

УДК 004.728.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОКОЛА ETHERNET-SPACEWIRE

© 2017 А.Ю. Виноградов, Е.Н. Яблоков

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Статья поступила в редакцию 21.03.2017

Статья посвящена исследованию протокола Ethernet-SpaceWire на канальном уровне. Сравниваются характеристики и форматы пакетов SpaceWire, Ethernet и Ethernet-SpaceWire.

Ключевые слова: *SpaceWire, Ethernet, Ethernet-SpaceWire, канальный уровень, точка-точка*

Протокол Ethernet-SpaceWire позволяет передавать пакеты SpaceWire по сети Ethernet. Данный протокол работает только на канальном уровне модели OSI, отвечающем за доставку кадров между устройствами, подключенными к одному сегменту сети. Основные функции канального уровня: получение доступа к среде передачи; аппаратная адресация; обеспечение достоверности принимаемых данных. Стандарт SpaceWire используется для создания высокоскоростной коммуникационной инфраструктуры для всех видов бортовых коммуникаций. Каналы SpaceWire – это полнодуплексные последовательные каналы типа «точка-точка» [1]. На рис. 1 изображен стек протоколов стандарта SpaceWire. Стандарт описывает транспортный, сетевой, канальный и физический уровни модели OSI. Канальный уровень состоит из пакетного уровня и уровня обмена, а физический – из символического, сигнального и физического.

На рис. 2 изображён пакет стандарта SpaceWire, который состоит из трёх полей: адрес назначения, передаваемые данные и символ конца пакета. Адрес назначения имеет размер от нуля символов. Символ конца пакета может быть либо символом нормального конца пакета (EOP), либо ошибочным (EEP). Стандарт позволяет передавать данные на скорости до 400 мегабит/сек и на расстояние до 10 м. В отличие от SpaceWire в Ethernet для передачи данных используются фреймы [3]. Фрейм изображён на рис. 3. Во фрейме содержится MAC адрес назначения, MAC адрес отправителя, тип фрейма, полезные данные и контрольная сумма. Размер поля с полезными данными от 46 до 1500 байт. Данные передаются на скорости до 100 мегабит для FastEthernet и до 1000 мегабит для GigabitEthernet.

Протокол Ethernet-SpaceWire работает на канальном уровне OSI [2]. Он записывает пакет SpaceWire внутрь фрейма Ethernet и дописывает специальную служебную информацию, которая позволит извлечь пакет. Основная задача этого протокола – передавать пакеты SpaceWire в фреймах Ethernet. В каждом фрейме содержится информация о типе, номере и размере передаваемого SpaceWire пакета [2].

Виноградов Алексей Юрьевич, инженер. E-mail: alexey.vinogradov@guap.ru

Яблоков Евгений Николаевич, научный сотрудник. E-mail: evgeny.yablokov@guap.ru

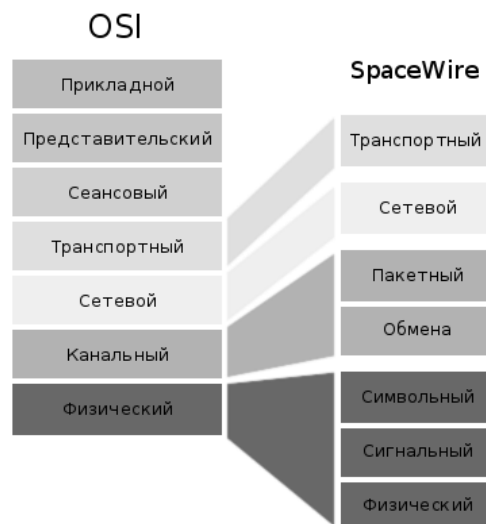


Рис. 1. Стек протокола SpaceWire



Рис. 2. Пакет SpaceWire

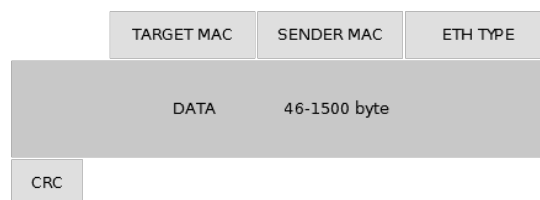


Рис. 3. Фрейм Ethernet

Также имеется поле кредитования, которое используется для информирования противоположной стороны о количестве свободной памяти, для входящих данных. Имеется упрощённая версия протокола, в которой поле кредитования отсутствует. Всего для передачи определено 7 типов фреймов, из них два типа для передачи пакетов целиком, 3 – для передачи по частям и 1 – для служебных символов и кодов распределённых прерываний. Размер передаваемого фрагмента ограничен размером фрейма Ethernet и равен 1495 байт. Служебные символы и коды распределённых прерываний группируются в один фрейм и при передаче имеют приоритет над обычными данными. Во время передачи могут возникать ошибки, потери фреймов или искажение данных, и специально для таких случаев определен ещё один дополнительный

тип фрейма, в котором содержится информация об ошибке и номер последнего принятого фрейма.

