

FC-AE-ASM 网络数据发送控制算法研究

丁凡 宋丽茹 熊华钢

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 该文研究 FC-AE-ASM(Fibre Channel-Avionics Environment- Anonymous Subscriber Messaging, 光纤通道-航空电子环境-匿名订户消息)网络的数据发送控制问题。从 FC-AE-ASM 网络的基本原理出发,提出了基于时间片轮转的数据发送控制算法,推导出在该算法下数据集合严格实时的充分必要条件,以链路占用率为性能衡量指标,证明在最差条件下,采用该算法后 FC-AE-ASM 网络的实时性可以得到保证。最后采用 OPNET 进行了仿真,通过结果分析,说明了理论分析的正确性。

关键词: 通信网络; 光纤通道; 数据发送控制; 链路占用率; 时间片轮转

中图分类号: TP393. 04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1509-04

A Data Transmission Control Algorithm for FC-AE-ASM Network

Ding Fan Song Li-ru Xiong Hua-gang

(School of Electronics and Information Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper studies the data transmission control with FC-AE-ASM (Fibre Channel-Avionics Environment- Anonymous Subscriber Messaging) network. The periodic task model in real-time communication is adopted. Based on the basic principle of FC-AE-ASM network, a data transmission control scheme is proposed based on the time slice rotation. The necessary and sufficient condition of guaranteeing data deadlines under the data transmission control scheme is derived. Taking the achievable link occupation ratio in the worst case as the main index, the superiority of the control scheme is also derived and finally tested with OPNET simulation results.

Key words: Communication network; Fibre channel; Data transmission control; Link occupation ratio; Time slice rotation

1 引言

光纤通道(Fibre Channel, FC)协议具有高速率、低延迟、低位错率等特性,能够很好地满足新型航空电子互连系统的要求,已成为航空电子统一网络的主要候选协议^[1]。针对 FC 技术军事应用的需求,FC 标准开发组织建立了一个研究 FC 用于航空电子环境的分委员会,专门针对 FC 技术如何应用于航空电子领域而展开研究工作。该分委员会制定出了一组草案,即光纤通道航空电子环境(Fibre Channel Avionics Environment, FC-AE),其主要内容和作用是描述并发展以 FC 为基本标准的航空电子增强专用系统^[2]。FC-AE 提出一种上层协议 FC-AE-ASM,该协议用于支持航空电子应用的处理器、传感器和显示器之间确定、安全、低延迟的通信^[3]。但是在 FC-AE-ASM 协议中并未给出数据发送的控制算法,如何合理地安排网络中各个节点上数据的发送,使得网络既能满足所有数据实时性要求,又提供尽可能大的网络吞吐能力,是一个重要的理论和工程问题。

目前,对于 FC 网络研究最多的是在存储局域网方面,研究的内容主要集中在 FC 的传输速率、网络互连和上层协议映射 3 部分^[4-6],研究方法上侧重于平均数据延时、平均队列长度和平均吞吐量等网络平均统计特性。在航空电子领域的研究主要集中在概念和体系结构方面,文献[7]对 FC 用于新型航空电子系统的体系结构进行了论述,文献[1, 8]对新型航空电子系统的上层协议映射进行了分析,强调将 FC 移植到航空电子环境下所应研究的实时性问题。但是至今未见研究 FC-AE-ASM 协议数据发送控制的文献。在上述研究背景下,本文对 FC-AE-ASM 协议的数据发送控制方法进行了研究,提出了基于时间片轮转的数据发送控制算法,导出了在该算法下数据集合严格实时的充要条件,并且推导证明了采用该算法的优越性。

2 FC-AE-ASM网络模型

FC-AE-ASM协议定义了实时FC网络中支持FC-AE-ASM上层协议必要的特征。但是协议中并未给出FC-AE-ASM数据的通信方式和控制方法,本节首先对FC-AE-ASM网络模型进行定义。

2.1 网络结构模型

下一代航空电子网络将主要使用交换式网络拓扑,因此本文主要讨论基于交换式网络的FC-AE-ASM协议的性能。协议规定,在交换式网络中,每条FC-AE-ASM数据都是节点主动发出的,没有触发数据,接收节点只要接收数据即可,无须知道数据的发送节点地址。接收节点将根据数据的标识符来确定是否是自己需要的数据和该条数据的含义。

