

# AFDX交换机在强实时条件下的分组调度

周 强 熊华钢 张晓林 张彦仲

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 研究了航空电子全双工交换式以太网 (AFDX, Avionics Full Duplex Switched Ethernet) 交换机分组调度方法的实时性能, 采用实时通信中的周期性任务模型, 依据 AFDX 协议“确定性网络”中关于交换机支持双优先级消息调度原则, 推导出了相应的交换机关键参数的数学表达, 提出了强实时约束下基于双优先级调度的负载匹配的分组调度方法 (DP-LM, Dual Priority-Load Match), 比较了单/双优先级分组调度的不同 (消息调度、关键参数和匹配方法), 算例结果表明: 由于低优先级消息的引入将会对高优先级消息的实时传输产生重要影响。

**关 键 词:** 航空电子; 分组调度; 交换机; AFDX (航空电子全双工交换式以太网)

**中图分类号:** TP 393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965 (2009) 04-0449-04

## Packet scheduling for AFDX switch under hard time constraints

Zhou Qiang Xiong Huagang Zhang Xiaolin Zhang Yanzhong

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** AFDX (avionics full duplex switched Ethernet) is a switched interconnection designed to meet requirements related to the ever increasing demand for civil aircraft such as A380. A packet scheduling scheme on hard real-time performance in AFDX switch was studied. Based on the dual-priority message scheduling principle of AFDX protocol, an analytical expression of its key parameter was derived, and a new packet scheduling scheme (DP-LM, dual priority-load match) under hard real time constraints was proposed. The different factors such as scheduling progress, key parameter and load-match method between dual-priority message scheduling and single-priority message one were deeply compared, and example resultants indicate that low priority message can impact on real time transmission for high priority one.

**Key words:** avionics; packet switching; switch; AFDX (avionics full duplex switched ethernet)

航空电子全双工交换式以太网 (AFDX, Avionics Full Duplex Switched Ethernet), 是由工业标准以太网经过适用性改进形成的, 具有更高的可靠性、抗恶劣环境适应性和确定的实时性, 已经应用于当前先进大型客机项目 (A380), AFDX 系统互连已成为构筑新一代民机航空电子系统的基础<sup>[1-2]</sup>. 航空电子等关键通信领域, 要求网络提供强实时约束下的消息传输, 特别强调互连系统中特定消息集合的延时控制和实时性能评价。

AFDX 属于交换式以太网 (SE, Switched Ethernet), 对于 SE 实时性的研究, 多集中于网络演算 (NC, Network Calculus) 方法; 文献 [3] 基于 NC

给出 SE 的最大延迟计算方法, 但不适合具有优先级区分的网络. 文献 [4] 采用流量整形方法, 并基于 NC 理论研究端到端延迟, 该方法需要对协议标准进行适应性修改, 流量模式必须满足一定的突发性要求才能确保延迟要求. 另一个研究方向是针对交换机采用适合的分组调度方法和接入控制算法来提高系统的确定性延迟特性. 文献 [5] 通过在 SE 端节点和交换机上增加实时层来支持实时通信, 提出在交换机中采用分组调度、建立实时通道来确保实时周期消息的传输. 文献 [6] 针对 SE 提出一种确保周期性消息实时传输的分布式调度方法, 但没有给出消息的可行性条

件.文献[7]针对航电光纤通道(FC, Fiber Channel)交换机提出一种分组调度方法,考虑实时消息的情况,没有引入支持多优先级消息的机制,不适合AFDX交换机对双优先级消息调度的要求.

本文研究AFDX系统交换机中定长分组调度方法,依据AFDX交换机的消息调度原则,给出了双优先级情况下交换机关键参数 $X_i(t)$ 的数学表达,提出了强实时约束下基于双优先级调度的负载匹配的分组调度方法(DP-LM, Dual Priority-Load Match),同时比较了单优先级(SP, Single Priority)双优先级(DP, Dual Priority)分组调度的不同,算例结果表明:低优先级消息的引入将会对高优先级消息的实时传输产生重要影响.