Протокол предусматривает возможность создавать пользовательские типы фреймов. В нашей реализации определены специальные фреймы, с помощью которых можно настраивать мост Ethernet-SpaceWire, получать информацию о состоянии моста, принимать сообщения от интегрированного тестера SpaceWire, а также определён специальный фрейм с тестовыми данными и настройками для тестера, о котором будет рассказано ниже.

Будем изучать описанные выше стандарты по следующим параметрам:

- скорость передачи данных;
- задержка при передаче;
- соотношение полезных данных к служебным;

Выбор данных характеристик обусловлен тем, что:

- скорость передачи данных крайне важна для обработки большого количества данных в реальном времени;
- минимальные задержки в распространении данных по бортовой сети являются одним из важнейших параметров;
- чем меньше служебных данных, тем больше полезной информации можно передать через канал на той же частоте.

Накладные расходы:

- данные передаются в кадрах (фреймах (Ethernet), пакетах (SpaceWire));
- у кадра есть заголовок (адрес, тип данных) и концевик (EOP, EEP, контрольная сумма);
- межкадровый интервал (Ethernet).

Ограничения при исследовании:

- для изучения будем предполагать, что имеется идеальный передатчик и идеальный приёмник;
- бортовая сеть состоит из узлов и связей между ними. Каждая связь — это соединение типа «точка-точка»;
- был рассмотрен случай без заголовка (SpaceWire);
- схема кредитования не рассматривалась.

Исследование было выполнено двумя способами — теоретическим и экспериментальным. Для выполнения теоретического расчёта были построены математические модели каналов SpaceWire, Ethernet и Ethernet-SpaceWire. Модели основаны на алгебраических выражениях, позволяющих оценить скорость передачи, максимальные задержки, минимальное и максимальное соотношение полезных данных к служебным. Для расчёта времени передачи одного фрейма (пакета) введём следующие обозначения: $T_{\text{bit.eth}}$ — время передачи одного бита по каналу Ethernet 1000 Мбит/с; $T_{\text{bit.spw}}$ — время передачи одного бита по каналу SpaceWire 400 Мбит/с; L_{eth} — размер фрейма Ethernet (бит); L_{spw} — размер пакета SpaceWire (бит); $L_{\text{данные}}$ — размер передаваемой полезной информации (байт); $L_{\text{сл}}$ — размер служебной информации фрейма Ethernet (байт); $L_{\text{преамб}}$ — размер преамбулы фрейма Ethernet (7 байт); $L_{\text{соф}}$ — начало фрейма (1 байт); $L_{\text{дст}}$ —

MAC адрес назначения (6 байт); L_{src} — MAC адрес отправителя (6 байт); $L_{\text{тип}}$ — тип фрейма (2 байта); L_{src} — контрольная сумма Ethernet фрейма (4 байта); L_{eop} — символ конца пакета SpaceWire (4 бита).

Полный размер фрейма Ethernet:

$$L_{\text{сл}} = L_{\text{преамб}} + L_{\text{соф}} + L_{\text{дст}} + L_{\text{src}} + L_{\text{тип}} + L_{\text{src}}$$

$$L_{\text{eth}} = (L_{\text{данные}} + L_{\text{сл}}) * 8$$

Полный размер пакета SpaceWire:

$$L_{\text{spw}} = L_{\text{данные}} * 10 + L_{\text{eop}}$$

Время передачи одного фрейма Ethernet:

$$T_{\text{eth}} = (L_{\text{eth}} + 96) * T_{\text{bit.eth}}$$

Время передачи одного пакета SpaceWire:

$$T_{\text{spw}} = L_{\text{spw}} * T_{\text{bit.spw}}$$

Скорость передачи полезной информации в канале Ethernet и SpaceWire:

$$U_{\text{eth}} = L_{\text{данные}} / T_{\text{eth}}; U_{\text{eth}} = L_{\text{данные}} / T_{\text{spw}}$$

