

УДК: 681.3

Сравнение различных подходов к построению бортовых коммутируемых сетей

В.А. Костенко, В.В. Балашов¹¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д.1, стр. 52, Москва, Россия

kostmsu@gmail.com, hbd@cs.msu.ru

Аннотация

В статье сформулированы требования к передаче сообщений в комплексах бортового оборудования с архитектурой интегрированной модульной авионики. Проведено сравнение свойств бортовых сетей, построенных на основе различных типов коммутируемых сетей: AFDX, FC-AE-ASM-RT, сетей с временной синхронизацией, программно-конфигурируемых сетей. Критериями сравнения являются: поддержка различных видов временных ограничений на передачу сообщений; поддержка бесшовного переключения режимов работы КБО; наличие контроля трафика на уровне сообщений; поддержка динамического изменения набора и маршрутов передаваемых сообщений; возможность задания различных приоритетов для сообщений.

Ключевые слова: системы реального времени, коммутируемые сети

1. Введение

В настоящее время осуществляется переход от комплексов бортового оборудования (КБО) с федеративной архитектурой к КБО с интегрированной модульной архитектурой. Наиболее широко используемый подход к построению КБО с интегрированной модульной архитектурой известен как интегрированная модульная авионика (ИМА).

Разработан ряд стандартов, регламентирующих построение КБО с архитектурой ИМА: ARINC 651 – основные принципы построения КБО на основе ИМА [1]; ARINC 653 – спецификация операционных систем [2]; ARINC 664 (AFDX) – спецификация сети информационного обмена на основе Ethernet [3]; FC-AE-ASM-RT – спецификация сети информационного обмена на основе коммутируемой сети Fibre Channel [4]; SAE AS6802 – спецификация сети с временной синхронизацией на основе Ethernet [5].

Стандарт ARINC 651 регламентирует основные принципы построения КБО на основе ИМА. В соответствии с этим стандартом, единый бортовой вычислитель строится из набора стандартизованных вычислительных модулей.

Стандарт ARINC 653 регламентирует построение операционных систем, которые позволяют обеспечить выполнение программ в реальном времени и изоляцию программ различных бортовых систем при выполнении на едином вычислителе. Изоляция распространяется на все ресурсы, включая регистровую память, кэши центральных процессоров, шины (порты) ввода-вывода. Изоляция программ различных систем КБО обеспечивается введением разделов и окон выполнения. Для программ каждой бортовой системы выделяется свой раздел и набор временных окон (непересекающихся интервалов времени). Программы различных разделов могут взаимодействовать лишь путем передачи сообщений.

Три последних стандарта регламентируют построение коммутируемых сетей обмена данными.

В КБО можно выделить три уровня обработки данных: 0) уровень предобработки, 1) уровень первичной обработки, 2) уровень вторичной обработки. Для обеспечения выполнения функциональных программ в режиме реального времени наибольшая производительность необходима на уровне первичной обработки данных.

В работе [6] на примере локационной системы с фазированными антенными решетками показано, что переход от федеративных архитектур к архитектурам ИМА (то есть при переносе программ первичной обработки с вычислителя системы на единый бортовой вычислитель) приводит к увеличению потока данных в сети обмена в $10^3 - 10^5$ раз в зависимости от характеристик локационной системы. Это обуславливает построение бортовых сетей обмена на основе коммутируемых сетей.

В данной работе проведено сравнение сетей AFDX, FC-AE-ASM-RT, сетей с временной синхронизацией и программно-конфигурируемых сетей (ПКС) с точки зрения их использования для построения бортовых сетей обмена на основе коммутируемых сетей.

2. Требования к передаче сообщений в КБО

КБО работает в одном из заранее определённых режимов. Например, для КБО международной космической станции (МКС) определены следующие режимы работы [7]: стандартный режим; режим микрогравитации для выполнения научных экспериментов; режим сближения и стыковки с транспортными кораблями; режим для выхода экипажа в открытый космос; режим выживания с отключением наименее важных экспериментов и систем; режим аварийного покидания экипажем МКС.

Режим работы КБО характеризуется набором функциональных задач (программ), которые должны выполняться в режиме, и набором сообщений, которыми обмениваются программы между собой и с датчиками или исполнительными устройствами систем КБО.

