



ПРОТОКОЛЫ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИХ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ

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

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье представлена концепция полностью оптических бортовых сетей (ПОбС). Описан стек протоколов ПОбС, подробно рассмотрена работа транспортного уровня, канального уровня и уровня администрирования стека протоколов ПОбС. Также в статье описана программная модель, предназначенная для проверки корректности работы стека протоколов ПОбС с функциональной точки зрения, и рассмотрен пример работы разработанной программной модели.

Ключевые слова: полностью оптическая бортовая сеть, протоколы передачи данных, стек протоколов, авиационный комплекс, программная модель.

Для цитирования:

Оленев В. Л., Чумакова Н. Ю., Синёв Н. И., Сыщиков А. Ю. Протоколы полностью оптических бортовых сетей // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(30), ISSN 2077-5687. – СПб.: ГУАП., 2021 – с. 87–98. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-87-98.

ALL-OPTICAL ON-BOARD NETWORKS PROTOCOLS

V. L. Olenev, N. Y. Chumakova, N. I. Sinyov, A. Y. Syschikov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article presents the concept of all-optical on-board networks (AOON). AOON protocol stack is described, the operation of the transport layer, data link layer and the management layer of the AOON protocol stack is considered in details. The article also describes a software model designed to check the correctness of operation of the AOON protocol stack from a functional point of view, and an example of the developed software model is provided.

Keywords: all-optical on-board network, communication protocols, protocol stack, aviation complex, program model.

For citation:

Olenev V. L., Chumakova N. Y., Sinev N. I., Syschikov A. Y. All-optical on-board networks protocols // System analysis and logistics.: №4(30), ISSN 2077-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2021 – p. 87-98. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-87-98.

Введение

Бортовые авиационные сети нового поколения имеют ряд серьезных ограничений, таких как: время принятия решений, время реакции на экстремальные условия эксплуатации, требования по наличию сложных механизмов защиты, обработки и доставки данных [1, 2]. Создание таких сетей влечет за собой совмещение в одной сети большого количества различных коммуникационных технологий и протоколов, лишним затратам средств, усилий и времени на проектирование [3]. Создание единого интерфейса, объединяющего все функциональные задачи, соединяющего в единую сеть все модули и блоки бортового оборудования, позволило бы значительно уменьшить количество интерфейсных устройств и проводных соединений. Построение такого интерфейса возможно на базе полностью оптических бортовых сетей [4, 5].

1. Полностью оптическая бортовая сеть

Полностью оптическая бортовая сеть (ПОбС) представляет класс сетей, в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, ретрансляции играют не электронные, а оптические технологии. Полностью оптические сети претендуют на роль главенствующей сетевой технологии, так как волоконно-оптические линии передач (ВОЛП) обладают рядом преимуществ перед проводными (медными) системами связи [6].



Техническим результатом, достигаемым при реализации ПОБС, является выполнение обмена информации в бортовой сети в режиме реального времени с гарантированной доставкой сообщений, реализация процедуры реконфигурации комплекса бортового оборудования при отказах и как следствие повышение надёжности и безопасности полёта.

