

一种改善 AFDX 网络级联传输时延特性分析的方法

蔡稼阳,田 泽,张荣华,王 治,徐文进

(中国航空计算技术研究所,陕西 西安 710068)

摘 要:文中分析了 AFDX 级联网络中数据传输时间延迟的不确定性问题及造成该问题的内在原因,对传输时延的组成部分和影响因素进行描述,指出应用 AFDX 网络技术应先充分验证端到端时延上界值是否符合系统容限要求。介绍了计算时延上界的网络演算方法的基本原理及其利用对虚拟链路进行分组优化的算法理论,将该算法应用到某实验环境中的 AFDX 级联网络配置实例中,计算出实例中各数据流的时延上界并对计算结果的悲观性进行分析,最后得出优化后的算法来分析传输时延更能趋近实际的上界值。

关键词:AFDX 网络;传输时延上界;网络演算方法

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)05-0023-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.006

A Method of Delay Characteristics Analysis of Improving AFDX Network Cascade Transmission

CAI Jia-yang, TIAN Ze, ZHANG Rong-hua, WANG Zhi, XU Wen-jin

(Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

Abstract: The indeterminacy issue of the AFDX cascade network frame transmission delay and the underlying cause of the problem are analyzed. Composing of the end-to-end transmission delay and the influencing factors are described, pointed out that before the application of the AFDX network technology the end-to-end transmission delay should be fully validated, whether the upper bound of the delay is complied with the requirements of the system tolerance. The method to calculate the delay upper bound values namely the network calculation method with the corresponding optimizations using of virtual links grouping theory are introduced. The algorithm is applied to a AFDX cascade network instance of a test environment, calculated delay upper bounds of the frame streams in configuration instance are compared and analyzed, the pessimistic of results are analyzed, finally the analysis of the frame transmission delay with the group-optimized algorithm will be a better approach to get the actual upper bound value.

Key words: AFDX network; delay upper bound; network calculus method

0 引 言

随着机载网络嵌入式系统的不断更新换代和系统功能集成度的不断扩大,现代机载航电网络对数据交换质量和性能的需求也日益增加,传统的航空数据总线如 ARINC429、Mil-Std-1553B 因为其低数据传输率已经无法满足现代机载网络对数据传输的性能要求。航空电子全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX^[1])作为一种新型的民用航电网络总线协议即 ARINC 664 已经成功地应用到空中

客车公司的 A380 大型客机和波音公司的 B787 客机中。AFDX 网络协议通过全双工模式的节点网络直连线解决了以太网因为物理层的 CSMA/CD 访问机制而导致的网络不确定性问题^[2],但是不同 AFDX 端系统节点同时对同一个交换机输出端口输出缓冲区的竞争导致 AFDX 网络数据传输及数据响应仍然具有时间上的不确定性。因此,应用 AFDX 网络的一个重要问题是对 AFDX 数据传输的时间上的不确定性进行定量分析,保证其符合系统要求并处于系统容限之内,

收稿日期:2013-06-18

修回日期:2013-09-24

网络出版时间:2014-02-11

基金项目:“十二五”微电子预研(51308010601);中国航空工业集团创新基金(2010BD63111)

作者简介:蔡稼阳(1984-),男,福建泉州人,硕士,助理工程师,研究方向为嵌入式系统软件设计;田 泽,博士,研究员,研究方向为 SoC 设计、嵌入式系统设计、VLSI 设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1619.054.html>

以确保机载网络嵌入式系统任务的响应延迟限定在一个符合高实时性要求的范围之内^[3-5]。文中对 AFDX 网络数据传输的端到端时延的定义、组成部分及影响因素进行了分析,借助目前用于验证 AFDX 网络适航取证的通用方法理论即网络演算方法对实验环境下的 AFDX 级联网络配置实例进行数据传输时间延迟分析,以验证 AFDX 级联网络数据传输的实时性和延迟可确定性。

1 AFDX 网络端到端时延

AFDX 网络的端到端时延是指以数据帧最后一个比特位从源端系统发送的时刻为时间起点和以目的端系统成功接收到数据帧最后一个比特位为时间终点的时间区间。AFDX 网络的端到端传输时延 D_{AFDX} 包含四部分时延:源端系统时延、目的端系统时延、链路传输时延和交换机时延,由公式(1)表示:

$$D_{\text{AFDX}} = D_{T_{\text{is}}} + N \times (D_{\text{Frame}} + D_{\text{Switch}} + D_{\text{Buffer}}) + D_{\text{Frame}} + D_{R_{\text{is}}} \quad (1)$$