Для каждого сообщения задаются: требования к его передаче в реальном времени; размер сообщения; максимальный джиттер порождения сообщения (интервал времени, в котором может быть порождено сообщение от левой границы директивного интервала); абонент-отправитель сообщения; абонент-получатель или набор абонентов-получателей сообщения.

Требования к передаче сообщений в реальном времени могут задаваться одним из трех способов, то есть можно выделить три вида временных ограничений на передачу сообщений:

- 1) Периодические сообщения. Задается частота передачи сообщения. Сообщение должно передаваться не менее одного раза в период.
- 2) Периодические сообщения с фазовыми сдвигами. Для сообщения задаются: F – частота ($1/F$ – период) его передачи и (ϕ_1, ϕ_2) – фазовые сдвиги. Частота определяет набор отрезков времени передачи сообщения, длина каждого из которых равна периоду сообщения. Фазовые сдвиги задают интервал времени внутри каждого отрезка – директивный интервал), в рамках которого сообщение должно быть обязательно передано.
- 3) Нерегулярные сообщения. Для сообщения задается набор директивных интервалов, в рамках которых должно обязательно передаваться сообщение.

При передаче сообщения должны выполняться следующие ограничения:

- 1) Максимальная длительность передачи сообщения с момента выдачи сообщения от абонента до момента получения сообщения всеми абонентами-получателями не должна превосходить заданного значения. Сообщение считается принятым, когда получен последний его кадр.
- 2) Максимальный джиттер передачи сообщения (разность между возможными максимальной и минимальной длительностью передачи сообщения) не должен превосходить заданного значения.

3. Требования к бортовой сети обмена

Бортовая сеть обмена должна позволять:

- 1) Работать со всеми видами временных ограничений на передачу сообщений.
- 2) Осуществлять беспроводное переключение режимов КБО.
- 3) Выполнять контроль трафика на уровне сообщений.
- 4) Динамически изменять набор и маршруты передаваемых сообщений.

5) Задавать приоритеты сообщений.

При смене режима работы КБО изменяется набор выполняемых функциональных задач и передаваемых сообщений. Сообщения, которые передаются как в старом, так и в новом режиме должны передаваться и во время переключения режимов. То есть для подсистем КБО, которые должны функционировать как в старом, так и в новом режиме во время переключения не должна теряться связь между прикладными программами и устройствами подсистемы,

Контроль трафика на уровне сообщений необходим для гарантированного обеспечения передачи сообщений в реальном времени.

Возможность динамического изменения набора и маршрутов передаваемых сообщений необходима для парирования отказов в КБО.

Возможность задавать приоритеты сообщениям необходима для обеспечения совместной работы в реальном времени критичных подсистем КБО и подсистем, для которых нарушение директивных сроков не приводит к отказу или директивные сроки не задаются.

4. Основные особенности коммутируемых сетей различных типов

Выполнение требований к передаче сообщений в реальном времени и ограничений 1–2 при передаче сообщений в сетях AFDX и FC-AE-ASM-RT достигается введением виртуальных каналов и построением для них маршрутов в физической сети обмена данными. В сетях AFDX таблицы маршрутизации коммутатора настраиваются заранее. Коммутаторы AFDX также выполняют контроль и фильтрацию трафика на уровне кадров. При фильтрации трафика проверяется правильность следования кадров по виртуальным каналам, а также их целостность. Контроль трафика обеспечивает заданную для виртуального канала пропускную способность и не позволяет ее превышать. Для контроля пропускной способности канала в сетях AFDX применяется алгоритм текущего ведра с маркерами; если на вход коммутатора поступает кадр виртуального канала, но для приема этого кадра на коммутаторе недостаточно кредита, кадр сбрасывается. Скорость восстановления кредита на коммутаторе определяется пропускной способностью виртуального канала.

Пропускную способность каждого виртуального канала устанавливают заранее при конфигурировании коммутатора, как и маршрут канала. Таким образом, маршрутизация в сети AFDX задается статически, возможность динамически изменять таблицы маршрутизации стандартом не предусмотрена.

Более подробное описание сетей AFDX, задачи и алгоритма построения виртуальных каналов приведено в работе [8].

Основное отличие сетей FC-AE-ASM-RT от сетей AFDX заключается в том, что контроль трафика осуществляется на уровне целых сообщений, а не отдель-

ных кадров, и для сетей FC-AE-ASM-RT возможно переключение между заранее сформированными и загруженными в коммутаторы таблицами виртуальных каналов. Также в сетях FC-AE-ASM-RT поддерживаются несколько (до 8) уровней приоритетов сообщений. Приоритеты сообщений учитываются при обработке сообщений на коммутаторах.