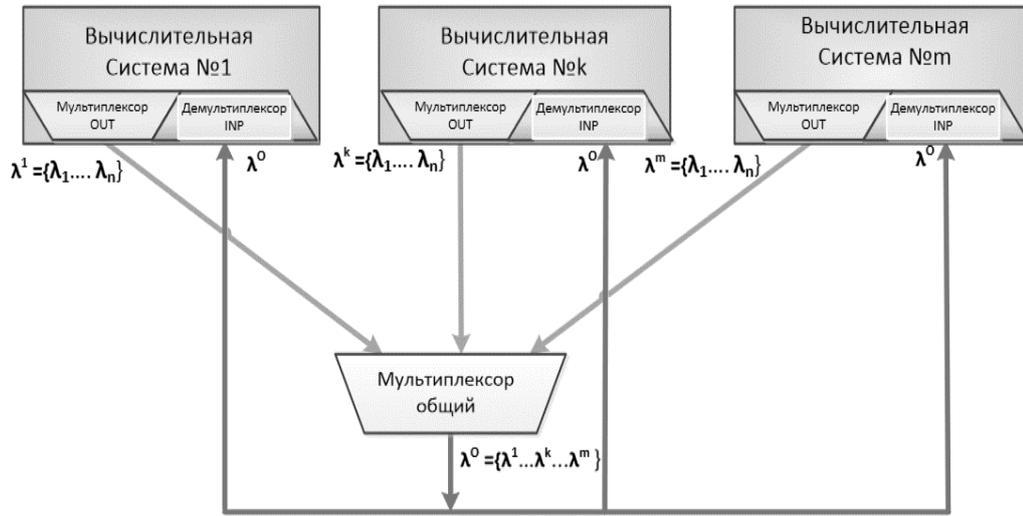


Рис. 1. Концепция передачи данных в полностью оптической сети

ПОБС для коммутации, мультиплексирования и ретрансляции используют чисто оптические технологии и обладают целым рядом преимуществ [7,8]. Первым из них является технология спектрального уплотнения, которая позволяет «разделить» единый физический канал на множество оптических логических каналов по длине волны (λ -канал, лямбда) для увеличения пропускной способности [9]. Каждый оконечный узел сети ПОБС для передачи данных может использовать один или несколько фиксированных λ -каналов. Все сигналы от узлов собираются в оптическом разветвителе (или мультиплексоре), где они смешиваются и распределяются по выходным полюсам, при этом каждый узел ПОБС может получать и читать этот сигнал. Общая концепция полностью оптической сети показана на Рис. 1.

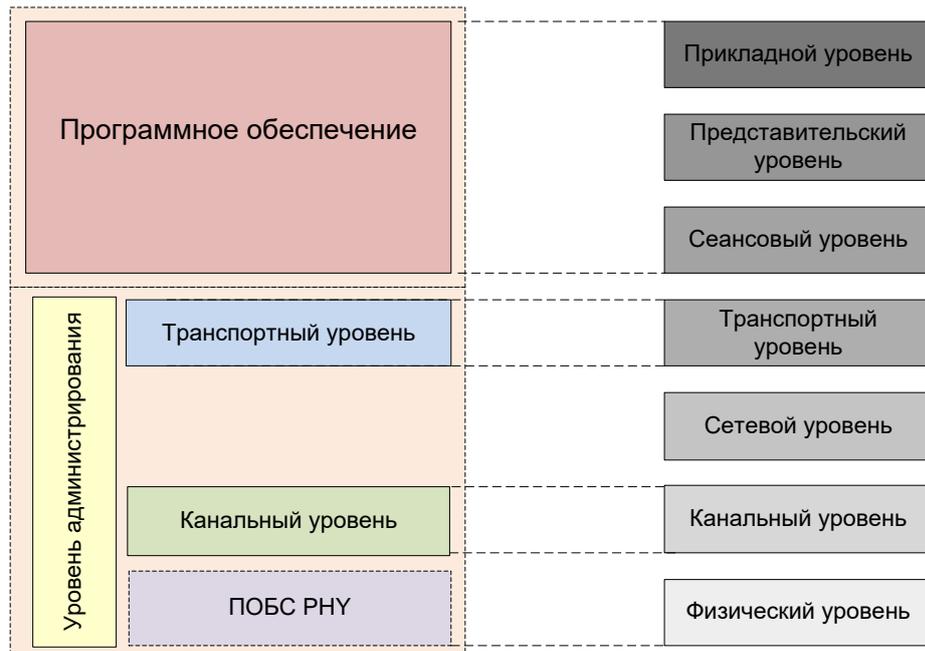


Рис. 2. Соотнесение стека протоколов ПОБС с моделью OSI



Однако, сама технология ПОБС не обеспечивает максимальную функциональность и полезность сети для потенциальных пользователей. Для организации эффективного обмена данными необходимо создать целый стек протоколов, который позволит обеспечить различные скорости передачи данных, гибкость конфигурации протокола и предоставление различных качеств сервиса. Такой стек протоколов полностью оптической бортовой сети (ПОБС) должен состоять из нескольких уровней: физический, канальный, транспортный уровень и уровень администрирования. Основные принципы работы физического уровня описаны в значительном количестве работ. Сетевой уровень в ПОБС отсутствует в силу специфики построения полностью оптической бортовой сети. Поэтому, в рамках данной статьи сфокусируемся на разработанных канальном, транспортном уровнях и уровне администрирования ПОБС. Стек протоколов ПОБС и его соответствие эталонной модели OSI изображено на Рис. 2.