式中, $D_{T_{\text{is}}}$ 指的是 AFDX 网络中子系统的端系统发送数据帧的延迟,即从端系统协议栈中的 SAP 端口或队列端口缓冲区中的数据通过逻辑搬运到物理层的发送端口所需的时间,文中采用 $150 \mu\text{s}$ 作为最差情况下的端系统发送延迟^[5-6]; $D_{R_{\text{is}}}$ 指的是 AFDX 网络中子系统的端系统接收数据帧的延迟,即从物理层的接收端口搬运数据到端系统协议栈中的 SAP 端口或队列端口缓冲区所需的时间,文中采用 $150 \mu\text{s}$ 作为最差情况下的端系统接收延迟^[5-6]; D_{Frame} 指的是数据帧在物理链路上传输所需的时间,文中考虑链路带宽为 100 Mbps 和数据帧长度为 1518 字节的情况下, $D_{\text{Frame}} = \frac{(1518+20) \times 8}{100} = 123.04 \mu\text{s}$,其中添加的 20 字节为数据帧的帧前缀; N 指的是该数据帧在 AFDX 网络中通过的交换机个数; D_{Switch} 指的是交换机的技术延迟,文中采用的交换机技术延迟为最差情况下的 $100 \mu\text{s}$; D_{Buffer} 指的是数据帧在交换机的输出端口缓冲区停留的时间延迟,交换机的输出端口缓冲区队列执行的 FIFO 调度原则即先到先发,数据帧会因为不同的虚拟链路同时对同一个输出端口的输出缓冲区进行竞争而造成数据帧逗留于缓冲区无法及时发送,数据帧的发送时间便由当时的输出缓冲区的发送状态决定,因此该时间延迟是可变的随机值。

通过带入以上的常量可得出交换机网络的端到端传输时延为:

$$D_{\text{AFDX}} = N \times (223.04 + D_{\text{Buffer}}) + 423.04 \quad (2)$$

因此,AFDX 交换机网络的端到端传输时延上界值便由变量 D_{Buffer} 所决定,只有计算出每个虚拟链路的

D_{Buffer} 上界,就可以得出每个虚拟链路上的端到端传输时延上界。由于数据帧在输出端口缓冲区的时间延迟具有随机性,不利于对变量 D_{Buffer} 的分析,文中介绍基于 AFDX 网络整体性时间调度分析方法的计算传输时延的方法理论即网络演算理论。假设交换机的每个输出端口的缓冲区大小满足要求,不会造成任何的数据帧因为缓冲区满溢出而丢失。交换机输出端口的队列缓冲区的调度策略也是影响数据传输时延的一个重要因素,文中只考虑 FIFO 机制下无优先级区分的转发调度策略。

2 基于网络演算方法的传输时延上界计算

Grieu^[7]提出了应用网络演算方法来计算 AFDX 网络端到端传输时延上界并作了改进分析,该方法借助 AFDX 特有的网络特性对输出端口缓冲区的传输时延进行数学建模。

2.1 网络演算方法的基本原理

网络演算方法是一种专门分析由队列系统组成的工业网络的服务性能(QoS)的理论。队列系统是指组成网络的节点采用队列 FIFO 原则作为数据存储和转发的调度机制。通过网络演算理论可以对网络中的确定性指标的上限比如数据的实时响应时间和网络节点的缓冲区空间设置等进行量化估算。该理论已经成功地用于工业以太网的数据时延分析^[8]。网络演算理论建立在最小加代数(Min-Plus Algebra)的网络微积分方法上,将复杂的非线性的网络系统模型转变为线性的网络模型,以利于分析和处理。

考虑网络模型中的一条单一的数据流或数据链路, $A(t)$ 表示在某一时间区间 $(0, t]$ 内到达网络节点的数据流的所有比特位的累积和, $A^*(t)$ 表示在某一时间区间 $(0, t]$ 内从网络节点分流出的数据流的所有比特位的累积和, $S(t)$ 表示在某一时间区间 $(0, t]$ 内网络节点提供的数据流比特位服务的总和。假设初时刻时,公式 $A(0) = A^*(0) = S(0) = 0$ 成立。服务性能(QoS)的两个重要指标即缓冲区数据积压量和传输时延可以通过以上的函数来表示。

