:

- a. Управление, конфигурация и отладка сети SpaceWire путем подключения персонального компьютера к сети SpaceWire по интерфейсу Ethernet;
- b. Организация каналов передачи и приема информационных потоков / пакетов SpaceWire между сетью SpaceWire и ЭВМ / ВК в наземных комплексах тестирования и испытаний.

Порты SpW поддерживают скорость работы до 500 Мбит/с. Канал SpW является дуплексным. Предусмотрена возможность программной настройки скорости передачи данных. Ethernet порт поддерживает скорость работы 100, 1000 Мбит/с [10].

2. Оконечное устройство Raspberry Pi 3 Model B+ от компании Raspberry Pi Foundation. Наглядное представление внешнего вида устройства представлено на Рис. 2.



Рис. 2 – Raspberry Pi 3 Model B+ от компании Raspberry Pi Foundation

Рассматриваемая модель имеет следующие характеристики, удовлетворяющие требованиям С АПО-SpW [11]:

- a. 64-битным четырехъядерный процессор Broadcom BCM2837B0 с частотой 1,4 ГГц и двухдиапазонным 2,4 ГГц;
- b. Один Гигабайт встроенной памяти LPDDR2 SDRAM;
- c. Имеется возможность подключения Micro SD для загрузки операционной системы и хранения данных;
- d. Bluetooth 4.2/BLE;
- e. Имеются следующие порты: полноразмерный HDMI, порт дисплея MIPI DSI, порт камеры MIPI CSI, 4 порта USB 2.0, Ethernet порт.

Возможность установки различных операционных систем является одним из достоинств выбранной платформы для реализации конечных узлов. Благодаря этому можно подобрать подходящую, быструю и удобную операционную систему, эмитирующую работу вычислительного узла.

Raspberry Pi 3 Model B+ поддерживает возможность установки следующих операционных систем: Raspberry Pi OS 32-bit, Raspberry Pi OS 64-bit, Ubuntu MATE. Для



работы лабораторного стенда необходимо чтобы операционная система отвечала следующие требованиям:

1. Высокая скорость работы;
2. Стабильное функционирование;
3. Простой и удобный интерфейс;
4. Поддержка широкого спектра программного обеспечения;

В результате анализа и экспериментальной проверки, лучше всего себя показала Raspberry Pi OS 32-bit. Действительно, выбранная операционная система лучше всего подходит для установки, поскольку официально поддерживается самим разработчиком устройства и отвечает большинству заявленных требований. Ключевым параметром для выбора операционной системы стала скорость её работы, поскольку сама модель Raspberry Pi 3 Model B+ сильно ограничена в предоставляемых ресурсах, а для отображения актуальной сетевой информации не должно быть сильных задержек при выводе данных на демонстрационный экран стенда. Результат сравнения представлен в Таблица 1.

Таблица 1 - Сравнение заявленных ОС по обозначенным требованиям.

Требование №	1	2	3	4
Raspberry Pi OS 32-bit	Да	Да	Да	Нет
Raspberry Pi OS 64-bit	Нет	Да	Да	Нет
Ubuntu MATE	Нет	Нет	Да	Да

Для соединения заявленных выше элементов сети, предполагается использовать кабель SpaceWire Lab от компании MiT и стандартный кабель Ethernet [10].

Для реализации первого этапа необходимо по два экземпляра указанных устройств, один кабель SpaceWire Lab, два кабеля Ethernet. Результирующая сетевая структура представлена на Рис. 3. Так же необходимо использовать устройства ввода-вывода, демонстрационные мониторы и соответствующие кабели питания.

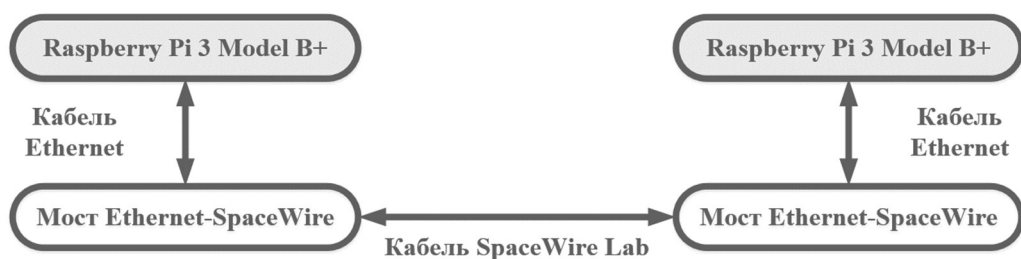


Рис. 3 – Организация сетевой структуры для первого этапа

Благодаря модульному подходу к организации С АПО-SpW , сеть может быть с лёгкостью расширена на большее количество устройств, путём подключения коммутатора SpaceWire и организации более сложной сетевой структуры. Наличие Двух мостов позволит передавать данные по кабелю SpaceWire. Благодаря этому можно проверить работоспособность основных механизмов передачи данных через протокол SpaceWire. Кроме того, уже на первом этапе можно производить проверку программного обеспечения различных исследователей и фирм-разработчиков, на соответствие стандарту SpaceWire и его совместимость с продукцией компании MiT от института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий ГУАПа.



