

AFDX 协议性能分析及调度算法研究

陈 昕^{1,2}, 周拥军³, 蒋文保¹, 万剑雄¹

(1. 北京信息科技大学信息安全系, 北京 100101; 2. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084;
3. 洛阳光电设备研究所电子部, 河南洛阳 471009)

摘 要: 本文围绕航空电子网络数据传输协议 AFDX 的关键技术——虚电路调度算法, 进行了深入分析, 提出了 AFDX 静态优先级队列调度算法 AVLSP. 运用 Network Calculus 理论与方法, 对 AVLSP 算法进行理论证明, 并构建仿真平台, 对所提出的 AVLSP 调度算法进行仿真验证, 结果证明 AVLSP 调度算法有效地减少了紧急数据的最大延迟抖动, 较好地满足了航空电子网络数据传输的实时性要求.

关键词: 航空电子全双工交换以太网; 网络演算; 延迟上界; 抖动分析

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 05-1000-06

Performance Analysis of AFDX Protocol and Scheduling Algorithm

CHEN Xin^{1,2}, ZHOU Yong-jun³, JIANG Wen-bao¹, WAN Jian-xiong¹

(1. Department of Information Security, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;
2. Computer Science and Technology Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Department of Electronics, Luoyang Institute of Electror-optical Equipment, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: This paper focuses on key technique in avionics data bus AFDX protocol——Virtual Link Scheduling Algorithm. We give AVLSP, AFDX Virtual Link Static Priority scheduling algorithm, to improve the performance of AFDX networks. Network Calculus theory is used in modeling and analyzing AVLSP. A simulation platform is also constructed to test the algorithm. The final results confirm that AVLSP algorithm can effectively reduce transmission delay of emergency data and satisfy needs for real-time data transmission in avionics data networks.

Key words: avionics full duplex switched ethernet (AFDX); network calculus; delay bound; jitter analysis

1 引言

航空电子网络数据传输协议作为航空电子综合系统的重要组成部分, 一直受到航空电子技术研究领域的高度重视. 近年来, 美、法、德等发达国家围绕着航电网络技术, 进行了大量的研究, 取得了一些成果, 如空中客车 A-380 的航电网络协议 AFDX^[1] (Avionics Full Duplex Switched Ethernet, 航空电子全双工交换以太网) 就是其中之一.

本文围绕 AFDX 协议的关键技术, 即 AFDX 的虚电路调度算法, 进行了较为深入的研究与分析, 提出了 AFDX 静态优先级队列调度算法 AVLSP. 随后, 运用 NC (Network Calculus) 理论对 AVLSP 算法进行建模评价, 并进行了仿真验证.

2 AFDX 协议

2.1 AFDX 协议分析

AFDX 协议主要参考了商用 TCP/IP 协议的结构, 与 OSI/RM 的七层模型比较, 具有更强的针对性, 比较明确的定义了各个层次的功能与标准, 具体如图 1 所示.

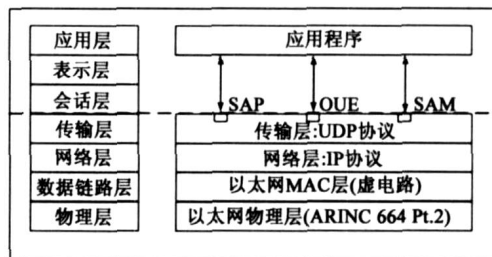


图1 AFDX协议与OSI/RM模型对比

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90104002); 北京市属市管高校人才强教计划 (No. PXM2008-014224-055928); 北京市教委科技发展面上项目 (No. KM200910772016)

AFDX 协议栈主要分为应用层、UDP 用户数据报协议层、IP 因特网协议层、以太网 MAC 层与以太网物理层等五个层次。AFDX 提供了服务接入点端口 (SAP)、队列端口 (QUE) 和采样端口 (SAM), 以方便不同类型数据的传输。AFDX 使用了 TCP/IP 协议簇中的 UDP 和 IP 协议。AFDX 的以太网 MAC 层与普通以太网有较大差别, 增加了流量整形和虚电路调度等实时数据传送保证机制。