2.2 数据模型

FC-AE-ASM网络中,每条数据都有唯一的32位的ID,根据数据的ID来识别数据的内容,每条数据对应一条数据流。设网络中共有 n 条实时数据流,按照数据流发送周期由小到大排列分别用 S_1, S_2, \dots, S_n 表示,组成数据集合 M ,即

$$M = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \quad (1)$$

航空电子网络中数据的格式和长度都是固定的,且大部分为周期消息,非周期消息也可以确定其发送的最大时间间隔,因此对于任意数据流 S_i ,有如下定义: C_i 表示第 i 个数据流的长度; P_i 表示第 i 个数据流的数据产生周期, P_{\min} 定义为周期最小值,数据流最大允许延迟时间也为 P_i ; v 表示网络中每条链路的传输速率(各条链路传输速率相同); U_i 表示 M 中第 i 个数据流对链路占用的要求, $U_i = (C_i/v)/P_i$,网络总的链路占用率为所有 U_i 之和,定义为 $U = \sum_{i=1}^n U_i$ 。

3 数据发送控制算法

3.1 数据发送控制模型

数据发送控制模型是一个基于时间片轮转的模型,有如下定义: P_{MSC} 表示数据发送控制程序的运行周期; MSCT_i 表示第 i 个时间片分配到的时间值; φ_i 表示在上一个时间片 MSCT_i 发送数据结束到下一个时间片 MSCT_{i+1} 发送数据开始的时间间隔,在 P_{MSC} 内所有的时间间隔为 $\varphi = \sum \varphi_i$ 。

数据发送控制模型描述如下:网络中所有的FC-AE-ASM数据发送都是按照时间片轮转的方式进行控制的,时间片轮转周期为 P_{MSC} ,在轮转周期 P_{MSC} 内划分有 n 个时间片,这 n 个时间片与 n 个数据流一一对应,第 i 个时间片的值 MSCT_i 为数据流 S_i 在本次发送中数据发送时间的最大值。每个FC-AE-ASM节点中按数据的周期从小到大的顺序排列有 n 个数据流的列表,在通信过程中,以时间片轮转的方式依次对列表中的数据流进行查询,如果查询到第 i 个数据流需要发送时,则该数据流可以在对应的FC-AE-ASM节点上在时间片值 MSCT_i 规定的时间内进行数据发送。

3.2 约束条件

为了保证数据集合 M 中的所有数据都能得到发送,轮转周期 P_{MSC} 要满足:

$$P_{\text{MSC}} < P_{\min} \quad (2)$$

考虑到两次发送的时间间隔开销,在时间片轮转算法中用于发送数据的时间片值 MSCT_i 应满足:

$$\sum_{i=1}^n \text{MSCT}_i \leq P_{\text{MSC}} - \varphi \quad (3)$$

对任意时间间隔 t ,用 $Y_i(t)$ 表示 M 中第 i 条数据发送需要的最小时间量,则第 i 条数据在 P_i 内,应有足够发送该数据的时间,因此对于任意数据流 S_i 应满足:

$$Y_i(P_i) \geq C_i/v \quad (4)$$

对于 M 中的数据流,如果采用的算法既能满足式(3)又能满足式(4),那么数据流可以实现实时传输。

3.3 时间片值 MSCT_i 分配方法

根据文献[9]中的方法,对于时间片轮转中任意时间间隔 t , M 中第 i 条数据发送需要的最小时间量可以表示为:

$$Y_i(t) = \lfloor t/P_{\text{MSC}} \rfloor \text{MSCT}_i \quad (5)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 表示对括号中的 \cdot 向下取整,以下类同。从式(5)可知, $\lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor \text{MSCT}_i$ 为 i 节点在任意时间间隔 $(t_0, t_0 + P_i)$ 内可用于发送数据的时间, C_i/v 为数据流传输时间,将二者相比较,在满足式(4)下取时间片值的最小值,则可得到 MSCT_i 的链路占用率匹配的确定方法:

$$\text{MSCT}_i = \frac{C_i}{v \lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor} \quad (6)$$

3.4 轮转周期 P_{MSC} 的计算方法

由式(2)和式(3)可得 $\sum_{i=1}^n \text{MSCT}_i < P_{\text{MSC}} < P_{\min}$,当 MSCT_i 由式(6)确定时,式(3)一定成立,所以 $P_{\text{MSC}} < P_{\min}$ 即可。通常情况下取:

$$P_{\text{MSC}} \approx P_{\min}/2 \quad (7)$$

3.5 严格实时的充分必要条件

保证数据集合严格实时必须同时满足式(3)和式(4)。对于任意数据集合,对每个数据都需要验证式(4)成立十分繁琐,下面将证明式(6)中 MSCT_i 的取值能够保证数据集合 M 中所有数据的实时传输。

