**ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНФИГУРИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ КАНАЛОВ В СЕТЯХ AFDX[[1]](#footnote-1)**

*П.М. Вдовин, В.А. Костенко*

*(МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва)*

**Введение.** Проектирование комплексов бортового оборудования (КБО) является трудоемкой задачей, включающей в себя построение КБО согласно используемым стандартам, проверку корректности решения и его удовлетворения требованиям реального времени. Одной из задач, возникающих при проектировании КБО, является построение бортовой сети обмена, в которой периодические сообщения должны доставляться до получателя не дольше заданных ограничений на длительность доставки.

В настоящее время широко используются КБО, построенные на основе архитектуры интегрированной модульной авионики (ИМА) [1], в которых функциональные задачи (программы) различных систем КБО, выполняются на едином бортовом вычислителе и изолированы друг от друга. Каждой системе выделяется для работы ее программ набор временных интервалов (окон), в которых не могут выполняться программы других систем, и память, к которой не имею доступа программы других систем.

Стандарт Avionics Full Duplex Ethernet (AFDX) [2] описывает методы построения и управления сетями обмена данными для систем ИМА. Сеть AFDX представляет собой коммутируемую сеть с коммутацией пакетов, использующую понятие виртуального канала для обеспечения передачи сообщений между абонентами сети с заданными ограничениями на длительность доставки. Виртуальный канал позволяет фиксировать маршрут передачи сообщений и обеспечивать гарантированную пропускную способность. Данные характеристики обеспечиваются с помощью специальных параметров виртуального канала, а именно периода передачи кадра, его максимального джиттера и размера. Зная эти параметры, можно с помощью известных подходов [3] вычислить оценку длительности передачи сообщения.

Открытые и коммерческие системы [4—8] для автоматизации проектирования бортовых систем, включающие в себя проектирование сетей AFDX, ориентированы на сети с заданной конфигурацией, предварительно построенной вручную. Такие системы позволяют проводить моделирование, тестирование и верификацию конфигурации бортовых систем, а также мониторинг работы реальной бортовой системы. В то же время систем, позволяющих автоматически строить корректные конфигурации, в свободном доступе найдено не было.

В работе представлена инструментальная система, позволяющая по заданному описанию набора периодических сообщений и ограничений на время их доставки спроектировать виртуальные каналы в заданной сети AFDX. Данная инструментальная система позволяет как задавать ограничения на длительность передачи сообщений, их размеры и периоды передачи, так и учитывать особенности сетей AFDX, такие как возможность использования различных стратегий буферизации на выходных портах коммутаторов или возможность передавать несколько сообщений по одному виртуальному каналу.

**Особенности сетей AFDX.** Стандарт AFDX описывает управление передачей сообщений в бортовых сетях на основе традиционного стандарта Ethernet 802.3. Согласно стандарту AFDX, бортовая сеть состоит из следующих компонент:

• абоненты, передающие сообщения;

• оконечные системы – системы, обеспечивающие интерфейс между абонентами и сетью;

• пакетные коммутаторы, соединяемые линиями передачи данных.

Каждый абонент подключен к оконечной системе, причем к одной оконечной системе может быть подключено несколько абонентов. Передача сообщений между абонентами производится через виртуальный канал по выделенным, заранее заданным маршрутам в сети, причем маршруты представляют собой дерево в сети передачи данных от одной оконечной системы — отправителя до одной или более оконечной системы — получателя. По виртуальному каналу могут передаваться несколько сообщений только от одного абонента.

Сообщение от абонента попадает на оконечную систему через специально выделенный порт. На оконечной системе производится разбиение сообщений на порции данных (кадры) согласно протоколу TCP/IP. В каждом кадре указывается номер виртуального канала, с помощью которого коммутатор может определить маршрут следования кадра. Стандартная для Ethernet маршрутизация по MAC — адресу в AFDX не используется. После доставки кадра на оконечную систему — получатель (возможно, одну из нескольких) он буферизуется для последующей сборки сообщения. После прихода последнего кадра собранное сообщение направляется абонентам — получателям.