2.2 AFDX 网络组成

AFDX 网络由三部分组成, 分别是航空电子子系统、端系统、AFDX 互连模块。AFDX 网络组成结构, 如图 2 所示。

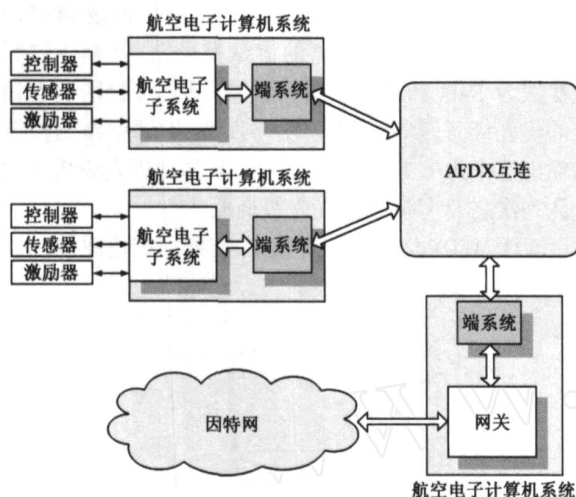


图2 AFDX网络组成

端系统作为 AFDX 网络数据传输的重要环节及 AFDX 网络的重要组成部分, 其性能直接影响到整个 AFDX 网络的性能。其主要作用是: 数据发送时, 端系统需要通过流量整形和调度策略等机制, 保证各种数据可以相互间无干扰的、实时的发送到目的地; 数据接收时, 端系统要进行完整性检验与冗余控制, 保证数据传输的可靠性。

3 端系统建模

3.1 端系统研究

AFDX 端系统中, 使用虚电路 (VL, Virtual Link) 机制来保证数据传输的实时性。在一条物理链路内部, 可以同时存在多条 VL, 其重要参数是 (1) BAG, 是指在一条虚电路内部相邻的两个 AFDX 帧之间的最小时间间隔, 其取值范围是 1-128ms; (2) L_{\max} , 是指虚电路中所能允许传输的 AFDX 帧的最大长度。一条虚电路的带宽可用公式 (1) 来计算:

$$(L_{\max} * 8 * 1000) / BAG \text{ bps} \quad (1)$$

AFDX 使用流量整形器来控制 BAG。每个虚电路所对应的数据流, 首先要经过流量整形器, 使其帧间隔不小于 BAG, 然后由虚电路调度器以 FIFO 的方式将数据

包发送到物理链路上。AFDX 端系统的逻辑结构, 如图 3 所示。

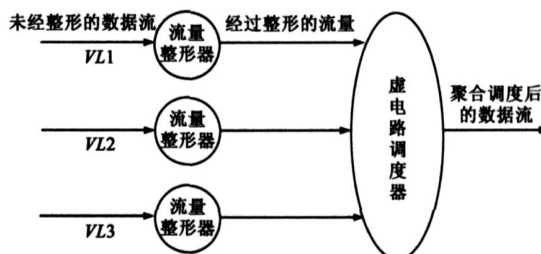


图3 标准AFDX端系统逻辑结构图

3.2 网络计算模型

美国学者 R.L. Cruz 在其 1991 年的著名论文 A Calculus for Network Delay Pt. I & II^[2,3] 中提出了可以用于计算任意拓扑结构的分组交换网中端到端的延迟和抖动的理论与方法, 从时延的角度较好的解决了网络性能评价问题。随后, L. Boudec^[4] 等人在引入系统论中的最小加代数等方法后, 提出了一套较为完备 NC 理论与方法。

在研究网络 QoS 问题时, 通常需要对网络中的数据流的特征进行量化描述。NC 理论使用聚集函数 $R(t)$ 来描述数据流, $R(t)$ 为时间区间 $[0, t]$ 内观察到的数据流的比特数。