2.2. Второй этап

Второй этап предполагает внедрение аппаратно–программной платформы сторонних производителей, способной решать задачи по коммутации и приёмо-передачи данных. Заданным требованиям удовлетворяет продукция компании Элвис для расширения сетевой структуры и добавления специализированных оконечных устройств. Предполагается использование следующих устройств, доступных для реализации в С АПО-SpW :

1. Оконечный узел – Плата с процессором 1892BM14Я в отладочном модуле Салют-ЭЛ24ОМ.

Малопотребляющий многоядерный сигнальный микропроцессор 1892BM14Я представляет собой высокопроизводительную микропроцессорную систему на кристалле, включающую два DSP ядра ELcore-30M, два CPU ARM Cortex-A9, кодек H.264, графический 3D акселератор Mali-300, навигационный коррелятор ГЛОНАСС/GPS/Beidou и встроенные порты ввода/вывода. Применяется для связанных, навигационных, мультимедийных, встраиваемых, мобильных приложений, например: промышленных компьютеров, планшетов, тонких клиентов, средств защиты информации, IP-видеокамер, IP-телефонов [12]. Сам процессор необходимо использовать в разрабатываемом стенде посредством его подключения к сетевой структуре через специализированный отладочный модуль. На Рис. 4 представлен внешний вид отладочного модуля Салют-ЭЛ24ОМ с подключённым к нему процессором.

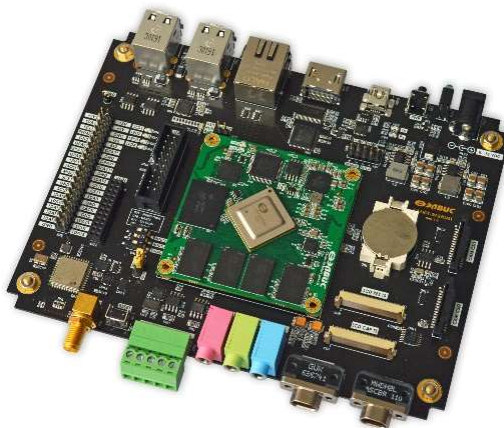


Рис. 4 – Отладочный модуль Салют-ЭЛ24ОМ с подключённым процессором

На отладочном модуле расположены следующие интерфейсы [12]:

- a. Ethernet 10/100/1000;
- b. USB 2.0 Host, Type A, 4 порта;
- c. SpaceWire, 2 порта;
- d. RS-485;
- e. CAN;
- f. Raspberry Pi B+ совместимый порт.

Так же поддерживаются Wi-Fi, Bluetooth. Имеются аудио и видеовыходы. Необходимое питание для работы составляет +12 В. Габариты отладочного модуля представлены следующим соотношением: 159 × 140 мм.

2. Оконечный узел – Плата с процессором 1892BM15АФ в отладочном модуле МС-30SF6ЕМ-6U.

Радиационно-стойкая микросхема 1892BM15АФ, разработанная и изготовленная на территории РФ предназначена для применения в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов, прежде всего, в трактах обработки оптических и радарных систем, видеокамер,



систем обработки и сжатия изображений в радиолинию. Обеспечена совместимость по программному обеспечению с MIPS32-ядрами CPU предыдущих поколений серии «Мультикор». DSP-ядро идентично использованному в микросхемах 1892BM10Я и 1892BM14Я. Микросхема 1892BM15АФ может использоваться как устойчивый к воздействию специальных факторов сигнальный высокопроизводительный микропроцессор для бортовых применений различного назначения. В том числе как сетевой элемент комплексного бортового оборудования на базе сетей SpaceWire с использованием «интеллектуальных» коммутаторов-маршрутизаторов и других микросхем комплекта «МУЛЬТИБОРТ» разработки АО НПЦ «ЭЛВИС» и его партнеров [12].

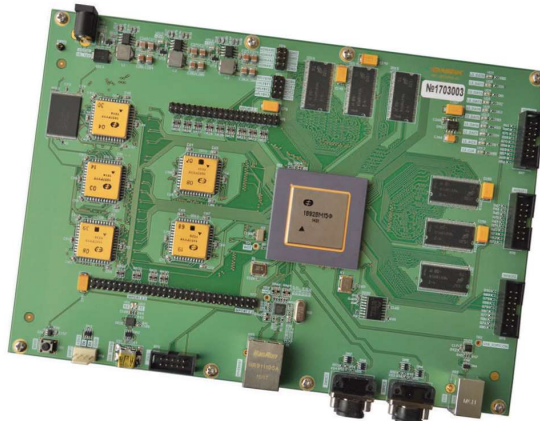


Рис. 5 – Отладочный модуль MC-30SF6EM-6U с подключённым процессором

Отладочный модуль MC-30SF6EM-6U предназначен для изучения аппаратно-программных средств микросхемы и макетирования систем пользователя. Внешний вид и интересы отладочного модуля MC-30SF6EM-6U наглядно продемонстрированы на Рис. 5.

3. Коммутатор – 1892КП1Я в отладочном модуле MCK-02REM-3U.