В дальнейших разделах будут подробно рассмотрены канальный уровень, транспортный уровень и уровень администрирования стека протоколов ПОБС.

2. Канальный уровень ПОБС

Протокол канального уровня ПОБС определяет взаимодействие между канальными узлами сети, регламентирует форматы передаваемых кадров данных и правила передачи сообщений абонентами канального уровня. Также в задачи канального уровня входит обнаружение ошибок. На Рис. 2 представлено место протокола канального уровня в семействе протоколов для ПОБС и его соответствие эталонной модели OSI.

На канальном уровне каждой лямбда, на которой может осуществляться передача данных, ставится в соответствие блок передачи данных, и каждой лямбда, на которой может осуществляться прием данных, ставится в соответствие блок приема данных. Одной лямбда может ставиться в соответствие только блок приема, либо только блок передачи. Канальный уровень также включает в себя Блок контроля режима/состояния, предназначенный для управления функционированием канального уровня и отслеживания его состояния.

На Рис. 3 представлена схема взаимодействия канального уровня с транспортный уровнем, физическим уровнем, а также уровнем администрирования.

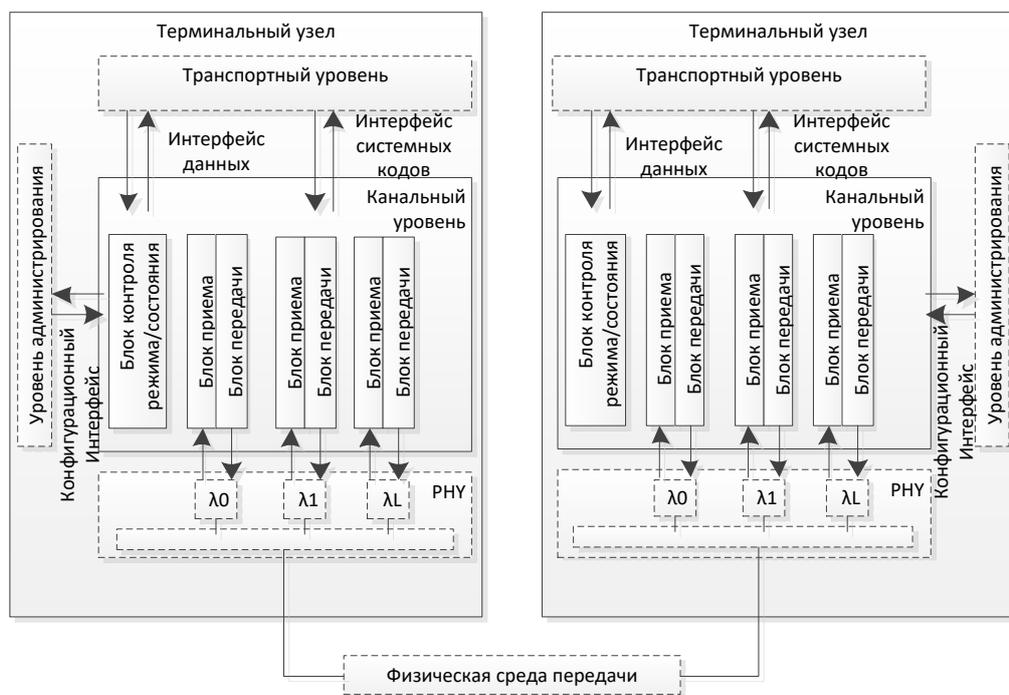


Рис. 3. Схема взаимодействия терминальных узлов



Канальный уровень взаимодействует с вышележащим транспортным уровнем посредством интерфейсов приема/передачи пакетов данных, а также интерфейсов приема/передачи системных кодов. Обмен данными между протоколами канального и транспортного уровня идет в терминах пакетов данных и системных кодов.

Также канальный уровень взаимодействует с нижележащим физическим уровнем посредством интерфейсов приема/передачи данных по стандарту 8b/10b, и с уровнем администрирования посредством конфигурационного интерфейса.

Обмен информацией между протоколами транспортного уровня в различных терминальных узлах идет в терминах кадров. Длина кадра всегда кратна 4-м символам 8b/10b.

Канальный уровень поддерживает два режима функционирования: режим без обеспечения гарантированной доставки данных и режим с обеспечением гарантированной доставки данных. Оба режима функционирования поддерживают выявление ошибок, которые могут возникнуть при передаче данных. Для этого в передаваемых кадрах используются контрольные суммы (CRC).