NC 理论中的两个重要概念是到达曲线与服务曲线^[4]。

定义 1 若存在一个定义在 $t \geq 0$ 上的广义递增函数, 则称 是数据流 R 的到达曲线当且仅当对于任意的 $s \leq t$, 都有 $R(t) - R(s) \leq f(t - s)$ 成立。

定义 2 若存在一个广义递增函数 且 $f(0) = 0$, 对于一个系统 S , 设其输入流和输出流的聚集函数分别是 R 和 R^* , 则称函数 是系统为数据流提供的服务曲线, 当且仅当 $R^* \leq R \otimes f$ 。

在已知节点的服务曲线 和输入数据流的到达曲线的情况下, 可以通过垂直偏移 $v(\cdot, \cdot)$ 和水平偏移 $h(\cdot, \cdot)$ 定量的计算出阻塞量上界和数据包延迟上界。

引理 1^[4] 若到达曲线为 的数据流, 流经一个服务曲线为 的网络系统, 在任何时刻, 若条件:

- (1) 是广义递增子加函数, 且 $f(0) = 0$
- (2) 是广义递增函数, 且 $f(0) = 0$ 成立, 则有:

(1). 阻塞量满足

$$R(t) - R^*(t) \leq v(\cdot, \cdot) = \sup_s \{ f(s) - R(s) \}$$

(2). 延迟满足

$$d(t) \leq h(\cdot, \cdot) = \sup_s \{ \inf_{t \geq s} \{ 0 : R(s) \leq f(t - s) \} \}$$

3.3 端系统计算

对于一个有 n 个输出虚电路的端系统, 有如下定理成立。

定理 1 (AFDX 端系统延迟) 考查一个标准 AFDX 端系统, 设它具有 n 个输出虚电路, 物理输出带宽为 C . 若第 i 号虚电路的配置参数是 BAG_i 和 l_{\max}^i , 且有 $\sum_{i=1}^n \frac{l_{\max}^i}{BAG_i} \leq C$, 则端系统中数据帧的延迟上界为:

$$d_{ES} = \frac{\sum_{i=1}^N l_{\max}^i}{C} \quad (2)$$

证明 将系统中的 n 个输出虚电路分别标记为 VL_1, VL_2, \dots, VL_n . 对于 VL_i , 其相应的流量整形器 S_i 相当于一个整形曲线为 $l_{\max}^i + \frac{l_{\max}^i}{BAG_i}t$ 的漏桶. 数据流经过整形后, 其到达曲线与整形曲线相同, 即有

$$i = l_{\max}^i + \frac{l_{\max}^i}{BAG_i}t$$

由于到达曲线具有累加性, 可知端系统需要处理的所有数据流的聚合到达曲线为:

$$= \sum_{i=1}^n l_{\max}^i + \frac{l_{\max}^i}{BAG_i}t$$

另一方面, 虚电路调度器采用 FIFO 调度策略, 即按照数据包的到达顺序进行服务. 由于物理输出链路带宽为 C 的端系统相当于一个整形曲线为 Ct 的贪心整形器, 其服务曲线就是整形曲线, 即:

$$= Ct$$

由引理 1, 可计算出数据包在端系统中的延迟上界为:

$$h\left(\sum_{i=1}^N l_{\max}^i + \frac{l_{\max}^i}{BAG_i}t, Ct\right) = \frac{\sum_{i=1}^N l_{\max}^i}{C}$$

则, 命题得证.

定理 1 表明, 若所有输出虚电路的带宽之和不超过物理链路带宽, 则数据帧在端系统中的延迟就是有界的.

推论 1 标准 AFDX 端系统中, 所有输出虚电路的延迟上界都相同.

可以通过式 (2) 计算推出该推论. 推论表明, 即使各个虚电路的配置参数不同, 虚电路的端系统延迟上界仍然相同. 由于不同种类的航空电子数据传输对实时性的要求不同, 即某些紧急数据的时延上界比普通数据的时延上界要小, 显然, FIFO 调度策略不能满足航空电子网络数据传输应用需要.