Коммутатор 1892КП1Я разработан АО НПЦ «ЭЛВИС» на базе IP-библиотеки платформы «Мультикор» и предназначен для построения масштабируемых коммуникационных структур распределенных и управляющих комплексов, работающих в реальном масштабе времени. Поддержка протокола RMAP и наличие CPU-ядра в составе микросхемы позволяют организовать детальную обработку ошибочных ситуаций, динамический подбор скоростей передачи, мониторинг и администрированием работы 1892КП1Я и коммуникационных сетей на их основе. Коммутатор может быть использован для администрирования сети SpaceWire [12].



Рис. 6 – Отладочный модуль коммутатор MCK-02REM-3U

Отладочный модуль MCK-02REM-3U предназначен для изучения аппаратно-программных средств микросхемы и макетирования систем пользователя. Для работы предоставлены следующие интерфейсы:



- a. JTAG;
- b. UART-USB;
- c. от 4 базовых портов SpaceWire на самой отладочной плате и вплоть до 16 портов при использовании модулей расширения.

Сам базовый отладочный модуль MCK-02REM-3U без модулей расширения представлен на Рис. 6.

При использовании новых устройств для расширения сетевой структуры так же необходимо воспользоваться дополнительными кабелями SpaceWire Lab, кабелями питания и необходимыми устройствами ввода-вывода. В результате следует применить в сетевой структуре как минимум по одному экземпляру каждого из рассмотренных устройств. Пример сетевой структуры бортовой сети SpaceWire в С АПО-SpW представлен на Рис. 7.

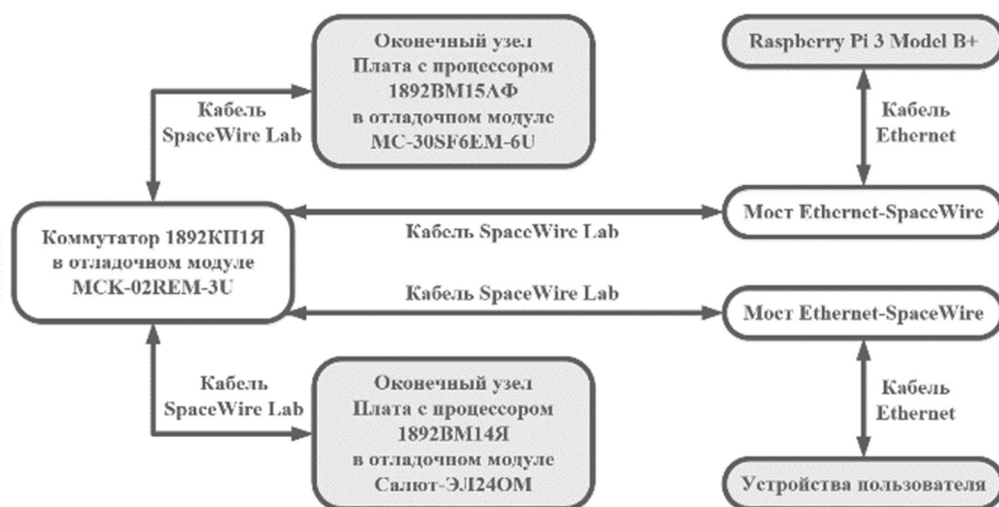


Рис. 7 – Пример сетевой структуры SpaceWire на втором этапе

Представленная сетевая структура позволит проводить тестирование не только стороннего программного обеспечения, но также позволит проверять устройства и различные технические решения исследователей и фирм-производителей. Подключение может осуществляться через коммутатор 1892КП1Я при помощи дополнительного кабеля SpaceWire Lab. Благодаря использованию специализированного оборудования компании Элвис расширятся возможности относительно проверки совместимости тестируемых устройств с реально существующим оборудованием SpaceWire. В случае необходимости к коммутатору могут быть добавлены дополнительные модули расширения с портами SpaceWire. Таким образом, лабораторный стенд сможет тестировать новые устройства и программы обмена информационными пакетами в различных режимах. Спектр режимов моделирования сможет включать как обмен пакетами в режиме «точка-точка», так и в широковещательном режиме. Составление же программ тестирования и заранее заготовленных сценариев моделирования с обоснованием и практическим применением каждого представляется отдельной задачей.

2.3. Последующие этапы

В качестве последующих этапов развития предполагается расширение элементной базы при помощи устройств от других производителей. Представляется перспективным использование не только отечественных устройств, но и зарубежных аналогов. Широкий охват фирм-производителей космического сетевого оборудования SpaceWire позволит проводить более качественные и надёжные проверки технологических новинок. Кроме того, новые типы устройств могут помочь в расширении функционала С АПО-SpW. Стоит рассмотреть наиболее известных зарубежных производителей и устройства, которые они



предлагают. Каждое устройство стоит оценить относительно возможности внедрения в разрабатываемый стенд, относительно функционала, который оно может добавить к будущим программам испытаний.