网络节点在时刻 t 的缓冲区积压量 $B(t)$ 定义如下:

$$B(t) = A(t) - A^*(t) \quad (3)$$

网络节点在时刻 t 的传输时延 $D(t)$ 定义如下:

$$D(t) = \inf\{\tau \geq 0: A(t) \leq A^*(t + \tau)\} \quad (4)$$

基于网络的传输属性网络演算理论采用进入曲线和服务曲线来建模网络系统,进入曲线对进入节点的数据流进行量化和限制,服务曲线对从节点分流的数据流进行量化和限制。基于数学方法最小加代数,两

个函数 f 和 g 的最小加卷积和最小加反卷积运算由公式(5)和(6)分别表示:

$$(f \otimes g)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} \{f(t-s) + g(s)\} \quad (5)$$

$$(f \oslash g)(t) = \sup_{u \geq 0} \{f(t+u) - g(u)\} \quad (6)$$

一条由输入函数 $A(t)$ 表示的数据流可以由一条进入曲线 $\alpha(t)$ 来限制,当且当 $A(t) \leq (A \otimes \alpha)(t)$ 条件成立。AFDX 网络中交换机和端系统的发送接收均执行流量控制机制,每条虚拟链路的进入流量函数可由漏桶模型 $\alpha(t) = \gamma * t + b$ 表示,其中 b 指的是虚拟链路的 S_{\max} 参数即漏桶模型的桶容量, γ 指的是漏桶的数据分速率即 $\gamma = S_{\max} / \text{BAG}$, BAG 为虚拟链路的带宽分配间隙(Bandwidth Allocation Gap)。假设某条虚拟链路的 S_{\max} 设置为 1 518 字节, BAG 设置为 1 ms, 这条虚拟链路所经的网络节点的进入曲线 α 为 $\alpha(t) = \gamma * t + b = 12.144 * t + 12144$ 。

一个网络节点为通过该节点的数据流提供一个数据分流服务,可由服务曲线 $\beta(t)$ 来限定此分流服务,当且当 $A^*(t) \geq (A \otimes \beta)(t)$ 条件成立。在这个情况下, $\alpha'(t) \geq (A \otimes \beta)(t)$ 即表示限定网络节点的 $A^*(t)$ 输出数据流作为进入下一个网络节点的递归进入曲线 $\alpha'(t)$ 。当交换机作为网络节点时,每个输出端口提供的服务曲线表示为速率延迟函数 $\beta(t) = R[t - T_l]^+$, 其中 R 指的是端口的数据传输速率, T_l 指的是交换机的技术延迟, $[x]^+ = \max(0, x)$ 。AFDX 网络交换机的链路传输速率均为 100 Mbps, 文中采用 $100 \mu\text{s}$ 作为交换机技术延迟的上限,即 $R = 100 \text{ Mbps}$, $T_l = 100 \mu\text{s}$ 。交换机节点的交换端口的服务曲线即为 $\beta(t) = 100[t - 100]^+$ 。根据文献[9]中得出的结论 $\alpha' = \alpha \oslash \delta_{D_{\max}}$, 其中 $\delta_{D_{\max}}$ 为交换机节点输出端口的延迟服务曲线, D_{\max} 为数据帧在交换机节点缓冲区的最大延迟时间,因为一个数据流上的数据包在节点输出端缓冲区的最大时间延迟为同时到达并争用的其他数据流上的各单个数据包发送传输时间之和。假设 α 进入曲线的数据流有一条争用数据流,其 S_{\max} 设置为 1 518 字节,那么 $D_{\max} = \frac{1518 \times 8}{100} = 121.44 \mu\text{s}$, 因为 α 的数据包最大只能被争用数据流的一个数据包延迟,可以得出 α 进入曲线从网络节点输出的新数据流的进入曲线即为 $\alpha'(t) = \gamma \times t + (b + D_{\max}) = 12.144 \times t + 12265.44$ 。