## 1 AFDX交换节点模型

### 1.1 消息模型

采用实时通信中的周期性任务模型,每个交换机(交换节点)中有 $n$ 条入线和 $n$ 条出线<sup>[7]</sup>,每个入线均支持高低两类优先级消息(高优先级为实时消息,低优先级为非实时消息),所有消息流需要传送至出线;对于所有的高优先级消息,它们组成一个实时消息集合 $M_S$ ;对于所有的低优先级消息,它们组成一个非实时消息集合 $M_A$ ;表示为

$$\begin{aligned} M_S &= \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \\ M_A &= \{A_1, A_2, \dots, A_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

对于实时消息流(简称消息流) $S_i$ 和交换节点,有如下假设:消息流产生周期 $P_i$ ;消息流 $S_i$ 的消息产生周期.对于非周期性消息,则表示消息产生最小时间间隔;消息流最大长度 $C_i$ ;第 $i$ 个消息流的传输时间,包括网络协议规定的分隔符、帧头、信息域和校验域等帧的全部内容;输出链路的轮长 $L_{MR}$ ;交换节点在分组调度中每次轮转所允许的最大时隙数,分组调度轮转周期的上限;

消息流最大允许延迟时间等于消息流产生周期 $P_i$ ;消息流产生周期 $P_i$ 的最小值用 $P_{\min}$ 表示;

消息流与交换节点参数均以时隙为基本时间单位进行归一化,时隙归一化结果为1.

消息由一个二维数组表示:

$$S_i = (C_i, P_i) \quad (2)$$

消息流负载率 $U_i$ ,定义为

$$U_i = C_i / P_i \quad (3)$$

网络总的负载率为

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (4)$$

### 1.2 分组调度模型

进入交换节点的消息帧根据时隙大小重新打

包(见图1),设每个入线队列 $Q_i$ 对应实时消息集 $M_S$ 中一个消息 $S_i$ 并假定其工作在最差情形下: $n$ 条入线同时竞争一条出线.

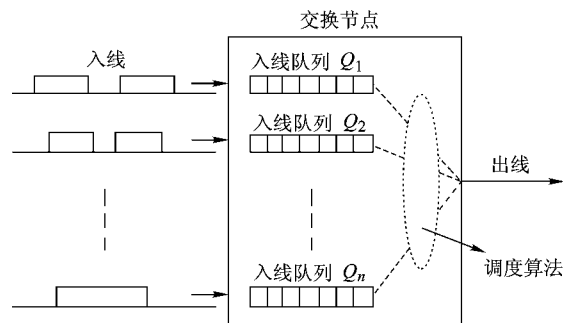


图1 分组调度模型

## 2 实时条件及关键参数

### 2.1 实时限制条件

在一个输出链路上,用 $n$ 表示已建立连接的数目(假定每个入线支持1个连接),调度程序为每个连接 $i$ 分配一个权值 $W_i$ .在强实时条件下,分组调度方法为每个连接所分配的权值应同时保证消息传输的时限约束条件和轮转权值约束条件.

1) 轮转权值约束条件:

$$\sum_{i=1}^n W_i \leq L_{MR} \quad (5)$$

为调度程序进行连接轮转的切换开销.

2) 时限约束条件:

对任意时间间隔 $t$ 用 $X_i(t)$ 表示入线队列 $Q_i$ 发送实时消息的最小时间量.消息集合 $M_S$ 中每个消息在最大允许延迟时间内,应有足够发送该消息的时间,因此对于任意消息流 $S_i$ 应有:

$$X_i(P_i) \geq C_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

若分组调度方法同时满足轮转权值约束条件和时限约束条件,则该分组调度方法可实现特定消息流的实时传输.

### 2.2 关键参数 $X_i(t)$

1) SP 当交换机每个入线均只支持实时消息(单优先级情况:如文献[7]中对FC的讨论)时,关键参数表达为<sup>[7]</sup>

$$X_i(t) = \lceil t / L_{MR} \rceil W_i \quad (7)$$

2) DP 依据AFDX交换机规则要求<sup>[11]</sup>:

· 交换机有优先级机制,可以支持两类优先级消息:高优先级(实时消息)和低优先级(非实时消息);

· 高优先级的消息可优先发送,但不能“抢夺(pre-empted)正在发送的低优先级消息帧.