**Задача конфигурирования виртуальных каналов в сетях AFDX.** Сеть AFDX задается ориентированным графом, вершинами которого является множество коммутаторов и оконечных систем, дугами являются каналы передачи данных, для которых задается пропускная способность. Для каждой оконечной системы задано множество абонентов, которые к ней подключены, причем каждый абонент подключен только к одной оконечной системе. Каждая оконечная система подключена только к одному каналу передачи данных.

Входными данными задачи конфигурирования виртуальных каналов является множество сообщений, для каждого из которых задаются следующие параметры:

• *size* (байт) — размер сообщения;

• *T* (мс) — период передачи сообщения;

• абонент — отправитель сообщения и множество абонентов — получателей сообщения, которые подключены к оконечным системам, отличным от оконечной системы — отправителя.

Для каждого сообщения заданы следующие ограничения:

• сообщение должно передаваться не менее одного раза в период;

• *TM* (мс) — максимальная длительность передачи сообщения с момента выдачи сообщения от абонента оконечной системе — отправителю до момента получения сообщения всеми абонентами — получателями.

Задача заключается в построении множества виртуальных каналов и построении для них маршрутов в физической сети обмена данными. Для каждого виртуального канала должны быть определены следующие параметры:

• *LM* (байт) — максимальный размер кадра, передаваемый по данному виртуальному каналу; согласно стандарту, размер кадра лежит в следующих пределах: байт;

• *BAG* (мс) — минимальный промежуток времени между передачей кадров при нулевом джиттере порождения кадров; согласно стандарту, данное значение лежит в промежутке от 1 до 128 мс и является степенью двойки;

• *JM* (мкс) — максимальный джиттер порождения кадров на оконечной системе — отправителе; данное значение используется при мультиплексировании виртуальных каналов;

• оконечная система — отправитель и множество оконечных систем — получателей кадров данного виртуального канала;

• маршрут передачи кадров в сети, представляет собой дерево, в котором корнем является оконечная система — отправитель, а листьями являются все оконечные системы — получатели кадров виртуального канала;

• множество сообщений, передаваемых по данному виртуальному каналу; сообщения должны исходить из одного абонента — отправителя.

При построении виртуальных каналов и маршрутов для них должны выполняться следующие ограничения.

(1) Суммарная пропускная способность, зарезервированная под виртуальные каналы, проходящие через физический канал передачи данных, не превосходит его пропускной способности.

(2) Частота передачи кадров каждого виртуального канала соответствует частоте выдачи сообщений. Данное ограничение возникает из того, что все кадры одного сообщения должны поступить в канал до выдачи следующего сообщения, т.е. за период *T*.

(3) Максимальный джиттер на оконечных системах — отправителях не должен превосходить 500 мкс.

(4) Максимальная длительность передачи каждого сообщения не превосходит заданных ограничений.

**Подход к решению задачи.** Алгоритм организации передачи сообщений основан на жадных стратегиях и стратегиях ограниченного перебора. Ограниченный перебор используется в случае неуспешного завершения жадных процедур. В случае неуспешного назначения виртуальных каналов используется процедура агрегации, целью которой является построение виртуальных каналов, через которые передается более одного сообщения.

Общая схема алгоритма следующая.

Шаг 1. Для каждого сообщения выделить виртуальный канал и произвести настройку параметров *LM, BAG* и *JM* с учетом ограничения (2). На данном шаге используется подход, основанный на методе, который описан в работе [9].

Шаг 2. Для каждого виртуального канала проверить выполнение ограничения (3). Если ограничение выполняется не для всех виртуальных каналов, произвести процедуру агрегации. Входом процедуры являются виртуальные каналы, для которых не выполняется ограничение. Процедура объединяет сообщения, исходящие от одного абонента, в один виртуальный канал (с настройкой новых параметров *LM, BAG* и *JM*) таким образом, чтобы выполнялись ограничения (2) и (3). Прежние виртуальные каналы этих сообщений удаляются.