如图 1 所示,在 AFDX 网络中某一节点提供的服务曲线为 β , 该节点输入的数据流的进入曲线为 α , 从该节点输出的新数据流的进入曲线为 α' , 该数据流在该节点的传输时间延迟 $h(\alpha, \beta)$ 即为函数 α 和函数 β 的最大水平距离:

$$h(\alpha, \beta) = \sup_{s \geq 0} [\inf\{\tau: \tau \geq 0 \text{ and } \alpha(s) \leq \beta(s + \tau)\}] \quad (7)$$

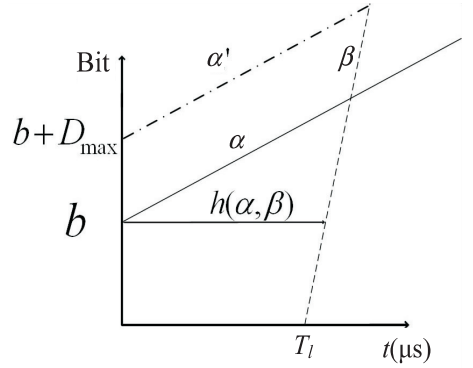


图 1 传输时间延迟 $h(\alpha, \beta)$

当网络节点的一个输出端口同时被至少两个数据流争用时,那么计算这个输出端口的传输时延上界所要考虑的进入曲线将是所有互相争用的数据流在该节点的进入曲线的累积和。AFDX 网络的虚拟链路即数据流是静态和预先配置的,一条端到端的链路可以看作是一个发送端系统、一个接收端系统和多个交换机端口的串联。网络演算方法从 AFDX 网络端系统的发送端口处开始对传输时延进行计算,因此,数据帧在一条数据链路上传输所造成的时间延迟,便是该数据帧在发送端系统处、接收端系统处以及在所有的交换机输出端口处的传输时间延迟上界的总和。

2.2 网络演算方法的分组优化计算

普通的网络演算方法在计算同一条物理链路上的多个虚拟链路争用时,将多条虚拟链路上的数据流的输入曲线进行叠加,计算出来的时延上界为多条虚拟链路的数据流同时发送到网络节点的输出端口的场景。这种情况,在 AFDX 网络并不会出现,同一个物理链路上的多条数据流无法同时发送,只能连续地发送,因此,鉴于同一条物理链路上的多个虚拟链路的连续传输性,可对网络演算方法进行优化,文献[7, 10-11]中提出了一种对多条虚拟链路按实际物理链路进行分组的优化理论,即在一条物理连接的数据流进入节点时只计算一条最优的进入曲线。

计算进入网络节点的最优进入曲线分为两部分,首先计算出共享同一条物理链路上的所有数据流的进入曲线的叠加和,然后引入一条新的进入曲线 $\alpha''(t) = R \times t + B$, 其中 B 指的是同一条物理链路上的所有数据流中的最大 S_{\max} , $R = 100 \text{ Mbps}$ 为物理链路的传输速率。进入节点的最优进入曲线的取值范围为这两条进入曲线的最小值范围。如图 2 所示,在 AFDX 网络中某一节点提供的服务曲线为 β , 该节点输入的数据流的原进入曲线为 α , 根据虚拟链路分组理论引入的新进入曲线为 α'' , 则优化后的进入曲线为如图 2 所示曲

线 α 和曲线 α^{\sim} 的实线段, 计算出的时间延迟的上界即新的水平距离 $h(\alpha, \beta)$ 明显优于原网络演算方法, 分组理论的主要区别是减小进入曲线的最大 S_{\max} , 并不对所有数据流的 S_{\max} 进行累加。

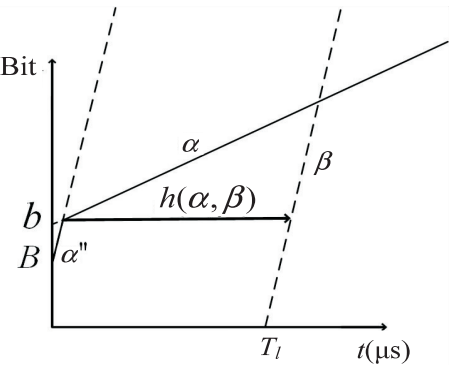


图 2 优化后的传输时间延迟 $h(\alpha, \beta)$

空中客车的 A380 机载 AFDX 网络传输时间延迟的适航认证就是在基于网络演算虚拟链路优化理论算法的 AFDX 网络认证工具上完成的, 通过分组优化确实能显著趋近于 AFDX 网络实际的端到端传输时延的上界值, 文献[9-10, 12]中根据实际机载 AFDX 网络配置进行测试得出的上界平均值, 分组优化理论确实能降低原来时延上界计算值的 25%。