Первая группа устройств представлена фирмой Dynamic Engineering — компанией, расположенной в США, занимающейся встроенными системами, производящей высококачественные технологические продукты. Среди клиентов компании множество всемирно известных названий: Boeing, NASA и Honeywell. Клиенты Dynamic Engineering используют встроенное аппаратное и программное обеспечение для широкого спектра приложений, включая моделирование, критически важные интерфейсы, управление и контроль, связь, телеметрию и авионику [13]. Среди предоставляемого оборудования стоит выделить:

1. Монитор канала передачи – Плата DESWBO.

Dynamic Engineering SpaceWire Break-Out (DESWBO) контролирует сигналы одиночного канала SpaceWire. Плата имеет два 9-контактных разъема MDM, что облегчает мониторинг в линию обеих сторон канала SpaceWire. DESWBO предназначен для обнаружения и декодирования битовых последовательностей.

Внешний вид платы и доступные для взаимодействия интерфейсы представлены на Рис.8



Рис. 8 – Плата DESWBO

В качестве ответа пользователю могут выдаваться сигналы, указывающие, какие типы символов проходят между узлами, а также содержание символов данных и таймкода. Имеется пользовательский интерфейс на основе светодиодов и контрольных точек [13].

2. Мосты PCIe-SpaceWire и PMC-SpaceWire.

Внешний вид мостов и доступные для взаимодействия интерфейсы представлены на Рис. 9.

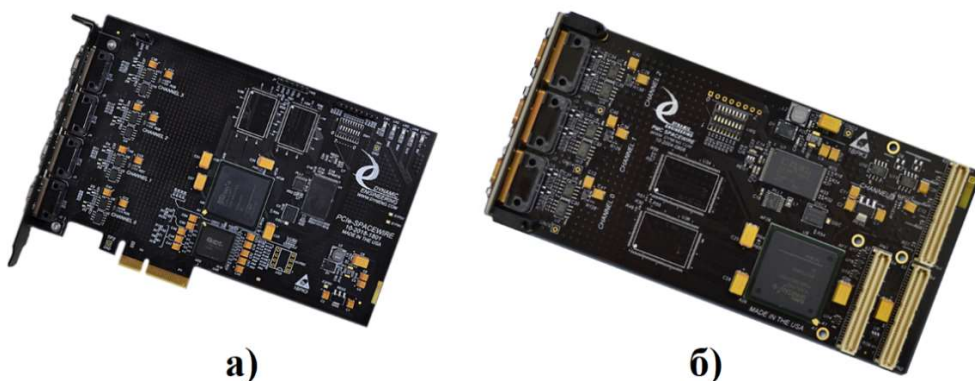


Рис. 9 – (a) Мост PCIe-SpaceWire, (б) Мост PMC-SpaceWire

Мост PCIe-SpaceWire позволяет передавать пакеты с информацией с канала SpaceWire на канал PCIe. Конструкцией моста обеспечиваются четыре полностью независимых и



программируемых порта ввода-вывода LVDS. при помощи данного моста в сети SpaceWire можно установить соединение типа "точка-точка", легко построить систему с иерархической архитектурой с маршрутизаторами или локальную проводную систему. Поддерживается механизм таймкодов. Каждый порт моста имеет память FIFO для поддержки функций RX и TX. Базовые FIFO находятся внутри ПЛИС и используют двухпортовую оперативную память, сконфигурированную как FIFO [13].

Мост PMC-SpaceWire предусматривает четыре независимых и программируемых канала ввода-вывода LVDS. При помощи данного моста так же может быть установлено соединение типа "точка-точка". Поддерживается работа с таймкодами. Каждый порт имеет память FIFO с 4 Кбайт TX и 4 Кбайт RX в стандартной комплектации и до 512 Кбайт в качестве опционального дополнения. Ширина FIFO составляет 32 бита для оптимизации передачи данных с шины PCI. Базовые FIFO находятся внутри ПЛИС и используют двухпортовую оперативную память, сконфигурированную как FIFO [13].

3. Многофункциональное устройство ENET-IO.

Многофункциональное устройство, позволяющее работать в различных конфигурациях: автономно, удаленно с управлением через Ethernet, в качестве моста или коммутатора. Например, ENET-IO уже используется некоторыми заказчиками для преобразования HDLC в Ethernet. Вместе с аппаратурой поставляется графический интерфейс пользователя - DeGUI, позволяющий осуществлять прямое управление. Например, функции по управлению мостом: загрузка файла с помощью графического интерфейса на определенный узел, многоадресная рассылка, захват файла, прослушивание и т.д. Управление работой с помощью графического интерфейса осуществляется на основе браузера или прямого управления с компьютера [13]. Внешний вид устройства и доступные интерфейсы представлены на Рис. 10.



Рис. 10 – Многофункциональное устройство ENET-IO

Вторая группа устройств представлена фирмой STAR-Dundee — компанией аэрокосмического машиностроения, расположенной в Шотландии и специализирующейся на технологиях обработки бортовых данных космических аппаратов. Компания поставляет широкий спектр оборудования для тестирования и разработки, микросхем и IP-ядер для мировых космических агентств и международной аэрокосмической промышленности. STAR-Dundee большим опытом в области технологий SpaceWire и SpaceFibre на мировом уровне. Сотрудники компании более 15 лет работали в Университете Данди со стандартом SpaceWire [14]. Среди предоставляемого оборудования стоит выделить:

1. SpaceWire Brick Mk4.

Устройство с интерфейсами USB 3.0 (также работает с USB 2.0 и USB 1.1) и SpaceWire, которое подходит для использования на всех этапах разработки оборудования SpaceWire: начальная оценка SpaceWire, моделирование прибора, моделирование системы управления, тестирование устройства и поддержка интеграции.