定理1 对于任意给定数据集合 M ,如果在数据发送控制算法中 MSCT_i 按式(6)取值,则当且仅当 $\sum_{i=1}^n \text{MSCT}_i \leq P_{\text{MSC}} - \varphi$ 时, M 中所有数据满足最大允许延迟时间要求。

证明

$$\begin{aligned} (1) \text{充分性: 把 } \text{MSCT}_i &= \frac{C_i}{v \lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor} \text{ 代入式(5)得: } Y_i(P_i) \\ &= \lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor \text{MSCT}_i = \lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor \frac{C_i}{v \lfloor P_i/P_{\text{MSC}} \rfloor} = \frac{C_i}{v} \end{aligned}$$

(2)必要性:由式(3)可得定理的必要性。证毕

式(3)为定理1的充分必要条件,当算法不满足式(3)时,必然有数据得不到实时发送,其延迟时间将超过最大允许延迟时间要求。因此,数据发送控制算法的实时性保证条件为式(3),否则,网络的实时性得不到保证。

4 链路占用率分析

在数据发送控制算法中,只要链路占用率小于 U_v ,则网络中所有数据的实时性都能得到保证,称 U_v 为FC-AE-ASM网络在该数据发送控制算法中的可达链路占用率。

引理1 对于任意给定的数据集合 M ,如果在数据发送

控制算法中 $MSCT_i$ 按式(6)取值, 且数据集的链路占用率满足: $U \leq \frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right)$, 那么 $\sum_{i=1}^n MSCT_i \leq P_{MSC} - \varphi$ 。

证明 由已知条件有: $\frac{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor}{P_i/P_{MSC}} \geq \frac{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor + 1} \geq$

$$\frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1}, \text{ 则: } U \leq \frac{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor}{P_i/P_{MSC}} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right).$$

设 M 中存在 P_u 使 $\frac{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor}{P_i/P_{MSC}}$ 值最小, 将 P_u 和 $U = \sum_{i=1}^n U_i$ 代入

$$\text{上式整理得: } \sum_{i=1}^n U_i \frac{P_u/P_{MSC}}{\lfloor P_u/P_{MSC} \rfloor} \leq 1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}.$$

$$\text{对任意 } i: \sum_{i=1}^n U_i \frac{P_i/P_{MSC}}{\lfloor P_i/P_{MSC} \rfloor} \leq \sum_{i=1}^n U_i \frac{P_u/P_{MSC}}{\lfloor P_u/P_{MSC} \rfloor} \leq 1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}.$$

由定理 1 可知 $\left[\frac{P_i}{P_{MSC}}\right] = \frac{C_i}{\nu MSCT_i}$, 代入上式得: $\sum_{i=1}^n MSCT_i$

$\frac{U_i P_i}{C_i/\nu} \leq P_{MSC} - \varphi$ 。其中 $U_i P_i$ 为时间间隔 P_i 内产生的平均数据时间, 则 $U_i P_i \geq C_i/\nu$, 所以 $\sum_{i=1}^n MSCT_i \leq P_{MSC} - \varphi$ 。

证毕

定理 2 对于任意给定的数据集 M , 如果在数据发送控制算法中 $MSCT_i$ 按式(6)取值, 定义最坏情况下的可达链路占用率用 U_v^* 表示, 则

$$U_v^* = \frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right) \quad (8)$$

证明

(1)由定理 1 和引理 1 可知式(8)成立意味着数据实时性得到保证。

(2)下面证明对于任意给定实数 ξ , $0 < \xi < 1$, 至少存在一个数据集, 该数据集对应的链路占用率 $U \leq \frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right) + \xi$, 使得 $\sum_{i=1}^n MSCT_i > P_{MSC} - \varphi$, 即不满足式(3)。

给定 P_{MSC} 和 ξ , 假设 $P_{\min} \geq P_{MSC}$, $\alpha = \lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor$, $\xi' = \min(\alpha + 1 - P_{\min}/P_{MSC}, \xi)$, 则有 $\alpha \geq 1$, $0 < \xi' < 1$;