4 静态优先级队列调度 AVLSP 算法

在实际应用中, 不同种类的数据具有不同的时延需求. 航电网络中传输的数据可分为 4 类^[5]: (1) 非周期性、有极高时延要求的紧急数据, 如警报; (2) 周期性、有硬性时延要求的数据, 如传感器数据; (3) 非周期性、

有一定时延要求但不紧急的数据; (4) 非周期性、也没有时延要求的数据, 如文件传输. 本文只考察前三类实时数据.

通过对数据划分优先级, 可以有效的降低紧急数据的发送延迟. 本文在对传统优先级机制改进的基础上, 综合流量整形, 提出了 AVLSP 算法, 以改善 AFDX 端系统的性能.

不同类型的数据, 按照其紧急程度, 分别赋予其从高到低三个优先级. 数据流经过整形后, 进入相关优先级的缓冲队列中. 虚电路调度器工作通常以非抢占方式和工作保持方式进行优先级调度.

使用优先级队列调度策略后, 端系统的逻辑结构如图 4. S_i 为第 i 条虚电路的流量整形器, 其相应的配置参数为 BAG_i 和 l_{\max}^i . 数据流经过整形后, 分别进入相应的优先级队列中, 等待调度与发送. 设调度器物理链路输出速率为 $C \text{ bit/s}$. 1 号优先级队列的优先级最高, 2 号队列次之, 3 号队列的优先级最低.

对于 AFDX 优先级调度模型, 有如下结论成立.

未经整形的数据流 整形后的数据流

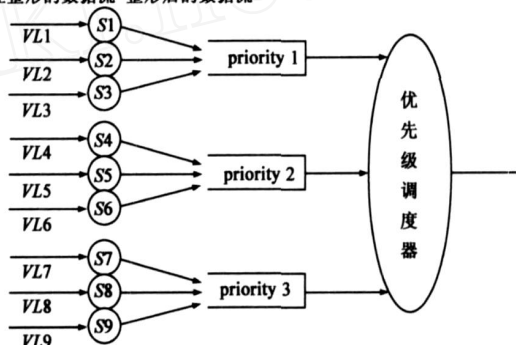


图4 AFDX优先级调度模型

定理 2 (AVLSP 的服务曲线) 考查一个使用 AVLSP 算法的 AFDX 端系统, AFDX 调度器为三个优先级队列提供的服务曲线分别为:

$$_1 = [C(t - \frac{l_{\max}^1}{C})]^+$$

$$_2 = [Ct - (\sum_{j \in E_1} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^2}{BAG_2}t) - l_{\max}^2]^+$$

$$_3 = [Ct - (\sum_{j \in E_1, E_2} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^3}{BAG_3}t)]^+$$

其中 $l_{\max}^i = \max l_{\max}^i, i \in \{E_2, E_3\}$,

$$l_{\max}^i = \max(l_{\max}^i), i \in E_3$$

证明 令 R_i 表示进入调度器的优先级为 i 的聚合数据流, R_i^* 表示离开调度器的优先级为 i 的聚合数据流, E_i 表示优先级为 i 的数据流的集合, 则 R_i 的到达曲线为:

$$i = \sum_{j \in E_i} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^i}{BAG_i}t, i = 1, 2, 3$$

首先,考察 R_1 . 对于任意的时间点 t_2 , 选择一个时间区间 $[t_1, t_2]$, t_1 为 R_1 的忙区间起始时刻, 即

$$t_1 = \sup\{t : t \leq t_2 \text{ 且 } R_1(t_1) = R_1^*(t_1)\} \quad (3)$$

由于 1 号队列的优先级最高, 因而只要 1 号队列一直有数据要发送, 就有

$$R_1^*(t_2) - R_1^*(t_1) = C(t_2 - t_1) - l_{\max}^j \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得

$$R_1^*(t_2) = R_1(t_1) + C(t_2 - t_1) - l_{\max}^j$$

同时, 由 $R_1^*(t_2) = R_1(t_1)$, 可得:

$$R_1^*(t_2) = R_1(t_1) + [C(t_2 - t_1) - l_{\max}^j]^+,$$

即

$$R_1^* = R_1 \otimes_1 \quad (5)$$

由定义 2, 可知 $\otimes_1 = [C(t - \frac{l_{\max}^j}{C})]^+$ 是调度器为 R_1 提供的速率—延迟服务曲线。

其次, 考察 R_2 . 同样的, 对于任意一个时刻 t_4 , 选择一个时间区间 $[t_3, t_4]$, 使得

$$t_3 = \sup\{t : t \leq t_4 \text{ 且 } R_1(t_3) = R_1^*(t_3) \text{ 且 } R_2(t_3) = R_2^*(t_3)\}$$

由于 R_1 具有较高的优先级, 所以只要 R_1 忙, R_2 就不会得到服务, 于是有:

$$R_2^*(t_4) - R_2^*(t_3) = R_2^*(t_4) - R_2(t_3) \quad (6)$$

$$C(t_4 - t_3) - (R_1^*(t_4) - R_1^*(t_3)) - l_{\max}^j$$

对于 R_1 , 不等式

$$R_1^*(t_4) - R_1^*(t_3) = R_1^*(t_4) - R_1(t_3)$$

$$R_1(t_4) - R_1(t_3) = C(t_4 - t_3) \quad (7)$$

成立. 由式(6)、(7)可得:

$$R_2^*(t_4) = R_2(t_3) + [C(t_4 - t_3) - l_{\max}^j]^+$$

, 即 $R_2^* = R_2 \otimes_2$, 其中

$$\otimes_2 = [Ct - (\sum_{j \in E_1} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^j}{BAG_j} t) - l_{\max}^j]^+$$

是调度器为 R_2 提供的速率—延迟服务曲线。

同理, 有

$$\otimes_3 = [Ct - (\sum_{j \in E_1, E_2} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^j}{BAG_j} t) - l_{\max}^j]^+$$

命题得证.

得到了 AVLSP 调度器对每个优先级队列的服务曲线, 队列中的数据帧排队时延上界可由引理 1 得出.

定理 3 (AVLSP 调度器的延迟上界) 在使用 AVLSP 调度器的 AFDX 端系统中, 各个优先级虚电路的延迟上界为:

$$d_1 = \frac{\sum_{j \in E_1} l_{\max}^j + l_{\max}^j}{C} \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{l_{\max}^j + \sum_{j \in E_1, E_2} l_{\max}^j}{C - \sum_{j \in E_1} \frac{l_{\max}^j}{BAG_j}} \quad (9)$$

$$d_3 = \frac{\sum_{j \in E_1, E_2, E_3} l_{\max}^j}{C - \sum_{j \in E_1, E_2} \frac{l_{\max}^j}{BAG_j}} \quad (10)$$

证明 三个优先级数据流的聚合到达曲线为:

$$i = \sum_{j \in E_1} l_{\max}^j + \frac{l_{\max}^j}{BAG_j} t, i = 1, 2, 3$$

由引理 1, 有

$$d_i = h(i, i)$$

其中 i 为调度器对优先级为 i 的缓冲队列的服务曲线, 其具体表达式可由定理 2 确定.

根据引理 1 水平偏移的计算公式, 可证定理 3 成立.

由定理 3 可知, 高优先级数据帧发送延迟明显小于低优先级数据帧的延迟. 这就克服了标准 AFDX 调度器中所有数据帧的延迟上界均相同的缺陷. 在航空电子网络数据传输环境中, 可以把紧急的数据赋予较高优先级. 另一方面, 从式(8)、(9)和(10)中, 可以看出, 低优先级的延迟上界与高优先级数据流的到达曲线有着密切的关系. 更确切地说, 高优先级的数据流到达曲线越大, 则低优先级的延迟上界越大, 反之亦然. 因此, 若高优先级数据的到达曲线过大, 会严重的影响低优先级数据的传输.