Основной особенностью сетей с временной синхронизацией является то, что существует три класса сообщений:

- 1) TT (Time Triggered). Отправка TT-сообщений происходит согласно заранее построенному расписанию и TT сообщения более приоритетны, чем все остальные классы сообщений. Для каждого такого сообщения предопределены моменты времени его отправки с каждого узла сети его маршрута. В случае если на порте коммутатора уже происходит отправка сообщения RC или BE на момент наступления времени отправки с него TT-сообщения, текущая отправка отменяется, производится отправка TT-сообщения, после чего повторяется отмененная отправка. Для реализации такого класса сообщений требуются синхронизированные локальные часы на всех узлах сети.
- 2) RC (Rate Constrained). Передача сообщений организована по схеме, аналогичной схеме передачи, используемой в протоколе AFDX, с учетом наличия в сети более приоритетных TT-сообщений.
- 3) BE (Best Effort). Сообщения, пересылаемые в соответствии со стандартной политикой Ethernet, имеют наименьший детерминизм задержек при передаче через сеть.

Суть организации сетей на основе подхода Software-Defined Networking (ПКС, программно-конфигурируемые сети) заключается в разделении в сетевых устройствах уровней управления передачей данных (Control Plane) и собственно передачи данных (Data Plane). Управление передачей данных происходит из логического центра [9], например – контроллера сети.

Один из способов реализации ПКС-подхода основан на протоколе OpenFlow [10]. В терминологии OpenFlow сеть состоит из коммутаторов, отвечающих за пересылку пакетов согласно правилам коммутации в таблицах потоков, и контроллера, отвечающего за централизованное формирование и передачу правил коммутации на все управляемые им коммутаторы. Сам по себе контроллер представляет собой только прослойку по взаимодействию с коммутаторами по открытому протоколу OpenFlow, а непосредственное управление сетью и формирование правил коммутации происходит на приложениях, функционирующих на ресурсах контроллера.

В работе [11] предложен подход к построению бортовой сети обмена на основе ПКС-сети, функционирующей в пассивном режиме. В этом режиме начальный

набор правил коммутации устанавливается на коммутаторы заранее, до старта системы. Подход основан на реализации в сети механизма виртуальных каналов, аналогично используемому в сетях AFDX и FC-AE-ASM-RT. На контроллере функционирует приложение, реализующее управление сетью. Это приложение осуществляет построение маршрутов передачи сообщений таким образом, чтобы выполнялись заданные для сообщений требования передачи в реальном времени. При переключении режимов работы КБО, а также при парировании отказа вычислительных и сетевых устройств КБО, управляющее приложение рассчитывает новые маршруты передачи сообщений и перепрограммирует коммутаторы для их настройки на новые маршруты. Передача сообщений, не затронутых изменениями, при этом не нарушается, т.к. технология ПКС позволяет менять отдельные правила на коммутаторах и не требует переключения коммутатора целиком между таблицами коммутации. За счет этой особенности в ПКС-сетях поддерживается бесшовное переключение режимов работы КБО, в отличие от сетей AFDX и FC-AE-ASM-RT.

5. Сравнение свойств бортовых сетей обмена построенных на основе различных типов коммутируемых сетей

Возможности выполнения требований к бортовой сети обмена, сформулированных в разделе 3, при использовании для ее построения различных типов коммутируемых сетей, приведены в таблице 1.

Сети AFDX позволяют работать только с периодическими сообщениями и периодическими сообщениями с фазовыми сдвигами. Учитывать фазовые сдвиги можно только с потерей (непродуктивным использованием) пропускной способности сети. Для бесшовного переключения режимов в сетях AFDX требуется резервирование пропускной способности сети под все виртуальные каналы всех режимов одновременно, как если бы требовалась их одновременная работа. Это обусловлено тем, что переключение между различными таблицами коммутации невозможно. По этой же причине для динамического изменения набора и маршрутов сообщений необходимо резервировать пропускную способность под все сообщения и маршруты.

Сети FC-AE-ASM-RT превосходят сети AFDX по поддержке реконфигурации, поскольку поддерживают переключение между заранее сформированными и загруженными в коммутаторы таблицами виртуальных каналов, но при этом на время переключения теряется связь между прикладными программами и подсистемами КБО. В связи с этим переключение режимов не является бесшовным.