Шаг 3. Для каждого виртуального канала произвести построение маршрута с учетом ограничения (1). На данном шаге может использоваться алгоритм построения маршрута от одного отправителя к нескольким получателям, приведенный в работе [10]. Если построить маршрут не удается, выполняется процедура ограниченного перебора, которая заключается в переборе всех подмножеств заданной мощности уже назначенных виртуальных каналов с целью перепостроения их маршрутов таким образом, чтобы можно было построить маршрут для текущего виртуального канала. При неуспешном выполнении процедуры построение рассматриваемого виртуального канала считается неуспешным.

Шаг 4. Для каждого сообщения произвести вычисление длительности передачи сообщений и проверить выполнение ограничения (4). Если ограничения не выполнены, произвести процедуру переконфигурации виртуального канала, по которому передается сообщение, заключающуюся в попытке перенастроить параметры *LM, BAG* и *JM* с учетом оценок длительности передачи. Если после выполнения процедуры для исходного сообщения не выполняется ограничение (4), то назначение сообщения считается невозможным и сообщение удаляется из виртуального канала.

**Описание инструментальной системы конфигурирования виртуальных каналов в сетях AFDX.** Процесс конфигурирования виртуальных каналов включает в себя следующую последовательность действий:

1. Подготовка входных данных. На основе информации о выполняемых в КБО функциональных задачах строится множество периодических сообщений, вычисляются значения их параметров и ограничений.

2. Автоматическое построение корректной конфигурации бортовой сети для заданного множества сообщений, удовлетворяющей требованиям реального времени и требованиям, налагаемым используемым стандартом.

3. При необходимости – ручная корректировка конфигурации с возможностью проверки корректности после проведения корректировки.

4. При построении на шаге 2 корректной конфигурации не для всех исходных сообщений (в силу невозможности построения такой конфигурации вообще или используемым средством) возможно изменение параметров входных данных и переход на шаг 2.

5. Отображение результатов и экспортирование данных для их дальнейшей обработки.

В случае построения сетей AFDX корректная конфигурация подразумевает построение виртуальных каналов для заданного множества сообщений с учетом ограничений (1) — (4).

На основе предложенной схемы проектирования бортовых сетей и особенностей стандарта AFDX можно выделить следующие требования к инструментальной системе:

• Система должна предоставлять графический интерфейс для задания и редактирования входных данных, а именно графа и параметров сети, сообщений и их характеристик согласно модели входных данных;

• Система должна позволять запускать алгоритм построения сети AFDX с заданными значениями параметров работы алгоритма;

• Система должна иметь графический интерфейс для отображения результатов работы алгоритма, а именно для отображения параметров и маршрутов построенных виртуальных каналов;

• Система должна позволять задавать виртуальные каналы вручную, а также изменять вручную параметры спроектированных виртуальных каналов;

• Реализованный алгоритм должен иметь модульную структуру и позволять заменять используемые процедуры.

Разработанная инструментальная система полностью удовлетворяет описанным требованиям и позволяет поддерживать процесс построения бортовых сетей на основе стандарта AFDX на шагах 2, 3 и 5 описанной выше схемы.

Инструментальная система состоит из двух основных модулей: модуля редактирования и модуля построения виртуальных каналов.

Модуль редактирования реализует интерфейс для конечного пользователя и позволяет задавать входные данные и отображать результаты работы алгоритма. Данный модуль реализован на языке python версии 2.7 с использованием библиотеки PYQT4 и состоит из следующих подмодулей:

• Подмодуль редактирования сети AFDX – позволяет интерактивно задавать и отображать граф сети и задавать различные параметры, такие как пропускная способность каналов передачи данных, стратегии буферизации на выходных портах коммутаторов.

• Подмодуль редактирования сообщений –позволяет задавать множество передаваемых сообщений и их свойства: *size, T, TM*, отправителя и получателей сообщения. Также можно указывать существующий виртуальный канал для передачи.