Поддерживаются два интерфейса SpaceWire, высокоскоростная передачи данных, возможность вводить различные типы ошибок по требованию, возможность передавать и принимать временные коды и действовать в качестве ведущего устройства временных кодов, а также поставляется в комплекте с высоко оптимизированным программным обеспечением для передачи пакетов SpaceWire с низкой задержкой непосредственно на главный ПК и с него [14]. Внешний вид и доступные для работы разъёмы представлены на Рис. 11.



Рис. 11 – SpaceWire Brick Mk4

2. Тестер физического уровня SpaceWire (SPLT).

Инструмент, предназначенный для тестирования, валидации и проверки системы SpaceWire на всех уровнях стандарта SpaceWire. Два порта SpaceWire используют специальный интерфейс LVDS, который позволяет целенаправленно манипулировать передаваемыми сигналами для проверки способности тестируемого устройства принимать сигналы различного качества. Драйверы SPLT SpaceWire обеспечивают полное, независимое управление характеристиками сигнала. Аналоговые сигналы LVDS, поступающие эти порты, буферизуются на внешние разъёмы для простого подключения к осциллографу [14]. Внешний вид и доступные для работы разъёмы представлены на Рис. 12.



Рис. 12 – Тестер физического уровня SpaceWire (SPLT).

3. Оконечное устройство SpaceWire EGSE Mk2.

Блок тестирования и разработки, используемый для быстрой эмуляции приборов и оборудования SpaceWire. Он конфигурируется с помощью простого, но мощного языка сценариев, разработанного специально для приложений SpaceWire. Сценарий компилируется на главном компьютере перед загрузкой в блок EGSE Mk2. После конфигурирования EGSE работает независимо от программного обеспечения, обеспечивая производительность в реальном времени. По сравнению с написанием аналогичного программного обеспечения в операционной системе реального времени, EGSE Mk2 может значительно сократить время разработки, риск и стоимость. SpaceWire



EGSE Mk2 управляется главным ПК, подключается через высокоскоростной интерфейс USB 3.0 и питается от блока питания 5 В. Он имеет два порта SpaceWire, четыре внешних триггера SMB и два разъема логического анализатора MICTOR [14]. Внешний вид и доступные для работы разъёмы представлены на Рис. 13.



Рис. 13 – Оконечное устройство SpaceWire EGSE Mk2.

4. Маршрутизатор SpaceWire Mk2S.

Устройство маршрутизации, обеспечивающее восемь интерфейсов SpaceWire, возможность работы в качестве ведущего устройства таймкодов, поддержку высокоскоростной передачи данных, возможность введения различных типов ошибок по требованию, а также поставляется в комплекте с высоко оптимизированным программным обеспечением для передачи пакетов SpaceWire с низкой задержкой непосредственно на ПК и с него. Аппаратное обеспечение SpaceWire Router Mk2S поддерживается программным стеком STAR-System компании STAR-Dundee. STAR-System предоставляет прикладное программное обеспечение с графическим интерфейсом, и, помимо простоты в использовании, эти программы имеют множество дополнительных функций, обеспечивающих пользователю гибкость и контроль над устройством [14]. Для дальнейшей работы с SpaceWire Router Mk2S также предоставляется технический API, который включает в себя примеры кода для тестовых программ, чтобы помочь пользователям начать работу. Внешний вид и доступные для работы разъёмы представлены на Рис. 14.



Рис. 14 – Маршрутизатор SpaceWire Mk2S

Третья группа устройств представлена фирмой RUAG Space — ведущим поставщиком продукции для космической промышленности в Европе и с растущим присутствием в США. Большой опыт и надежность поставляемого оборудования партнёрством с производителями спутников и ракет-носителей по всему миру [15]. Среди предоставляемого оборудования стоит выделить:

1. Оконечное устройство Lynx.



Высокопроизводительный одноплатный компьютер общего назначения, предназначенный для выполнения критически важных задач в жесткой радиационной среде, с гибкой связью, интерфейсом и возможностями хранения данных. Вычислительные возможности обеспечиваются четырехъядерным ARM-процессором, обеспечивающим более 30.000 DMIPS. Специальные функции могут быть реализованы с помощью программируемой матрицы FPGA [15]. Внешний вид и доступные для работы разъемы представлены на Рисунок 15.



Рисунок 15 – Высокопроизводительный одноплатный компьютер Lynx

2. Бортовой компьютер Constellation.

Высококачественный бортовой компьютер, созданный на основе технологии COTS и предлагающий экономически эффективный и высокопроизводительный продукт с коротким сроком изготовления. Компьютер имеет полностью резервированную архитектуру с надежной обработкой отказов и смягчением радиации, что обеспечивает высокую надежность устройства [15]. Внешний вид и доступные для работы разъемы представлены на Рисунок 16.