5 仿真与数据分析

为了对 AFDX 端系统的性能进行实证分析, 我们在 Linux 操作系统上, 构建了 AFDX 端系统仿真平台, 并考察了在实际应用环境中, AFDX 端系统的实时性.

5.1 AVLSP 算法设计与分析

ARINC664Pt. 7 中给出的数量整形器与虚电路调度器是分离的. AVLSP 算法, 综合了流量整形功能与优先级调度功能, 在一定程度上简化了系统的设计, 如算法 1 所示.

算法中 $q[i]$ 是第 i 号虚电路的控制信息结构, 其成员 $q.expect$ 是虚电路下次允许发送数据的时刻, $queue_count[prior[j]]$ 为优先级是 j 的虚电路的条数. 算法依照优先级的高低, 轮询各个虚电路, 若虚电路缓冲队列不空且其 $q.expect$ 最小, 则发送该虚电路的数据包, 并相应的更新 $q.expect$. $q.expect$ 更新前后至少差 $q.BAG$ 的时间间隔这样, 流量整形功能也可以一起完成.

while (TRUE) {

$k = 0$;

$t = \text{GetSysTime}()$;

for $cj = 0, j < \text{MAX_PRIORITY}; j++$ {

```

max = - 1;
l = queue . cont . prior[ j ];
for ( i = 0, i < queue . cont . prior[ i ], i ++ ) {
    d = t - q[ k ]. q . expect;
    if ( d >= 0 && d > max && isEmpty( k ) ) {
        max = d;
        to . be . sent = k;
        l = i;
    }
    k ++
}
if ( i < queue . cont . prior[ j ] )
    break;
}
if ( to . be . sent < q . num ) {
    send( to . be . sent , q );
    q[ to . be . sent ]. q . expect + = q[ to . be . sent ]
q . BAG;
}
}

```

算法 1 AVLSP 调度算法

在对该算法复杂性的分析中,由于空间复杂度为常量,所以这里着重考察其事件复杂度。

若端系统中共有 n 条虚电路,则在最差情形下,AVLSP 调度算法的时间复杂度为 $O(n)$,与采用轮询实现的 FIFO 算法复杂度相同。因此,AVLSP 算法在保证网络数据传输优先级的同时,仍然保持线性时间复杂度。

5.2 仿真环境

针对航空电子网络数据传输环境和所提出的 AVLSP 调度算法,构建面向实际应用的仿真环境。网络仿真共使用了 13 条虚电路。总带宽为 92.28Mbps。从配置上考虑,物理链路的负载较重。根据实际应用需要,所有的虚电路的都 i_{\max}^i 配置为 1518Bytes。对于先进先出调度方法,无优先级;而对于 AVLSP 算法,需考虑优先级。这里,AVLSP 算法的每条虚电路的优先级及 BAG 配置,如表 1 所示。

表 1 虚电路 BAG 配置表

BAG(ms)	priority 1	priority 2	priority 3
1	无	3 条	2 条
2	1 条	2 条	1 条
8	1 条	无	3 条

针对 FIFO 和 AVLSP 调度算法,仿真验证分析,共分为两部分:第一组实验的包长固定为 1518Bytes;第二组试验包长在 $[1, 1518]$ 区间上服从均匀分布。