根据 $X_i(t)$ 的定义,结合以上规则,建立以下分析模型.入线队列 $Q_i$ 发送消息的最小时间量是

通过“最差情形”来确定的。根据文献 [8] 的思路,最差情形定义为一组条件,在这些条件下,入线队列  $Q_i$  在任意时间间隔内可发送实时消息的时间量取得最小值。若该条件下消息的实时性能得到满足,则任何情况下均能保证消息的实时传输。根据 AFDX 交换机的调度规则 I 和 II,其“最差情形”包括以下条件:在  $t_0$  时刻之前,交换机中入线队列  $Q_i$  无高优先级消息待发送,而有足够的低优先级消息待发送;在  $t_0$  时刻,除入线队列  $Q_i$  的每个队列均有足够的消息(高优先级或低优先级)待发送;在  $t_0$  时刻,入线队列  $Q_i$  由于无高优先级的消息,低优先级的消息得到调度;恰在此时,高优先级的消息流  $S_i$  到达。

从  $X_i(t)$  的物理含义出发,以时间轴的原点 0 对应入线队列  $Q_i$  首次获得分组调度权的时刻,对应于“最差情形”的  $t_0$ 。从此刻起的第一个轮长  $L_{MR}$  内,由“最差情形”的定义,因为要发送已到达的低优先级消息,它不能发送刚到达的高优先级消息;入线队列  $Q_i$  在接着的第  $m_i$  次获得分组调度权后,如果经历的剩余时间小于  $W_i$  (见图 2 中 1 所指箭头位置),  $X_i(t)$  则为  $m_i - 1$  个  $W_i$  再加上剩余时间值;如果经历的剩余时间超过  $W_i$  (见图 2 中 2 所指箭头位置),  $X_i(t)$  则为  $m_i$  个  $W_i$ 。

综上所述,可得

$$X_i(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < L_{MR} \\ (m_i - 1)W_i + t - m_i L_{MR} & m_i L_{MR} \leq t < (m_i + 1)L_{MR} \\ m_i W_i & t \geq (m_i + 1)L_{MR} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $m_i = \lceil t/L_{MR} \rceil$ ,  $m_i \geq 1$ ;  $\lceil \cdot \rceil$  表示对实数取整。

图 3 给出了单/双优先级消息调度规则下的

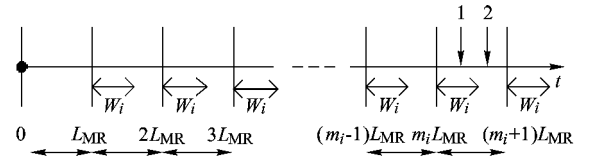


图 2 最差情形下  $Q_i$  发送实时消息的时间量

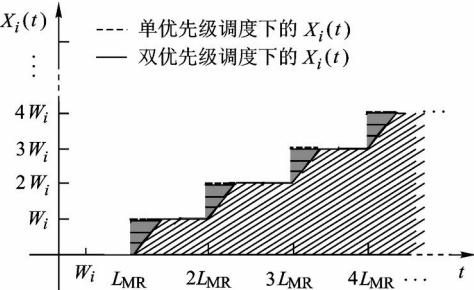


图 3 单/双优先级调度规则下  $X_i(t)$  的比较

关键参数  $X_i(t)$  (入线队列  $Q_i$  发送实时消息的最小时间量) 的比较。图 3 中“阴影”表示由单优先级消息规则下可传输的实时消息量,而在双优先级规则下不能用于实时消息传输的时间量。