Рисунок 16 – Бортовой компьютер Constellation

Внедрение рассмотренных устройств представляется перспективным, поскольку значительно увеличит охват, фирм-производителей зарубежных стран, что приблизит разрабатываемый С АПО-SpW к состоянию настоящих космических сетей, используемых на спутниках и космических станциях.

3. Лабораторный стенд SpaceFibre

Аналогичным образом представляется разработка стенда SaceFibre (сокращено С АПО-SpFI). SpaceFibre – стандарт, разработанный международной группой специалистов под эгидой Европейского центра космических исследований и технологий (ESTEC) Европейского космического агентства (ESA), вызывает особенный интерес поскольку представляет собой



следующее поколение сетевых технологий, повышающих скорости передачи данных, при этом не уступая по надёжности предыдущей технологий SpaceWire в рамках которой он и был разработан. Оба стандарта имеют одинаковый формат пакетов, что позволит соединять оба стенда в единую сеть передачи данных и проводить тестирование оборудования на стыке двух технологий.

На данный момент практически не существует общедоступных и открытых устройств, позволяющих собрать сетевую структуру SpaceFibre. Тем не менее ведётся активная разработка как самого стандарта, так и его технологических решений. Аналогичный поэтапный подход к сборке сетевой структуры позволит реализовать модульный подход к организации самого С АПО-SpFi.

4. Реализация С АПО-SpW

В результате проведённой работы была реализована структура бортовой сети SpaceWire, соответствующая первому этапу. Успешная реализация способствовала дальнейшему расширению согласно намеченному плану. На данный момент итоговой версией стала сетевая структура, соответствующая второму этапу.

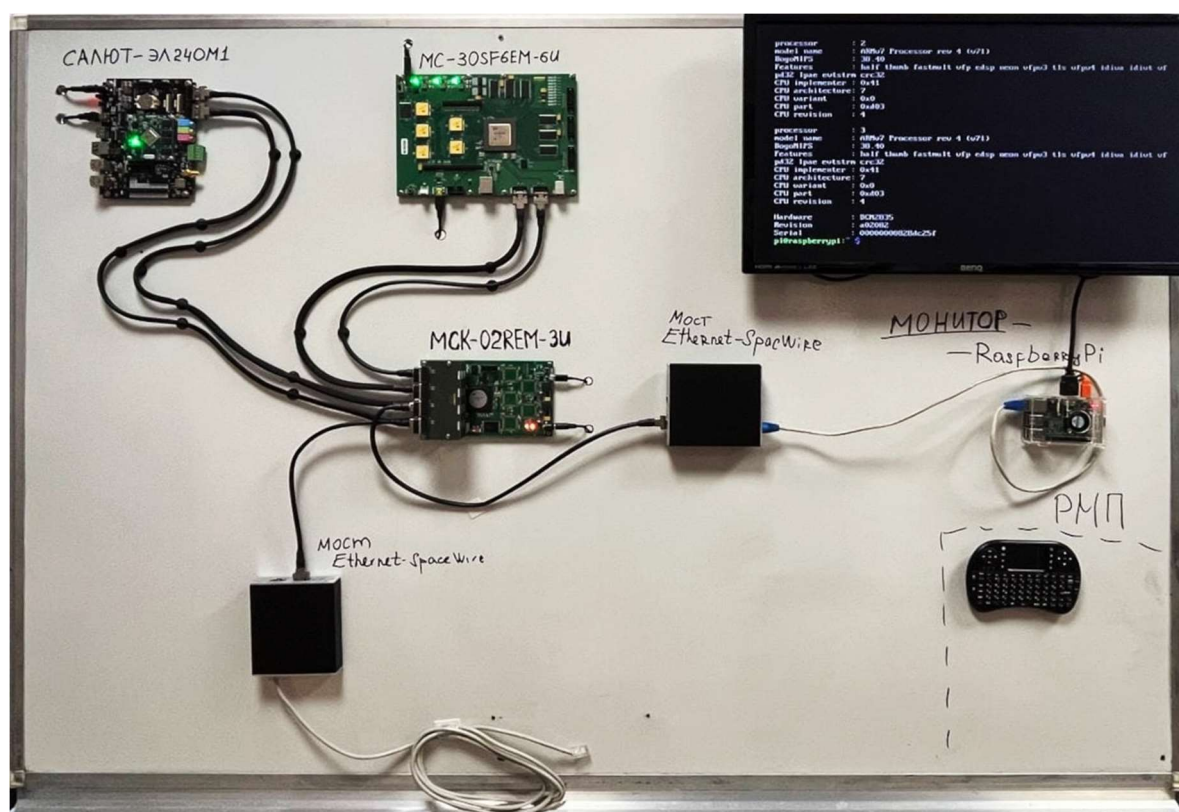


Рис. 17 – Реализация структуры бортовой сети SpaceWire для второго этапа разработки.