构造一个数据集 M' , 具有下列参数:

$$P_1 = P_{\min}, C_1 = \nu \xi' P_{\min}, P_2 = (\alpha + 1 - \xi') P_{MSC}, C_2 =$$

$$\frac{\nu \alpha}{\alpha + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right) P_2.$$

$$U = U_1 + U_2 = \xi' + \frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right)$$

由于 $\xi' = \min(\alpha + 1 - P_{\min}/P_{MSC}, \xi)$, 可得 $\xi' \leq \xi$; 所以

$$U \leq \frac{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor}{\lfloor P_{\min}/P_{MSC} \rfloor + 1} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right) + \xi.$$

$$\sum_{i=1}^2 MSCT_i = MSCT_1 + MSCT_2 = \frac{\xi' P_{\min}}{\alpha} + \frac{\alpha}{\alpha + 1} (P_{MSC} - \varphi) \frac{\alpha + 1 - \xi'}{[\alpha + 1 - \xi']} = (P_{MSC} - \varphi) + \xi' \left(\frac{P_{\min}}{\alpha} - \frac{P_{MSC}}{\alpha + 1}\right) + \frac{\xi' \varphi}{\alpha + 1}.$$

由于 $P_{\min} \geq P_{MSC}$, $0 < \xi' < 1$, $\alpha \geq 1$, $\varphi > 0$; 则

$$\xi' \left(\frac{P_{\min}}{\alpha} - \frac{P_{MSC}}{\alpha + 1}\right) + \frac{\xi' \varphi}{\alpha + 1} > 0.$$

$$\text{所以 } \sum_{i=1}^2 MSCT_i > P_{MSC} - \varphi. \quad \text{证毕}$$

定理 2 给出了最坏情况下可达链路占用率 U_v^* 的表达式, 把式(7)代入式(8)中可得: $U_v^* = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\varphi}{P_{MSC}}\right)$ 。

U_v^* 的计算公式中 φ 是所有上一个时间片发送数据结束到下一个时间片发送数据开始的时间间隔的总和, $\varphi \ll P_{MSC}$, 因此

$U_v^* \approx 2/3 \approx 66.67\%$, 即在最坏情况下, 数据集严格实时条件下的可达链路占用率约为 66.67%, 证明采用本文的数据发送控制算法, FC-AE-ASM 网络的实时性可以得到保证。

5 仿真分析

对于本文提出的基于时间片轮转的数据发送控制算法采用 OPNET Modeler 进行了仿真分析。仿真场景为交换型拓扑的 FC-AE-ASM 网络, 按照协议的规定对 FC-AE-ASM 网络节点和 FC 交换机进行了建模, 数据发送控制采用本文提出的数据发送控制算法, 使用第 3 类服务进行数据传输, 链路的传输速率为 1Gbit/s, 网络拓扑如图 1 所示。

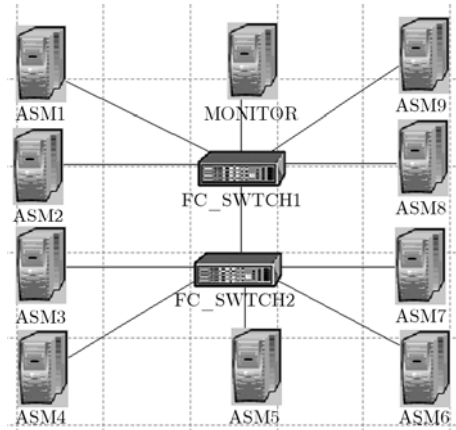


图 1 仿真网络拓扑图

在网络中, 共有 9 个 FC-AE-ASM 网络节点和 1 个监视节点, 所有的节点通过两个 FC 交换机连接成交换型网络, 9 个 FC-AE-ASM 节点按照基于时间片轮转的数据发送控制算法控制整个网络的数据发送; 监视节点只接收数据, 并进行仿真结果的收集和统计。网络的数据流特征如表 1 所示。

表1 数据流特征表

数据编号	数据长度 (Byte)	发送周期 (μs)	最大允许 延迟(μs)
A1(ASM1 \rightarrow)	200	100	100
A2(ASM2 \rightarrow)	1000	120	120
A3(ASM3 \rightarrow)	4000	250	250
A4(ASM4 \rightarrow)	2000	500	500
A5(ASM5 \rightarrow)	8000	600	600
A6(ASM6 \rightarrow)	100	80	80
A7(ASM7 \rightarrow)	1500	200	200
A8(ASM8 \rightarrow)	400	150	150
A9(ASM9 \rightarrow)	5000	180	180