2.1. Режим без обеспечения гарантированной доставки данных

Режим без обеспечения гарантированной доставки данных позволяет обнаруживать ошибки в ходе передачи данных. В случае возникновения ошибок данные не передаются повторно, поэтому часть передаваемых данных может быть утрачена. Также в данном режиме не поддерживается управление потоком данных от приемника.

Режим без обеспечения гарантированной доставки поддерживает широковещательную доставку данных на канальном уровне. Это означает, что передаваемый пакет может быть адресован одному или нескольким приемникам, функционирующим на одной лямбда. Также данный режим поддерживает широковещательную передачу системных кодов.

В случае обнаружения ошибки в принимаемом кадре данных приемная сторона передает на транспортный уровень принятую часть пакета и символ ошибочного конца пакета ЕЕР. Последующие принимаемые кадры данных, относящиеся к пакету, в ходе приема которого произошла ошибка, отбрасываются. Прием пакетов с передачей их на транспортный уровень возобновляется с заголовка очередного пакета.

Если на приемной стороне недостаточно места в приемном буфере канального уровня для приема очередного кадра данных, то кадры данных отбрасываются. Если на транспортный уровень была передана часть пакета данных, то передается ошибочный конец пакета ЕЕР. Прием кадров данных возобновляется после того, как в приемном буфере появляется свободное место (начинается с момента приема кадра, содержащего заголовок очередного пакета).

2.2. Режим с обеспечением гарантированной доставки данных

Режим с обеспечением гарантированной доставки данных также, как и режим без обеспечения гарантированной доставки данных позволяет обнаруживать ошибки в ходе передачи данных. Однако, в данном режиме, в случае возникновения ошибок данные передаются повторно.

Режим с обеспечением гарантированной доставки данных не поддерживает широковещательную доставку данных на канальном уровне. Однако, в данном режиме поддерживается широковещательная рассылка системных кодов.

3. Транспортный уровень ПОбС

Протокол транспортного уровня ПОбС определяет транспортное взаимодействие узлов в сети, регламентирует форматы передаваемых данных и правила передачи сообщений между абонентами бортовой сети. Транспортный уровень обеспечивает транспортировку данных между удаленными оконечными узлами сети с предоставлением требуемого качества сервиса.



На Рис. 1 представлено место протокола транспортного уровня в семействе протоколов для ПООБС и его соответствие эталонной модели OSI.