Реализация, представленная на Рис. 17 соответствует Рис. 7 и включает в себя:

- Три оконечных устройства:
 - Raspberry Pi 3 Model B+;
 - Плату с процессором 1892BM14Я в отладочном модуле Салют-ЭЛ240М;
 - Плату с процессором 1892BM15АФ в отладочном модуле MC-30SF6EM-6U;
- Один коммутатор 1892КП1Я в отладочном модуле MCK-02REM-3U;
- Два моста Ethernet-SpaceWire;
- Один монитор;



- Средства управления;

Как видно из Рис. 17 С АПО-SpW сможет позволить не только обмен между оконечными устройствами передачи данных, но и возможность подключения исследуемых технических решений от пользователей через интерфейс Ethernet. Таким образом, система позволит тестировать новое сетевое оборудование на совместимость с продукцией компаний MiT и Элвис, а также осуществлять проверку на соответствие стандарту SpaceWire.

В качестве дальнейших планов представляется необходимым разработать программное обеспечение, обеспечивающее взаимодействие аппаратной части, а также провести настройку коммутатора для корректной приемо-передачи информации. Необходимо реализовать удобный интерфейс пользователя для быстрого и наглядного взаимодействия с представленной сетевой структурой.

В качестве прототипа несущей конструкции сеть использует передвижную стойку с белой маркерной доской в качестве крепёжной платформы. Общий вид конструкции представлен на Рис. 18.

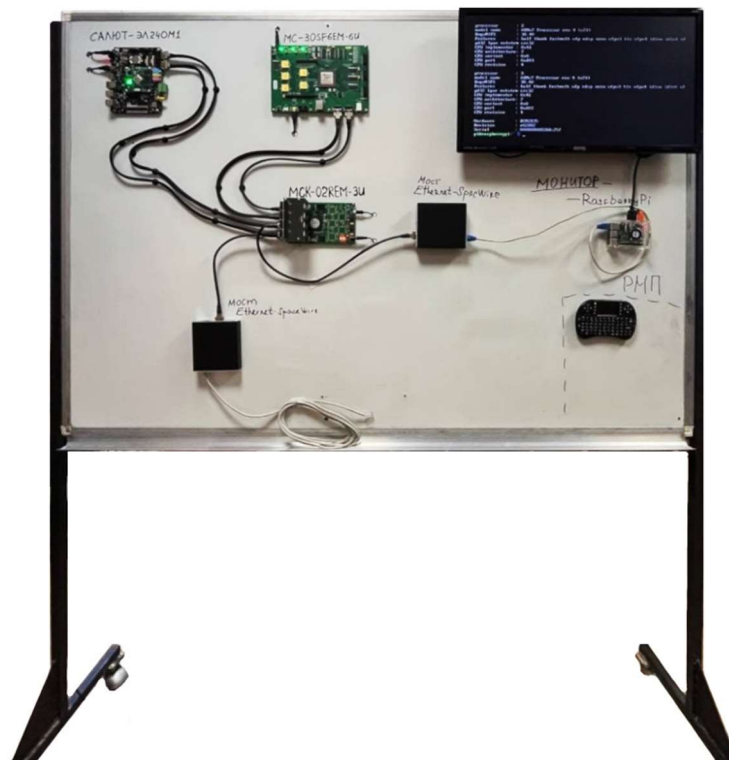


Рис. 18 – Общий вид стенда SpaceWire (С АПО-SpW).

В дальнейшем предполагается доработка существующей крепёжной системы, плана по разводке кабелей и подключению дополнительных сетевых устройств, расширяющих доступный функционал. В итоговой версии планируется применение стеллажей с модульной сборкой для каждого из разрабатываемых стендов. В качестве крепёжной системы планируется использование стальных сплошных или перфорированных листов, дополнительных полок и крепежей. Однако необходимо учесть, что конструкция должна быть устойчивой и должна иметь возможность погашения сильных вибраций, способных нанести вред эталонной аппаратуре.

Заключение

В результате проведённого исследования были определены цели и задачи, а также обоснована актуальность разработки стенда по аппаратно-программному исследованию бортовых сетей. На данный момент в России нет аналогов данной разработки, позволяющей проводить тестирование технических новинок сетевых устройств для работы с бортовыми



сетями SpaceWire и SpaceFibre. Кроме того, отсутствуют аналоги, позволяющие проводить исследования и разработку, а также практическую проверку новых сетевых и транспортных протоколов для бортовых сетей. В связи с этим проводимые исследования кажутся особенно актуальными.

В результате были описаны три основных этапа разработки лабораторного стенда SpaceWire. Первый из них позволяет создать базовую сетевую структуру и обосновывает выбор программного обеспечения для работы со стендом. Выбранная операционная система представляет собой быстрое, универсальное и удобное средство взаимодействия с пользователем и полностью отвечает всем заявленным в статье требованиям.

Второй этап представлен внедрением специализированной сетевой аппаратуры от стороннего производителя и усложнение структуры бортовой сети. Благодаря этому этапу появляется возможность подключения сторонней исследовательской аппаратуры.

Третий этап суммарно представляет собой все последующие усовершенствования и расширения, необходимые для более полного охвата всех типов устройств и фирм-производителей. В результате проведенного исследования описаны крупнейшие зарубежные производители сетевой аппаратуры SpaceWire, а также определены основные технические средства, необходимые для расширения функциональных возможностей стенда.