• Подмодуль редактирования виртуальных каналов – позволяет задавать вручную, редактировать и отображать существующие виртуальные каналы и их свойства: оконечную систему — отправителя, множество оконечных систем — получателей, *BAG, LM*, маршрут передачи кадров в сети. Маршрут передачи также отображается на графе сети AFDX.

• Подмодуль внешнего интерфейса – используется для передачи заданных пользователем входных данных модулю построения виртуальных каналов и получения результатов алгоритма. Для передачи данных генерируется файл в формате xml с описанием сети и входных данных. После отработки алгоритма файл с описанием построенных виртуальных каналов в формате xml передается обратно и после обработки отображается с помощью подмодуля редактирования виртуальных каналов. В данном подмодуле также можно запускать отдельные процедуры алгоритма, такие как проверка заданной конфигурации на корректность (в плане проверки выполнения ограничений (1) — (4)), вычисление длительности передачи кадров для заданных вручную виртуальных каналов.

Модуль построения виртуальных каналов реализует описанную выше общую схему алгоритма построения виртуальных каналов на основе ряда подключаемых процедур. В основе модуля лежит подмодуль представления модели входных данных задачи. В модуле реализован ряд процедур, которые используют представление модели задачи для задания входных данных.

Каждая процедура основана на модели представления данных и можно, таким образом, заменить процедуру на другую реализацию после ее адаптации к используемой модели. Например, система позволяет подключать любой из известных методов оценки длительности передачи кадров (при условии адаптации к модели входных данных).

Существует возможность запускать отдельные этапы алгоритма, такие как проверка входных данных на корректность в плане выполнения ограничений (1) — (4) или вычисление длительности передачи кадров для заданных виртуальных каналов. Данная возможность может использоваться для проверки корректности конфигурации бортовой сети, заданной вручную.

В модуле имеется внешний интерфейс, который позволяет принимать на вход файлы в формате xml с описанием входных данных и преобразовывать их во внутреннее представление и возвращать файлы с описанием построенных виртуальных каналов.

**Заключение.** Представленная в данной работе инструментальная система позволяет производить автоматическое конфигурирование бортовых сетей обмена построенных на основе стандарта AFDX. Система является модульной и сочетает в себе удобный интерфейс для интерактивного задания входных данных задачи и отображения результатов работы алгоритма.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Alena R. L. et al. Communications for integrated modular avionics //Aerospace Conference, 2007 IEEE. IEEE, 2007. P. 1 — 18.
2. Aircraft DataNetwork. Part 7. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network. // Aeronautica lRadio, Inc. – 2012.
3. Scharbarg J. L., Fraboul C. Methods and tools for the temporal analysis of avionic networks // New trends in technologies: control, management, computational intelligence and network systems. 2010. P. 413 — 438.
4. Буздалов, Д. В., Зеленов, С. В., Корныхин, Е. В. И др. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики // Труды ИСП РАН. 2014. Т. 26. № 1. С. 201 — 230.
5. Anand M. et al. Formal modeling and analysis of the AFDX frame management design // Object and Component — Oriented Real — Time Distributed Computing, 2006. ISORC 2006. Ninth IEEE International Symposium on. IEEE, 2006. P. 7.
6. Saha I., Roy S. A finite state modeling of AFDX frame management using spin // Formal Methods: Applications and Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 227 — 243.
7. EC Comp GmbH: [сайт]. URL: http://eccomp.de/en/afdxsuite — en.html (дата обращения: 06.01.2016).
8. MHZ Solutions: [сайт]. URL: http:// http://www.mhz — avionics.com (дата обращения: 06.01.2016).
9. Al Sheikh A. et al. Optimal design of virtual links in AFDX networks // Real — Time Systems. 2013. Т. 49. N. 3. P. 308 — 336.
10. Seok Y. et al. Explicit multicast routing algorithms for constrained traffic engineering // Computers and Communications, 2002. Proceedings. ISCC 2002. Seventh International Symposium on. IEEE, 2002. P. 455 — 461.

1. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-07-01237. [↑](#footnote-ref-1)