从理论上,可计算出最差情形下每条虚电路的延迟抖动上界。对于 FIFO 调度,端系统中所有的虚电路的

延迟抖动上界都相同。利用公式(1),易知其值为 1599us。利用公式(5)、(8)和(9)可计算 AVLSP 优先级队列的延迟抖动上界,如表 2 所示。

表 2 AVLSP 调度延迟抖动上界

priority	1	2	3
jitter(μ s)	369	1066	3712

上界明显小于较低优先级的延迟抖动上界。

5.3 仿真与评价

仿真验证考察的主要指标是最大延迟抖动。为了更好的模拟真实情况,每条虚电路时间槽的起始时刻都是随机生成的。

固定包长仿真验证结果如图 5 所示。

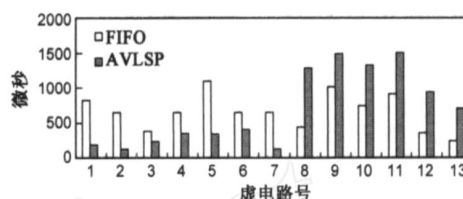


图5 固定包长仿真结果

随机包长仿真验证结果如图 6 所示。

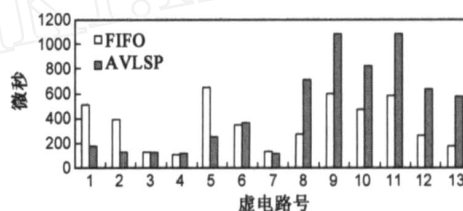


图6 随机包长仿真验证结果

仿真验证过程,除采用的调度策略和数据包长不同外,其它条件均相同。从验证结果可以看出:

(1) FIFO 调度与 AVLSP 调度产生的最大延迟抖动有着明显的差别。AVLSP 调度中高优先级虚电路的最大延迟较小。

(2) AVLSP 调度算法的延迟抖动上界明显的按照其优先级的高低呈阶梯状分布,基本与使用 NC 理论得到的分布相似。这种现象在固定数据包长的情况下更为明显。

(3) 仿真验证的延迟抖动最大值虽然与 NC 理论计算结果都呈阶梯状分布,但是仿真结果明显小于计算结果。AVLSP 算法仿真的延迟抖动最大值相当于理论计算的 50% 左右。NC 理论关注的是最差情形下的延迟,而仿真并没有达到最差情形。

6 结束语

航空电子网络数据传输协会 AFDX 协议,具有高带宽、低成本、高集成度和易维护等特点。本文围绕 AFDX 协议的调度策略,在充分研究并改进传统优先级调度算法的基础上,结合 AFDX 实际应用环境,提出了 AFDX

静态优先级队列调度算法 AVLSP, 运用 Network Calculus 理论与方法, 对 AVLSP 算法进行建模评价, 并构建仿真平台, 对所提出的 AVLSP 调度算法进行仿真验证。

理论计算和仿真结果均证明了 AVLSP 调度策略能有效的降低紧急数据的延迟抖动上界。在实际的航空环境中可以赋予紧急数据以较高的优先级, 可以优先发送。这样, 就可以满足航空电子网络数据传输的实时性要求。

未来的研究工作主要集中在调度算法性能的进一步完善, 如缓冲队列长度和数据帧在队列中的等待时间等因素的考察, 以期提高协议的运行性能, 更好地满足航空电子网络数据传输的实时性要求。

参考文献:

- [1] ARINC. Specification 664: Aircraft data network, part 7-deterministic networks[S]. 2005.
- [2] R L Cruz. A calculus for network delay, part I: Network elements in isolation[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1991, 37(1): 114 - 131.
- [3] R L Cruz. A calculus for network delay, part II: network analysis[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1991, 37(1): 132 - 141.
- [4] J - Y L Boudec, P Thiran. Network Calculus[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, LNCS volume 2050, 2004.

- [5] Ahlem Mifdaoui, Fabrice Frances, Christian Fraboul. Full duplex switched ethernet for next generation 1553B-based applications[A]. Proceedings of the 13th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS '07) [C]. Bellevue, WA: IEEE Computer Society, 2007. 45 - 56.

作者简介:



陈 昕 1965 年 10 月生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 2006 年 6 月起于清华大学计算机科学与技术博士后流动站从事计算机网络性能评价方面的研究。目前主要研究方向为计算机与航电网络性能评价、信息安全。
Email: chenxin@mail.tsinghua.edu.cn



周拥军 1971 年 6 月生, 洛阳光电设备研究所副总设计师, 博士, 研究员、硕士生导师。目前主要研究方向为图像处理、航电网络协议与性能评价。

蒋文保 1969 年 10 月生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。目前主要研究方向为网络与信息安全。

万剑雄 1982 年 6 月生, 硕士生, 目前主要研究方向为计算机与航电网络性能评价、信息安全。