3 分组调度方法

由  $X_i(t)$  的定义,则消息产生周期  $P_i$  内入线队列  $Q_i$  可发送消息的最小时间量为  $X_i(P_i)$ ,而待发送的消息量为  $C_i$ ;从负载匹配的角度出发,令消息发送量  $X_i(P_i)$  和消息量  $C_i$  相等,则可得一种负载匹配的轮转调度方法 (LM, Load Match)。

1) SP 当交换机每个入线均只支持实时消息时,由式 (7),可得负载匹配的轮转调度方法 (SP-LM) 为 [17]

$$0 \leq W_i - \frac{C_i}{\lceil P_i/L_{MR} \rceil} < 1 \quad (9)$$

2) DP AFDX 支持双优先级,由式 (8) 可得其负载匹配的轮转调度方法 (DP-LM) 为

$$W_i = \begin{cases} C_i & 0 \leq P_i - L_{MR} < L_{MR} \\ C_i/m_i & P_i - m_i \cdot L_{MR} < W_i \\ \frac{C_i - (P_i - m_i \cdot L_{MR})}{m_i - 1} & P_i - m_i \cdot L_{MR} < W_i \end{cases} \quad (10)$$

式中  $m_i = \lceil P_i/L_{MR} \rceil$ ,  $m_i > 1$ 。

4 算例分析

针对单/双优先级消息交换机分组调度实时性进行算例讨论。算例采用文献 [7] 中的消息集 (见表 1),则  $P_{\min} = 0.12 \text{ ms}$  假定  $L_{MR} = 0.06 \text{ ms}$ ,数据率为  $r = 100 \text{ MB/s}$  当 AFDX 采用无优先级策略 (未考虑非实时消息的影响) 的调度方法 (式 (9)) 时,由于该方法不能反映非实时消息引入对分组调度的影响,因此会产生与实际结果不一致的地方。本例中消息  $S_4$ ,  $S_7$  和  $S_9$ ,就不满足实时调度条件。

对于消息  $S_4$  ( $C_4 = L_4/r = 0.01 \text{ ms}$ , 其中  $L_4$  为消息字长度,为简化略去单位 ms),只有在  $0.125 \cdot (0.12 + 0.005)$  时刻才能发送完,不能满足最差情形下的实时调度传输条件 ( $0.125 > 0.12$ ),见表 2;而采用双优先级策略及分组调度方法 (式 (10)),可知当  $0.07$  时刻就能发送完消息  $S_4$ ,并满足实时调度传输条件 ( $0.07 < 0.12$ ),见表 3 消息  $S_7$ ,  $S_9$  与  $S_4$  有类似的结果。

综上所述,AFDX 交换机在强实时约束下的

分组调度方法必须考虑非实时消息的影响;单优先级分组调度方法由于没有考虑非实时消息引入所带来的影响,因此不能正确实现AFDX交换机对实时消息的分组调度;与之相反,双优先级分组调度方法是基于AFDX交换机消息调度机制得到的,充分考虑了强实时约束下非实时消息对分组调度方法的影响,因此可确保对实时消息集的分组调度.

表 1 单/双优先级分组调度方法在文献[7]消息集下的实时性对比

队列 $i$	消息 名称	消息 长度 $L_i/\text{bit}$	发送 周期 $P_i/\text{ms}$	无优先级策略(未考虑非实时消息的影响) 的调度方法(式(9))				双优先级策略(考虑非实时消息的影响) 的调度方法(式(10))			
				$W_i/\text{ms}$	轮转权值约 束条件?	时限约束 条件?	能否实时 传输?	$W_i/\text{ms}$	轮转权值约 束条件?	时限约束 条件?	能否实时 传输?
1	$S_1$	1 000	0.19	0.006 667	Y	Y	Y	0.006 667	Y	Y	Y
2	$S_2$	2 000	0.38	0.006 667	Y	Y	Y	0.006 667	Y	Y	Y
3	$S_3$	2 000	0.44	0.005 714	Y	Y	Y	0.005 714	Y	Y	Y
4	$S_4$	500	0.12	0.005	Y	N	N	0.01	Y	Y	Y
5	$S_5$	1 000	0.19	0.006 667	Y	Y	Y	0.006 667	Y	Y	Y
6	$S_6$	1 000	0.19	0.006 667	Y	Y	Y	0.006 667	Y	Y	Y
7	$S_7$	200	0.12	0.002	Y	N	N	0.004	Y	Y	Y
8	$S_8$	2 000	0.44	0.005 714	Y	Y	Y	0.005 714	Y	Y	Y
9	$S_9$	200	0.12	0.002	Y	N	N	0.004	Y	Y	Y
10	$S_{10}$	1 000	0.19	0.006 667	Y	Y	Y	0.006 667	Y	Y	Y
						不能实时调度		可进行实时调度			