3 AFDX 交换机级联网络模型实例

文中考虑由两个 24 个交换端口的交换机级联的 AFDX 网络拓扑模型。每个交换机分别连接 4 台 AFDX 网络子系统。每台 AFDX 网络子系统的端系统配置 2 条固定的发送虚拟链路和 4 条接收虚拟链路, 用于同时与 SW1 和 SW2 上的网络子系统的端系统进行通信。一条虚拟链路可以到达两个不同的目的端系统, 因此, 同一条虚拟链路上可以有两条不同数据流路径。数据流的 BAG 值均匀分布于 1 ms 到最大的 128 ms 之间, 数据流的 S_{\max} 取值范围分别为 500 字节、1 000 字节和最大的 1 518 字节。网络配置信息如表 1 所示。

表 1 AFDX 网络配置实例信息

AFDX 网络配置参数	个数
交换机	2
端系统	8
虚拟链路	16
传输数据流	32

4 AFDX 交换机级联网络传输时延计算的结果与比较分析

表 2 给出了利用网络演算方法及优化后的算法得

出各数据流的时延上界值的优化量对比。根据实际计算结果, 可以得出分组优化后的算法确实比无优化的算法更能趋近精确的时延上界值, 当数据流只通过一个交换机时, 分组优化后的网络演算方法比无优化的网络演算方法更能精确地趋近实际的传输时延上界值, 当数据流通过交换机的级联端口到达另一个交换机时, 分组优化后的网络演算方法比无分组优化后的网络演算方法也更能精确地趋近实际的传输时延上界值, 而且得出的实际计算结果的悲观性更低、更为精确。通过分析时延上界过大的数据流及其影响因子, 可以进一步对影响的虚拟链路的流量配置信息进行修正来降低其时延上界值, 以满足系统传输时延容限要求。

表 2 端到端传输时延上界计算值优化量对比

数据流是否通过交换机的级联端口	网络演算方法	网络演算方法 (分组优化)
否	4.47% ~ 19.35%	27.35% ~ 31.38%
是	0%	27.28% ~ 39.69%

5 结束语

数据传输的实时性作为 AFDX 网络确定性要求的一个重要因素, 需在系统实际应用前不断地进行验证和性能优化, 以取得相关等级的机载数据总线安全以及适航认证。文中对数据包以及交换机节点缓冲区的调度机制进行了限定, 假设所有的数据包的优先级均一致, 交换机节点输出端口的缓冲区不支持多优先级调度机制, 随着 AFDX 网络传输的数据类型的增多和数据帧应用的复杂度的增强, 这种单一的优先级设置和缓冲区调度机制不能适应系统的实时性要求, 对数据帧根据实时性要求进行优先级设置并对缓冲区的调度发送也进行优先级区分调度成为解决多等级实时性要求的数据流传输问题的有效方法, 而验证此类数据传输时延是否符合系统时延容限要求成为下一步需解决的问题。

参考文献:

[1] ARINC Specification 664, aircraft data network, part 7: deterministic networks [S]. Annapolis, Maryland, USA: Aeronautical Radio, Inc, 2005.

[2] 杨云, 熊华钢. 计算 AFDX 延迟的网络演算方法 [J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 57-60.

[3] 王平, 卢选民, 陈文刚. 基于时延分析的 AFDX 智能网络管理模型全局调度算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(10): 2424-2426.

[4] 陈昕, 周拥军, 蒋文保, 等. AFDX 协议性能分析及调度算法研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1000-1005.