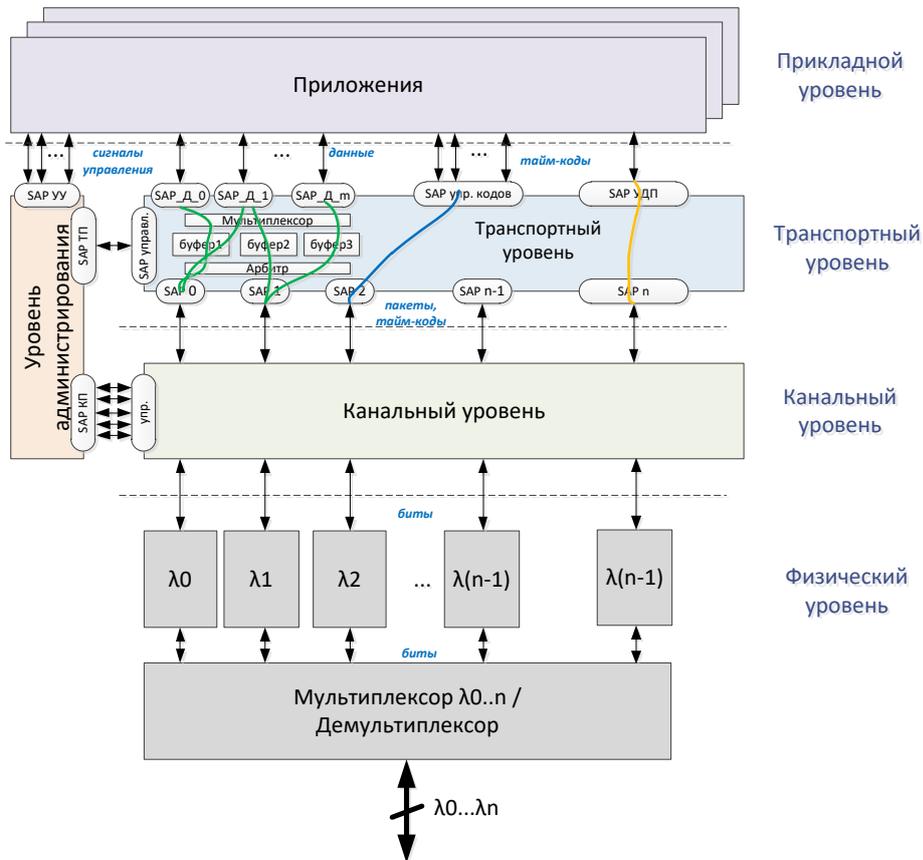


Рис. 4. Архитектура стека протоколов ПООБС

На Рис. 4 представлена схема взаимодействия уровней стека протоколов ПООБС.

Транспортный уровень взаимодействует с вышележащим прикладным уровнем посредством интерфейсов данных и интерфейса системных кодов. Интерфейсы данных отвечают за передачу и прием пакетов данных, управляющих пакетов, команд и ответов на команды от приложений. Число интерфейсов данных соответствует количеству приложений, с которыми осуществляется работа. Интерфейс системных кодов отвечает за передачу временных меток и распределенных прерываний.

С нижележащим канальным уровнем транспортный уровень взаимодействует посредством интерфейсов приема/передачи пакетов данных, а также интерфейсов приема/передачи системных кодов.

Также транспортный уровень взаимодействует с уровнем администрирования через конфигурационный интерфейс. Данный интерфейс отвечает за управление стеком протоколов ПООБС: очистку буферов, сброс настроек протокола в значения по умолчанию, конфигурацию протокола.

Интерфейсы транспортного уровня, предназначенные для взаимодействия с прикладным уровнем, канальным уровнем и уровнем администрирования представлены на Рис. 5.

Сообщения и управляющие команды от приложений передаются на удаленные оконечные узлы ПООБС в специализированных транспортных пакетах транспортного уровня. Транспортный уровень обеспечивает передачу следующих пользовательских типов данных: управляющие пакеты, пакеты данных, пакеты меток времени, коды прерываний, пакеты команд (записи, чтения, чтения-модификации-записи), а также пакеты ответов на команды



(записи, чтения, чтения-модификации-записи). Также транспортный уровень обеспечивает как одноадресную, так и многоадресную передачу данных.