Эффективность передачи полезной информации в канале Ethernet и SpaceWire:

$$P_{\text{eth}} = U_{\text{eth}} / 1000 * 100; P_{\text{spw}} = U_{\text{spw}} / 400 * 100$$

Расчёт задержки и скорости для протокола Ethernet-SpaceWire:

$$T_{\text{eth-spw}} = T_{\text{eth}} + T_{\text{spw}}; U_{\text{eth-spw}} = \min(U_{\text{eth}}, U_{\text{spw}})$$

Для экспериментального исследования использовался тестер сети SpaceWire, который интегрирован в мост Ethernet-SpaceWire и позволяет генерировать пакеты SpaceWire, а также замерять время распространения по сети. На рис. 4 показана его внутренняя структура. Во внутренней структуре имеются блоки настройки тестера, блок управления TEST_P, блок управления TEST_X, буфер с данными для TEST_X, телеметрия, обратная петля и блоки тестов. Блок TEST_P позволяет работать только с одним выбранным тестом, имеет простые настройки и обладает высоким быстродействием. На текущий момент позволяет генерировать пакеты SpaceWire с четырьмя вариантами содержимого: повтор одного байта, счётчик, определённая пользователем последовательность и псевдослучайная последовательность байт. Блок управления TEST_X вместе с буфером TEST_X, блоками TEST 252-254 и блоком регистров образуют базовый 16-ти разрядный процессор. Данный процессор позволяет генерировать пакеты SpaceWire, доступные из TEST_P, в любой последовательности и без ограничений в размере (в разумных пределах). Кроме генерации пакетов, процессор имеет арифметический и логический блоки, позволяющие обрабатывать результаты тестирования, менять последовательность выполнения тестов, посылать отчёты на пользовательский компьютер (блок генерации отчётов не указан на рисунке), изменять скорость соединения SpaceWire и т.д. Для конфигурации тестера и получения результатов используется порт Ethernet. В конфигурационном фрейме находятся общие настройки тестера и в зависимости от необходимости, настройки для TEST_X и/или TEST_P. Настройки для TEST_X

содержатся в виде последовательностей размером в 6 байт и могут чередоваться с последовательностями данных. В каждой последовательности содержится номер выполняемой операции (теста) и аргументы, которые могут быть как данными, так и адресами, где расположены данные или адреса для смены последовательности тестов. Для более удобной работы с тестером и наглядности была разработана программа, позволяющая описывать последовательность команд, которые должен выполнить

процессор в тестере. Последовательность команд описывается на языке программирования, похожий на ассемблер. Команды начинаются с точки, метки — с двоеточия, директивы — с символа «#», а переменные — с символа «\$». После команды идут аргументы, разделённые пробелами. Окно программы с последовательностью команд, предназначенного для экспериментального исследования, изображено на рис. 5.