Сети с временной синхронизацией позволяют поддерживать все виды временных ограничений на передачу сообщений за счет возможности задания в расписании произвольных моментов выдачи сообщений из абонентов в сеть.

Требования	AFDX	Сети с временной синхронизацией	FC-AE-ASM-RT	ПКС, пассивный режим
Работа со всеми видами временных ограничений на передачу сообщений	–	+	–	–
Беспровное переключение режимов	–/+	–	–/+	+
Контроль трафика на уровне сообщений	–	+	+	+
Динамическое изменение набора и маршрутов передаваемых сообщений	–	–	–	+
Возможность задавать приоритеты сообщениям	–	+	–/+	–

Таблица 1. Выполнение требований к бортовой сети обмена

Это позволяет отрабатывать в т.ч. фазовые сдвиги и нерегулярные директивные интервалы. При этом поддержка реконфигурации, а также динамического изменения состава и маршрутов сообщений, в сетях этого класса отсутствует. Поддержка трех классов сообщений позволяет распределять сообщения по уровням приоритетности.

ПКС-сети, работающие по схеме из [11], представляют наибольшую гибкость в части реконфигурации и за счет этого позволяют как осуществлять беспроводное переключение режимов, так и динамически изменять набор и маршруты передаваемых сообщений. В связи с тем, что схема передачи сообщений основана на схеме из AFDX и ориентирована на передачу периодических сообщений, поддержка сообщений с фазовыми сдвигами и нерегулярных сообщений затруднительна. Также отсутствует поддержка приоритетов сообщений.

6. Заключение

Переход от КБО с федеративной архитектурой к КБО с интегрированной модульной архитектурой производится с целью уменьшения затрат на вычислительные ресурсы и сокращения сроков и стоимости проектирования.

Сокращение сроков и стоимости проектирования, а также повышение надежности в КБО с архитектурой ИМА предполагается достигать за счет использова-

ния унифицированных, ранее разработанных и апробированных аппаратных и программных компонентов. Уменьшение аппаратных затрат на вычислительные ресурсы предполагается достигать за счет того, что используется единый бортовой вычислитель, и его ресурсы могут разделять функциональные программы различных бортовых подсистем.

Перенос функциональных программ из подсистем в единый бортовой вычислитель приводит к увеличению нагрузки на бортовую сеть обмена. Это обусловило использование для построения бортовой сети обмена коммутируемых сетей.

В работе сформулированы требования к бортовой сети обмена для КБО с архитектурой ИМА и проведено сравнение по соответствию этим требованиям для различных типов коммутируемых сетей. Результаты сравнения могут быть использованы при выборе типа сети для перспективных КБО.

ЛИТЕРАТУРА

1. ARINC 651-1 – Design Guidance for Integrated Modular Avionics. Airlines Electronic Engineering Committee, 1997.
2. ARINC 653 – Avionics Application Software Standard Interface. Airlines Electronic Engineering Committee, 2003.
3. ARINC 664 – Aircraft Data Network. Part 7. Avionics Full Duplex Switched Ethernet Network. ARINC Industry Activities, 2009.
4. INCITS 373. Information Technology – Fibre Channel Framing and Signaling Interface (FC-FS), International Committee for Information Technology Standards, 2003.
5. SAE AS6802 – Time-Triggered Ethernet. SAE International, 2016.
6. Костенко В.А., Смелянский Р.Л. Проблемы построения бортовых комплексов с архитектурой интегрированной модульной авионики // Радиопромышленность. 2016. № 3. С. 63–70.
7. Куминов В., Наумов Б. Космические компьютеры: открытые стандарты и технологии выходят в открытый космос // Мир компьютерной автоматизации. 2002. №3. С. 71–79.
8. Vdovin P.M., Kostenko V.A. Organizing Message Transmission in AFDX Networks // Programming and Computer Software. 2017. Vol. 43. No. 1, P. 1–12.
9. Casado M., Koponen T., Moon D., Shenker S. Rethinking Packet Forwarding Hardware // Proc. HotNets, 2008.
10. OpenFlow Switch Specification, Version 1.3.0. Open Networking Foundation, 2012.
11. Балашов В.В., Костенко В.А., Ермакова Т.И. Построение бортовых сетей реального времени на основе технологии ПКС // Моделирование и анализ информационных систем. 2019. Т. 26. №1. С. 23–38.