Раздел, посвященный стенду стандарта SpaceFibre, описывает перспективы развития и необходимость в получении аппаратуры, позволяющей продемонстрировать достоинства новой технологии. В качестве дальнейших исследований предполагается поиск фирм, выпускающих сетевое оборудование SpaceFibre, а также продумывание поэтапной реализации структуры бортовой сети из доступных для использования технологических средств.

Раздел, посвященный реализации С АПО-SpW, представляет наглядное описание реализации результатов теоретической подготовки. Итоговый вид полностью соответствует ожидаемому и отвечает всем поставленным требованиям. В дальнейшем предполагается усовершенствование прототипной модели несущей конструкции, и в последствии замена её на финальную версию, отвечающую сформулированным в последнем разделе требованиям.

Ближайшие исследования предполагается посвятить разработке программного обеспечения, тестовых сценариев и удобного, простого в обращении пользовательского интерфейса, обеспечивающего настройку всей сети и выполнения тестовых сценариев.

В итоге можно сказать, что поставленная цель по разработке системы для аппаратно-программного исследования протоколов бортовой сети SpaceWire успешно выполнена. Теоретически определены ключевые этапы разработки и спектр необходимой аппаратуры. Результат работы демонстрирует успешную реализацию подготовленной теории на практике. Реализуемая система является востребованным средством разработки и не имеет аналогов в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Northrop Grumman запустит новую миссию по обслуживанию спутников в 2024 году. Журнал «Всё о Космосе» [Электронный ресурс]. URL: <https://aboutspacejournal.net/2022/02/21/> (дата обращения: 12.03.2022)
2. Sycheva A. Northrop Grumman запустила на орбиту уже вторую сервисную станцию, которая оживляет спутники связи без топлива. ITnan [Электронный ресурс]. URL: <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=551460> (дата обращения: 12.03.2022)
3. Бадаева А. Р., Лысенко И. С. Проблема космического мусора в околоземном пространстве // Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Социально-экономические и гуманитарные науки, 2010. С. 389–390.



4. N2YO.com SATELLITES BY COUNTRIES AND ORGANIZATIONS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.n2yo.com/satellites/?c=&t=country> (дата обращения: 02.03.2022)
5. Аксенов П. BBC News. Россия и Китай показали лунную станцию. Ее хотят построить к 2035 году [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bbc.com/russian/news-57499390> (дата обращения: 02.03.2022)
6. BBC News. Китайская космическая станция: корабль “Шэньчжоу” везет первый экипаж на модуль “Тяньхэ” [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bbc.com/russian/news-57496784> (дата обращения: 02.03.2022)
7. Интерфакс. Ракета SpaceX стартовала на орбиту со 105 спутниками [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interfax.ru/world/815292> (дата обращения: 02.03.2022)
8. SpaceWire Standard. Space Technology Centre. University of Dundee ECSS – Space Engineering. "SpaceWire – Links, Nodes, Routers and Networks". ECSS-E-ST-50-12 Draft H1: July 2018
9. ECSS-E-ST-50-11, SpaceFibre - Very high-speed serial link, 15 мая 2019 года
10. MiT. Микропроцессорные технологии [Электронный ресурс]. URL: http://www.sicmit.ru/produksija_oborudovanie/ethernet-spw-bridge/ (дата обращения: 15.02.2022)
11. Raspberry Pi [Электронный ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (дата обращения: 15.02.2022)
12. Элвис [Электронный ресурс]. URL: <https://elvees.ru/> (дата обращения: 15.02.2022)
13. Dynamic Engineering. The Embedded Solutions Experts Trusted. Dependable Service for Decades [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dyneng.com/> (дата обращения: 15.02.2022)
14. STAR-Dundee [Электронный ресурс]. URL: <https://www.star-dundee.com/> (дата обращения: 15.02.2022)
15. RUAG Group Site [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ruag.com/> (дата обращения: 15.02.2022)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Синёв Николай Иванович –

Магистр, инженер

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: nikolay.sinyov@guap.ru

Карандашев Александр Александрович –

Магистр, инженер

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: aleksandr.karandashev@guap.ru

Оленев Валентин Леонидович –

кандидат технических наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: Valentin.Olenev@guap.ru

Чумакова Надежда Юрьевна –

Магистр, инженер

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: nadezhda.chumakova@guap.ru



Сыщиков Алексей Юрьевич –

Заведующий лабораторией

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: alexey.syschikov@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sinev Nikolay Ivanovich –

Master's degree, Engineer

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: nikolay.sinyov@guap.ru

Karandashev Alexander Alexandrovich –

Master's degree, Engineer

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: aleksandr.karandashev@guap.ru

Olenev Valentin Leonidovich –

PhD. tech. Sciences, associate Professor

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: *Valentin.Olenev@guap.ru*

Chumakova Nadezhda Yurievna –

Master's degree, Engineer

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: nadezhda.chumakova@guap.ru

Syschikov Alexey Yurevich –

Head of the Laboratory

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: alexey.syschikov@guap.ru