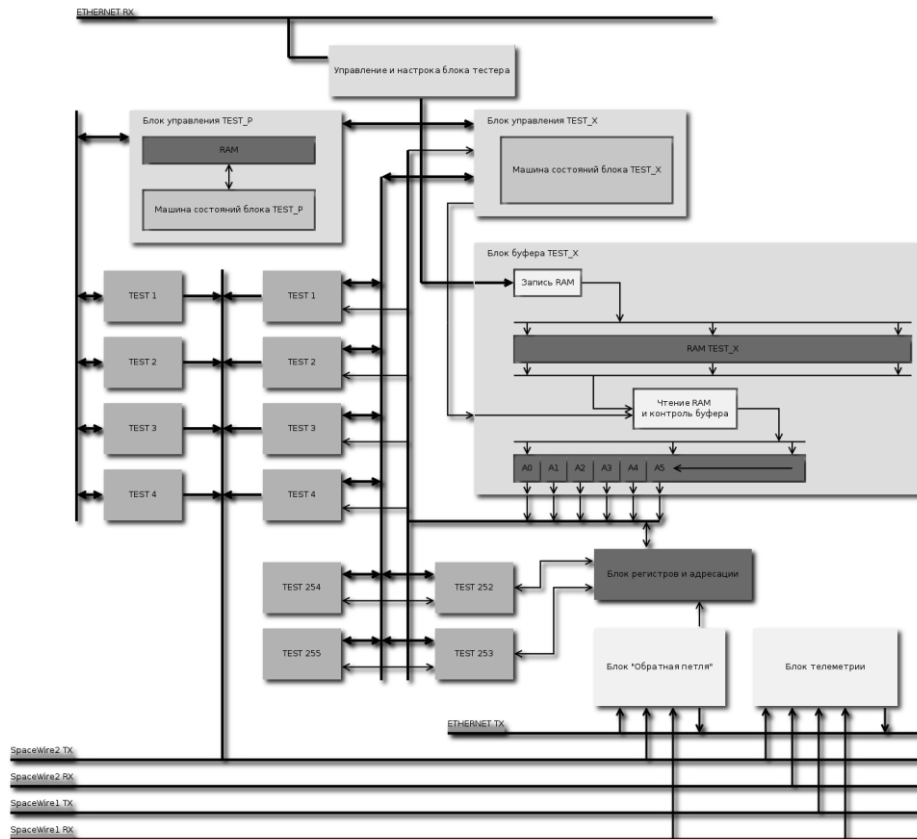


Рис. 4. Структура тестера SpaceWire

```

Eth-SpW tester configurator
1 //Директивы для конфигуратора
2 #write_x
3 #start_x
4 //объявление переменных
5 $packet_len
6 $packet_num
7 //запись начальных значений
8 .rwr 0 packet_len
9 .rwr packet_len packet_num
10 //метка цикла
11 :loop
12 .add packet_len 5 packet_len
13 .add packet_num 1 packet_num
14 //запуск теста 1
15 .test01 packet_len 0 %0 .eop
16 .test05 30000 0 %0 .
17 //Выводить сообщение: размер пакета, номер пакета, задержка, число ошибок
18 .msnd packet_len packet_num %42 %41
19 .rwr 0 %44
20 //переход на метку loop если packet_len меньше 1500
21 .jl 1500 packet_len loop
22 .end

```

Рис. 5. Редактор текста в конфигурационной программе

По данной программе тестер генерировал пакеты SpaceWire размером от 5 до 1500 байт с шагом 5 байт. После каждой передачи генерировался фрейм Ethernet, с результатами теста. На рис. 6 показан макет, с помощью которого проводился эксперимент. Пакеты SpaceWire передавались с порта «2» на два моста Ethernet-SpaceWire, соединённых

между собой через Ethernet. В тестер пакеты возвращались на порт «1». Время передачи пакета измерялось с помощью блока обратной петли, который встроен в тестер SpaceWire. Затем информация от тестера собиралась в фреймы и отправлялась через Ethernet на компьютер.

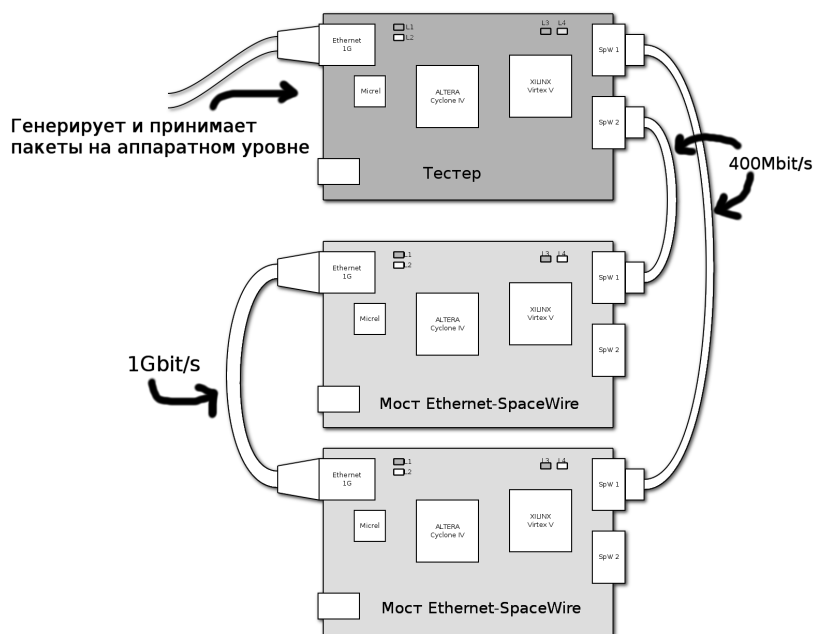


Рис. 6. Макет для эксперимента

В ходе исследования были получены графики, отображающие время передачи, эффективную скорость передачи данных и эффективность передачи полезной информации. На рис. 7 отображена скорость передачи данных в зависимости от размера кадра для сети Gigabit Ethernet, SpaceWire и Ethernet-SpaceWire. На рис. 8 отображено время передачи данных. Все три графика рассчитаны теоретически и один (под номером 4) исходя из экспериментальной части исследования. На рис. 9 отображена эффективность передачи полезной информации для сетей Ethernet и SpaceWire.