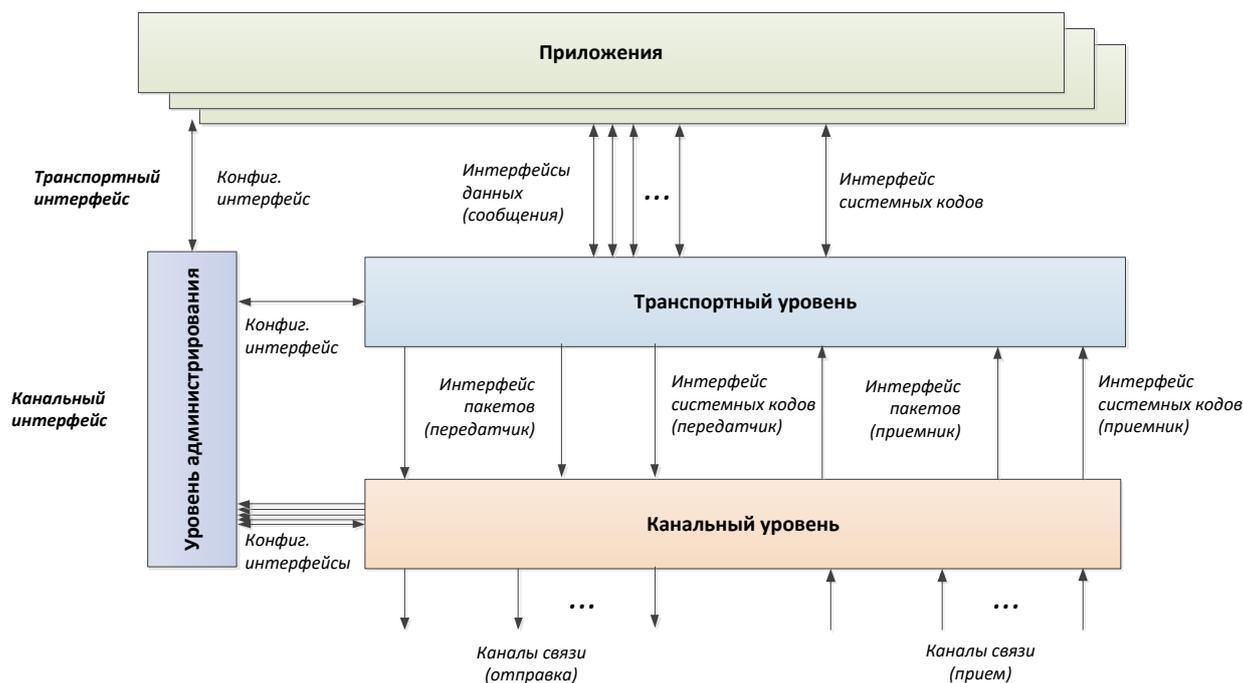


Рис. 5. Интерфейсы транспортного уровня

3.1. Прием и передача данных

На этапе конфигурации стека протоколов ПОДС устанавливается режим передачи данных. Транспортный уровень поддерживает два режима передачи данных:

1. Режим пакетной передачи данных. В данном режиме транспортный уровень осуществляет прием и передачу пакетов данных, служебных пакетов, а также управляющих пакетов. Режим пакетной передачи данных устанавливается по умолчанию.
2. Режим удаленного доступа к памяти. В данном режиме транспортный уровень осуществляет прием и передачу пакетов команд и пакетов ответов на команды. Поддерживается три типа команд: команды записи, команды чтения и команды чтения-модификации-записи.

Транспортный уровень обеспечивает работу различных механизмов на приемнике и передатчике. На передатчике транспортный уровень обеспечивает следующие механизмы:

1. Прием пакетов данных от приложений, обработка принятых пакетов, а также дальнейшая отправка пакетов в канал в соответствии с адресом узла-получателя.
2. Прием пакетов команд от приложений, обработка принятых пакетов, а также дальнейшая отправка пакетов в канал в соответствии с адресом узла-получателя.
3. Прием меток времени и управляющих кодов от приложений, а также их дальнейшая отправка в каналы интерфейсы без буферизации.
4. Буферизация пакетов данных от приложений. Пакеты записываются в буферы повтора в соответствии с их типами (высокоприоритетные, низкоприоритетные и управляющие пакеты).
5. Многоадресная рассылка пакетов данных.
6. Обеспечение таких качеств сервиса, как: негарантированная доставка данных, гарантированная доставка данных, доставка данных в соответствии с приоритетами на передатчике, планирование.
7. Синхронизация времени при передаче данных в соответствии с расписанием.



На приемнике транспортный уровень обеспечивает следующие механизмы:

1. Прием пакетов данных из канальных интерфейсов, обработка принятых пакетов, а также передача принятых пакетов приложениям в соответствии с адресом узла-передатчика и номером приложения.
2. Прием пакетов команд из канальных интерфейсов, обработка принятых пакетов, а также передача принятых пакетов приложениям в соответствии с адресом узла-передатчика и номером приложения.
3. Прием меток времени и управляющих кодов из канальных интерфейсов, а также их дальнейшая отправка в приложения.
4. Буферизация принятых пакетов данных. Пакеты записываются в буферы в соответствии с их типами (высокоприоритетные, низкоприоритетные и управляющие пакеты).
5. Обнаружение идентичных пакетов, полученных из сети. Гарантия единичного получения каждого пакета (в случае широковещания или ошибок при отправке пакетов подтверждения).
6. Обеспечение таких качеств сервиса, как: гарантированная доставка данных (отправка пакетов подтверждения и контроль потока), доставка данных на прикладной уровень узла-приемника в соответствии с приоритетами.

4. Уровень администрирования ПОБС

Уровень администрирования предназначен для выполнения функций настройки канального и транспортного уровня ПОБС. Уровень администрирования предоставляет возможность записи и чтения настроек транспортного и канального уровня, а также позволяет осуществлять сброс настроек в значения по умолчанию и очистку буферов. На Рис. 1 представлено место протокола уровня администрирования в семействе протоколов для ПОБС и его соответствие эталонной модели OSI.