将数据延迟时间率作为衡量网络实时性的指标,数据延迟时间率定义为数据的实际传输延迟时间与最大允许延迟时间的比率。仿真共运行 90000 μs ,表 2 给出了监视节点上采集到的仿真统计结果,延迟时间率仿真结果如图 2 所示。

表2 仿真数据统计结果表

仿真项	仿真数据
仿真时间	90000 μs
最小延迟时间率	13.628%
最大延迟时间率	73.516%
平均延迟时间率	39.232%
超过最大允许延迟时间的数据条数	0

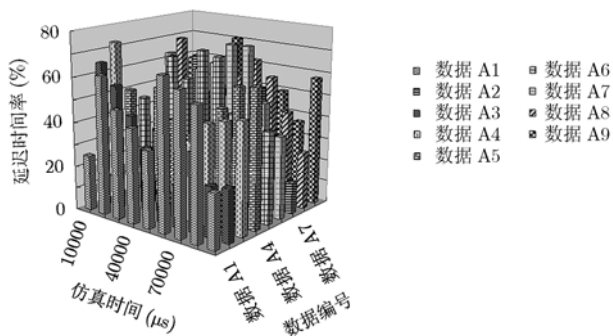


图2 延迟时间率柱状图

从表 2 和图 2 中可以看出,没有数据的实际传输延迟时间超过最大允许延迟时间(最大延迟时间率为 73.516%,超过最大允许延迟的周期数据条数为 0)。仿真结果表明,基于时间片轮转的数据发送控制算法可以很好的满足 FC-AE-ASM 网络中所有数据流对实时性的要求。

6 结束语

本文根据 FC-AE-ASM 协议,提出了以保证数据实时传输和提供尽可能大的网络吞吐能力的基于时间片轮转的数据发送控制算法;对该算法的实时性能进行了理论分析和 OPNET 仿真实验;证明了采用该算法,即使在最坏情况下数据集合严格实时的可达链路占用率约为 66.67%,网络的实时性可以得到保证。为 FC-AE-ASM 网络在关键航行和关键任务系统中的工程设计与优化提供了理论依据。

参考文献

- [1] Gaska T D. COTS fibre channel network technology insertion into avionics systems[C]. IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference, Owego, USA, July 1998: 120-127.
- [2] INCTIS. T11/02-041v1-Fibre Channel-Avionics Environment[S]. Englewood, USA, February, 2002.
- [3] INCITS. T11/08-013v1-FC-AE-ASM/AM1 [S]. Englewood, USA, January, 2008.
- [4] Fonseca Nelson L S da and Neto Antonio J R. A Comparative Study of the Performance of the Protocols iSCSi and Fiber Channel [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2007, 5(3): 150-156.
- [5] Zhang Yu, Feng Dan, and Tong Wei, *et al.* Implementation of FC-1 and FC-2 layer for multi-gigabit fibre channel transport [C]. FGCN 2007, Wuhan, China, Dec. 2007: 203-207.
- [6] Tsurusawa M, Miyamoto T, and Tanaka H. Experimental validation of fibre channel over multi protocol label switching for the wide-area storage area networks[C]. OFC/NFOEC 2007, KDDI R&D Laboratories Inc., Saitama, March, 2007: 1-10.
- [7] Owens Lawrence E. Rapid fault isolation of F/A-18E/F fibre channel network avionics [C]. IEEE Autotestcon Conference, Boeing Integrated Defense Syst., St. Louis, Sept. 2007: 241-249.
- [8] Murdock J R and Koenig J R. Open systems avionics network to replace MIL-STD-1553 [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2001, 16(8): 15-19.
- [9] Agrawal G, Chen Biao, and Zhao Wei, *et al.* Guaranteeing synchronous message deadlines with the timed token medium access control protocol [J]. *IEEE Trans. on Computers*, 1994, 43(3): 327-339.

丁 凡: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为航空电子网络互连技术和通信网络仿真技术。

宋丽茹: 女, 1975年生, 博士生, 研究方向为航空电子综合化。

熊华钢: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为嵌入式计算机网络、航空电子综合化和数字通信。