丢包率。TTS-ARED 算法表现明显优于 ARED 算法。

表 1 ARED、TTS-ARED 算法丢包率对比

TCP 连接数	ARED		TTS-ARED	
	丢包数/发送数	丢包率/%	丢包数/发送数	丢包率/%
80	21 018/442 313	4.75	19 347/440 644	4.39
140	41 341/463 427	8.92	39 819/461 888	8.62

4 结束语

主动队列管理技术,作为一种重要的拥塞控制机制,对于网络服务质量的提高起到了很大的作用。文中鉴于 ARED 算法的不足,在此基础上提出了改进的 ARED 算法 TTS-ARED。通过改进算法的丢弃计算函数,实现了队列长度的稳定,并且提高了算法在复杂网络环境下队列长度的稳定性,增强了算法的鲁棒性。通过利用 NS2 软件对算法进行了仿真分析,实验结果表明改进的 TTS-ARED 算法在队列稳定性和丢包率等方面都明显优于 ARED。

改进算法仍需要进一步研究,算法本身的参数设置是根据经验值设置的,并不一定能够适应普遍动态的网络环境,对参数设置以及自适应方面的研究将是接下来的研究重点。

参考文献:

[1] Braden B, Clark K, Crowcroft J, et al. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [EB/OL]. 1998. <http://www.rfc.net/rfc2309.html>.
[2] Stanojevic R, Shorten R N, Kellett C M. Adaptive tuning of drop-tail buffers for reducing queueing delays [J]. IEEE

Communications Letters, 2006, 10(7): 570-572.

[3] Jacobson V. Congestion avoidance and control [C]//Proc of SIGCOMM'88 symposium on communications architectures and protocols. New York, NY, USA: ACM, 1988: 314-329.
[4] Hashem H. Analysis of random drop for gateway congestion control [R]. Cambridge, MA: Laboratory for Computer Science, MIT, 1989.
[5] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. ACM/IEEE Trans on Networking, 1993, 1(4): 397-413.
[6] Guan L, Awan I U, Woodward M E. Discrete-time performance analysis of a congestion control mechanism based on RED under multi-class bursty and correlated traffic [J]. Journal of Systems and Software, 2007, 80(10): 1716-1725.
[7] Floyd S, Gummadi R, Shenker S. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management [EB/OL]. 2001. <http://www.cs.berkeley.edu/>.
[8] Kim Tae-Hoon, Lee Kee-Hyun. Refined adaptive RED in TCP/IP network [C]//Proc of IEEE ICASE. [s. l.]: [s. n.], 2006: 3722-3725.
[9] 王秀丽. AQM 算法在 NS2 中的实现及其性能评价 [J]. 计算机科学, 2009, 36(5): 60-64.
[10] 方路平, 刘世华. NS2 网络模拟基础与应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008.
[11] 柯志亨, 程荣祥. NS2 仿真实验-多媒体和无线网络通信 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
[12] 任丰原, 林 闯, 王福豹. RED 算法的稳定性: 基于非线性控制理论的分析 [J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1302-1307.

(上接第 26 页)

[5] 张荣华, 田 泽, 韩 炜. AFDX 网络端系统芯片架构的研究与设计 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(8): 165-168.
[6] 张 志, 翟正军, 姚方圆. 基于 FPGA 的 AFDX 端系统协议芯片的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(2): 422-424.
[7] Grieu J. Analyse et évaluation de techniques de commutation Ethernet pour l'interconnexion des systèmes avioniques [D]. France: INP-ENSEEIH, 2004.
[8] 张奇智, 张 彬, 张卫东. 基于网络演算计算交换式工业以太网中的最大时延 [J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 117-120.
[9] Bauer H, Scharbarg J, Fraboul C. Improving the Worst-Case Delay Analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informat-

ics, 2010, 6(4): 521-533.

[10] Charara H, Scharbarg J L, Ermont J, et al. Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX network [C]//Proceedings of the 18th Euromicro conference on real-time systems. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006.
[11] Bauer H, Scharbarg J, Fraboul C. Applying and optimizing trajectory approach for performance evaluation of AFDX avionics network [C]//Proc of IEEE conference on emerging technologies & factory automation. Mallorca: [s. n.], 2009: 1-8.
[12] Boyer M, Fraboul C. Tightening end to end delay upper bound for AFDX network calculus with rate latency FIFO servers using network calculus [C]//Proc of 2008 IEEE international workshop on factory communication systems. Dresden: [s. n.], 2008: 11-20.

一种改善AFDX网络级联传输时延特性分析的方法


作者:

蔡稼阳, 田泽, 张荣华, 王治, 徐文进, [CAI Jia-yang](#), [TIAN Ze](#), [ZHANG Rong-hua](#), [WANG Zhi](#), [XU Wen-jin](#)

作者单位:

[中国航空计算技术研究所, 陕西 西安, 710068](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

[2014\(5\)](#)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405006.aspx