Интерфейсы уровня администрирования, предназначенные для взаимодействия с канальным и транспортным уровнем, а также уровнем приложения представлены на Рис. 5. Уровень администрирования взаимодействует с уровнем приложения посредством конфигурационного интерфейса, предназначенного для приема и передачи примитивов на вышележащие уровни. С канальным и транспортными уровнями уровень администрирования взаимодействует посредством конфигурационных интерфейсов, предназначенных для управления данными уровнями.

Уровень администрирования находится ниже уровня приложений. Он хранит значения конфигурационных параметров и управляет ими на соответствующих уровнях. Уровень администрирования не отвечает за транспортировку данных между абонентами, и не выполняет настройку и управление удаленных абонентов ПОБС.

Текущие значения конфигурационных параметров и их значения по умолчанию хранятся в собственном конфигурационном пространстве уровня администрирования – в базе управляющей информации. В базе управляющей информации содержатся такие конфигурационные параметры, как:

- конфигурационные параметры транспортного уровня (текущие значения и значения по умолчанию);
- конфигурационные параметры для инициализации канального уровня;
- таблица планирования транспортного уровня;
- параметры для настройки соединения;
- адреса блоков приема и блоков передачи;
- и другие.

5. Программная модель функционирования стека протоколов ПОБС



Основной целью в процессе написания спецификации протокола является определение и описание основных его функций, а также создание его исполняемой программной модели. Эта программная модель используется для проверки корректности работы протокола с функциональной точки зрения, а также для определения необходимых аппаратных ресурсов для работы и архитектуры системы. Программная модель протокола является сложным многокомпонентным параллельным программным комплексом, поэтому задачи разработки и написания такой модели также являются сложными и трудоемкими [10].

После написания спецификации финализированные версии моделей позволяют исследователям тестировать сценарии, которые трудно или дорого имитировать в реальности. Симуляторы могут использоваться для проектирования различных топологий сети с использованием различных типов узлов. Отсюда появилась необходимость создания средства диагностирования оптической бортовой сети на базе разработанной модели стека протоколов ПОБС.

Было разработано программное обеспечение «Программная модель стека протоколов полностью оптической бортовой сети для отработки функционирования протокола в составе программной модели взаимодействия двух сетевых узлов точка-точка». Данное ПО предназначено для решения задачи моделирования спецификации транспортного уровня ПОБС, спецификации канального уровня ПОБС, а также спецификации уровня администрирования ПОБС с целью отработки протоколов.

Разработанное программное обеспечение позволяет:

1. Работать со средой моделирования посредством графического пользовательского интерфейса;
2. Выполнять моделирование различных тестовых сценариев;
3. Формировать лог-файлы, содержащие подробную диагностическую информацию о ходе выполнения моделирования.

В общем случае бортовая сеть состоит из элементов трех основных типов: каналов, терминальных узлов и коммутационного оборудования. При разработке протокола, обеспечивающего взаимодействие типа «точка-точка» моделируется сеть, компонентами которой являются только узлы и среда передачи данных. Данная среда передачи данных является упрощенной моделью каналов связи полностью оптической бортовой сети для передачи пакетов, меток времени (тайм-кодов) и прерываний между узлами. Модели протоколов и прикладных процессов (приложений) размещаются в узлах.



Рис. 6. Общая структура ПО

Посредством разработанного программного обеспечения было проведено исследование механизмов транспортного уровня, канального уровня и уровня администрирования. Для этого было проведено тестирование передачи различных пакетов с различным качеством



сервиса, прерываний, меток времени, различных команд удаленного доступа в память, а также запросов для уровня администрирования.

На Рис. 7 и Рис. 8 представлен графический пользовательский интерфейс разработанного программного обеспечения. После запуска программного обеспечения отображается главное окно (Рис. 7), в котором представлена топология сети ПОБС типа «точка-точка».