表 2 无优先级策略最差情形下消息集  $S_4$  传输时序

时间 /ms	$S_4$		
	$T_s$	$T_a$	队列 $Q_i$
0	-	$W_4=0.005$	4
0.005	-	$W_5=0.02/3$	5
...	...	...	...
0.06	$W_4=0.005$	-	4
0.065	$W_5=0.02/3$	-	5
...	...	...	...
0.12	$W_4=0.005$	-	4

注:  $T_s$ 表示用于实时消息的时间片;  $T_a$ 表示用于非实时消息的时间片

表 3 双优先级策略最差情形下消息集  $S_4$  传输时序

时间 /ms	$S_4$		
	$T_s$	$T_a$	队列 $Q_i$
0	-	$W_4=0.01$	4
0.01	-	$W_5=0.02/3$	5
...	...	...	...
0.06	$W_4=0.01$	-	4

5 结 束 语

本文研究 AFDX系统交换机中定长分组调度方法,依据 AFDX协议调度原则,给出了双优先级情况下交换机关键参数  $X_i(t)$ 的数学表达,提出了强实时条件下基于双优先级调度的负载匹配的分组调度方法(DP-LM),比较了单双优先级分组调度的不同,算例结果表明:由于低优先级消息的引入将会对高优先级消息的实时传输产生重要影响.研究结果将为 AFDX实时系统中交换网络的工程设计与优化提供了理论依据.

参考文献 (References)

[1] ARNC 664, Aircraft data network[S]. 2002

[2] Francois Jean: Using AFDX as 429 replacement [EB/OL]. France: Airbus France, 2004 [2008-04-15]. [http://www.globalink.biz/2004/presentations/using\\_afdx\\_429\\_replacement.pdf](http://www.globalink.biz/2004/presentations/using_afdx_429_replacement.pdf)

[3] Georges J P, Rondeau E, Divoux T. Evaluation of switched Ethernet in an industrial context by using the network calculus [C]//4th IEEE Int Workshop on Factory Communication Systems USA: IEEE, 2002: 19 - 26

[4] Loser J, Hartig H. Low-latency hard real-time communication over switched Ethernet[C]//16th Euromicro Conference on Real-Time Systems USA: IEEE, 2004: 13 - 22

[5] Hoang H, Jonsson M, Hagström U, et al. Switched real-time Ethernet with earliest deadline first scheduling protocols and traffic handling[C]//16th Int Parallel and Distributed Processing Symposium. USA: IEEE, 2002: 94 - 99

[6] Kim M K, Lee H C. Periodic message scheduling on a switched Ethernet for hard real-time communication [C]//LNCS: High Performance Computing and Communications Berlin: Springer Berlin, 2006: 457 - 466

[7] 林强,熊华钢,张其善. 光纤通道交换机在强实时约束下的分组调度[J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 570 - 575  
Lin Qiang, Xiong Huagang, Zhang Qishan. Packet scheduling for fibre channel switched fabric under hard real time constraints [J]. Chinese Journal of Computer, 2006, 29(4): 570 - 575 (in Chinese)

[8] 周强,熊华钢,罗志强. LTPB网络带宽分配策略的实时性能研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1): 20 - 23  
Zhou Qiang, Xiong Huagang, Luo Zhiqiang. Research on real-time performance of bandwidth allocation for LTPB network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(1): 20 - 23 (in Chinese)

(责任编辑: 娄 嘉)