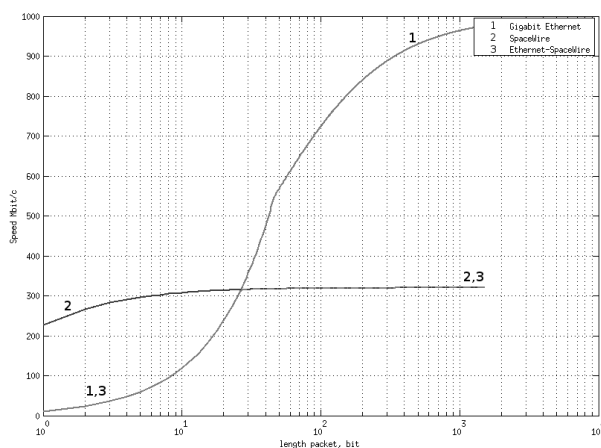


Рис. 7. Скорость передачи данных

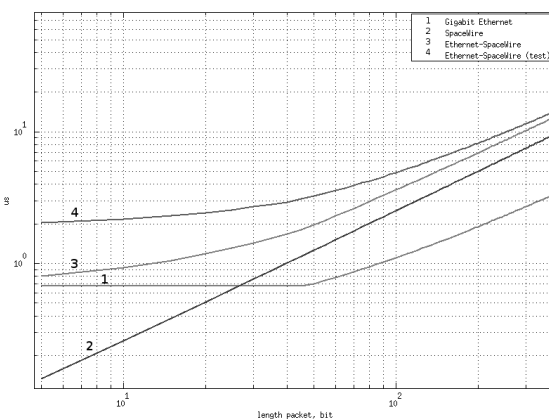


Рис. 8. Время передачи

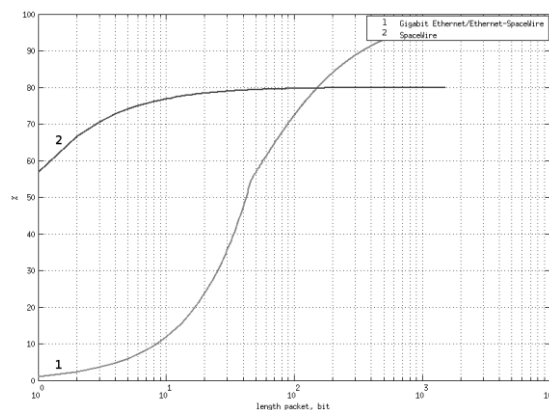


Рис. 9. Эффективность передачи полезной информации

Выводы: полученные графики показывают, что SpaceWire позволяет более эффективно использовать канал связи по сравнению с Ethernet и Ethernet-SpaceWire. При экспериментальном исследовании результаты получились хуже, чем при теоретическом расчёте. Это связано с тем, что не учитывались задержки в приёмопередатчиках SpaceWire и передача данных между внутренними блоками моста Ethernet-SpaceWire. Максимальная скорость передачи данных по протоколу Ethernet-SpaceWire всегда будет определяться самым медленным протоколом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ECSS Standard ECSS-E-ST-50-12C, "SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks", Issue 1, European Cooperation for Space Data Standardization, July 2008.
2. Yablokov, E. Protocol for Connection Ethernet Interface to SpaceWire Networks / E. Yablokov, V. Rozanov, A. Vinogradov // Proceedings of the 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT, 2015.
3. IEEE STANDARDS ASSOCIATION, IEEE Standard for Ethernet, New York, USA, December 2012

ETHERNET-SPACEWIRE PROTOCOL RESEARCHES

© 2017 A.Yu. Vinogradov, E.N. Yablokov

St.Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The paper is devoted to the research and analysis of Ethernet-SpaceWire protocol on the data link layer. SpaceWire and Ethernet protocols characteristics are compared, in particular the formats of the SpaceWire, Ethernet and Ethernet-SpaceWire frames.

Key words: *SpaceWire, Ethernet, Ethernet-SpaceWire, link layer, point-point*