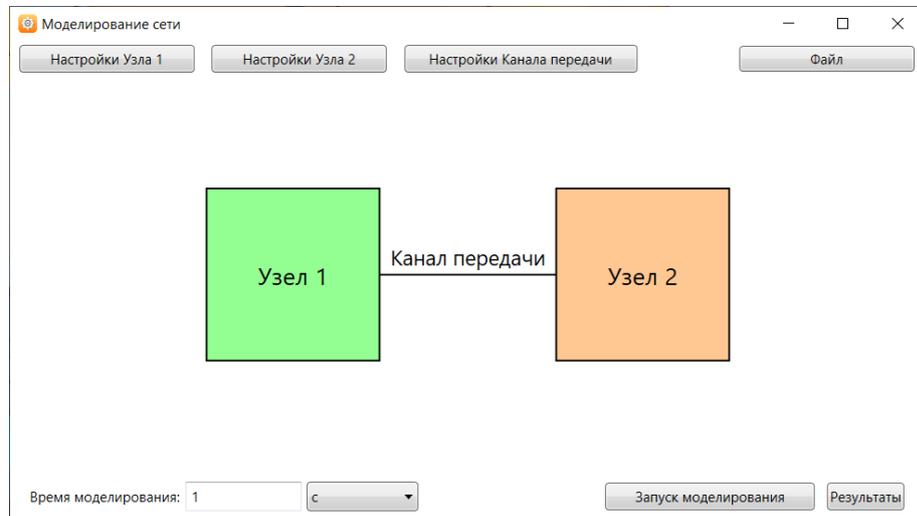


Рис. 7. Главное окно программной модели

В качестве примера рассмотрим передачу низкоприоритетных пакетов с качеством сервиса «Гарантированная доставка данных». Параметры передачи приведены в Таблица 1. Пользователь программного обеспечения может настроить данные параметры в окне настройки параметров (Рис. 8).

Рис. 8. Настройка параметров



Заключение

В статье были подробно рассмотрены уровни стека протоколов ПОБС: транспортный, канальный, и уровень администрирования. Спецификации данных уровней легли в основу проекта стандарта на организацию передачи данных для полностью оптической авиационной бортовой сети.

Также на основе разработанных спецификаций стека протоколов ПОБС было разработано программное обеспечение «Программная модель стека протоколов полностью оптической бортовой сети для отработки функционирования протокола в составе программной модели взаимодействия двух сетевых узлов точка-точка». Данная программная модель включает в себя программные реализации протоколов, а также графический пользовательский интерфейс, предназначенный для настройки двух узлов для передачи данных, настройки потоков данных и запуска модели ПОБС на исполнение. При помощи тестирования модели протоколов выполнено исследование разработанного протокола.

Созданный стек протоколов для комплекса бортового оборудования на базе оптической сети позволяет обеспечивать как эффективное использование ресурсов ПОБС, так и сокращение программных и аппаратных затрат при подготовке и реализации сетевого обмена, что обеспечит экономичность разработки, производства и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейнин Ю.Е., Новиков В.М., Платошин Г.А. Особенности применения интерфейса SpaceWire в комплексах бортового оборудования // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы Авионики – 2018. – № 7 (40). – С. 41-69.
2. Olenev V., Lavrovskaya I., Podgornova E., Sheynin Y. Deterministic services for SpaceWire networks // Proceedings of 7th International SpaceWire Conference Program. – 2016. – С. 159-166.
3. Платошин Г.А., Сельвесюк Н.И., Новиков В.М. Перспективы создания однородного бортового многоуровневого интерфейса, для построения бортовой информационно-вычислительной сети // Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования: материалы Третьей Всероссийской научно-технической конференции “Академические Жуковские Чтения” – 2017. – С. 1-7.
4. Sabella R., Lugli P. All-Optical Networks // High Speed Optical Communications. – 1999. – С. 253-299.
5. Alferness R.C. The all-optical networks // 2000 International Conference on Communication Technology Proceedings. – 2000. – С. 1-9.
6. Новиков В.М. Концепция применения полностью оптических бортовых сетей при решении задач динамической реконфигурации бортовой информационно-вычислительной среды на базе РМЭ // Сборник научных статей по материалам пятой Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». – 2017. – С. 27-29
7. Новиков В.М. Формирование способов построения комплекса бортового оборудования на базе однородной оптической среды // Сборник материалов международной научной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в инженерных и бизнес-приложениях». – Воронеж: Издательский дом ВГУ. – 2018. – С.237-254
8. Пат. 2694137. Система передачи информации в реальном времени на базе полностью оптической спектрально-уплотнённой бортовой сети реального времени – 2019 год.
9. Rani A., Bhamrah M.S., Dewra S. Performance evaluation of the dense wavelength division multiplexing system using reconfigurable optical add/drop multiplexer based on digital switches // Opt Quant Electron 52, 480 – 2020.



10. Оленев В.Л. Проектирование программных моделей сетевых протоколов для встроенных систем // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Санкт-Петербург, ГУАП – 2012 г.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

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

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

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