DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2011.10.011

基于离散事件方法的 AFDX 建模与仿真

黄 臻 张勇涛 熊华钢

(北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要: 采用了建模仿真的方法来分析航空电子全双工交换式以太网(AFDX,Avionics Full Duplex switched ethernet)协议. 通过对 AFDX 协议的抽象,基于离散事件的建模方法,以基本的网络元素来抽象化网络中的端系统、交换机等设备,以离散事件来描述网络设备的行为,以此构建了 AFDX 网络模型,并依据模型实现了仿真. 网络演算是一种理论计算 AFDX 最坏延迟界限的方法,将典型场景下仿真得到的结果与理论计算的结果进行比较,验证了模型. 通过不同流量方案下仿真结果的对比,对 AFDX 进行了传输特性的分析.

关 键 词: 航空电子全双工交换式以太网; 离散事件; 建模; 仿真

中图分类号: TP 393

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)10-1326-07

AFDX modeling and simulation based on discrete event method

Huang Zhen Zhang Yongtao Xiong Huagang

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

Abstract: For dimensioning avionics full duplex switched ethernet (AFDX) network, discrete event method was used. Devices in the network, such as end-system and switch, were modeled by the basic network elements. The communication behavior including VL control, message framing and switch forwarding etc. was described as discrete event. Different network elements were integrated by these events, and a model of the network was composed . Based on AFDX modeling, the simulation tool was developed with C++. Typical AFDX network topology was used to verify the model. The simulation was verified by comparison with the theory calculus which is called network calculus. The result indicated that the modeling and simulation were reliable. Two simulation scenes with different network flow were used to analyzing the performance of AFDX. According to the simulation analysis, irregular flow generated by either end-system or switches was isolated by VL, so that it cannot take effect on the regular flow. The reliability of AFDX was verified.

Key words: avionics full duplex switched ethernet (AFDX); discrete event; modelling; simulation

随着航空电子系统的一步步发展,在现代的航空电子系统中,需要得到交互的数据量成级数增长,设备之间的互联关系也愈加复杂[1].

在这样的发展状况下,传统的航电互联方式缺点逐渐显现. 比如,MIL-STD-1553 总线、ARINC429 以及 ARINC629 数据总线等. ARINC429 总线采用一到多的分立式结构,传输速率仅 100 kb/s; MIL-STD-1553 协议采用总线结构仅具有 1 Mb/s 的数据传输率; ARINC629 总线是共享介质的总线型网络,传输速率也只达到 2 Mb/s[1]. 同时,这些传统的互联方式,由于采用的是专用器件,其开发、维护成本都相对高昂[2].

于是,航空电子全双工交换式以太网(AFDX,Avionics Full Duplex switched ethernet)应运而生,它由交换式以太网技术演化而来. 作为世界最成熟的一种网络技术,交换式以太网已经经

收稿日期: 2010-09-26; **网络出版时间**: 2011-10-13 14:36; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111013.1436.011
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111013.1436.011.html
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60879024)
作者简介: 黄 臻(1982-),男,四川内江人,博士生,huangzhen@ee.buaa.edu.cn.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过了相当漫长的演化过程. 其制造、生成以及维护过程相当成熟,不过由于航空电子环境下严格的实时性、可靠性等要求,普通的以太网不能直接应用于航空电子环境. AFDX 网络通过对普通以太网做适应性改造,使其适合用于航空电子环境[2]. 目前,它已应用在空中客车公司的大型客机 A380 与波音公司最新宽体客机 787 中.

对 AFDX 网络的研究常见有理论分析的方法,文献[3]基于分析计算提出了一种基于优先级调度的负载匹配调度方法. 对 AFDX 传输的实时性能进行分析,更多的是使用网络演算的方法. 文献[4]正是采用网络演算的方法分析了 AFDX 网络中信息传输端到端延迟上界. 使用网络演算的方法可以计算得到延迟上界,但并不能全面地反映传输延迟整体情况,并且,计算得到数值结果是保守的,与网络实际中发生的最大值有所偏差,对此,研究人员致力于网络演算结果的精确化研究[5]. 文献[6]提出了 AFDX 静态优先级队列调度算法,采用网络演算的方法进行了分析,并进行了物理仿真. 而本文关注于使用建模仿真的手段来分析 AFDX 网络协议,以及其传输的实时性能,特别是信息的端到端延迟.

1　AFDX 网络

1.1　典型拓扑

如图 1 所示,是空客公司提出的 AFDX 网络典型拓扑[4]. 图中 $S_n(n \in [1,8])$ 表示 AFDX 交换机,此处共使用了 8 个 AFDX 交换机组成整个网络,考虑到双冗余的需求,实际网络中使用了 16 个交换机; 交换机左边的数字表示了流入交换机的虚拟链路(VL)条目数,而右边的数字表示了流出交换机的 VL 条目数; 连接线表示了交换机的互联情况.

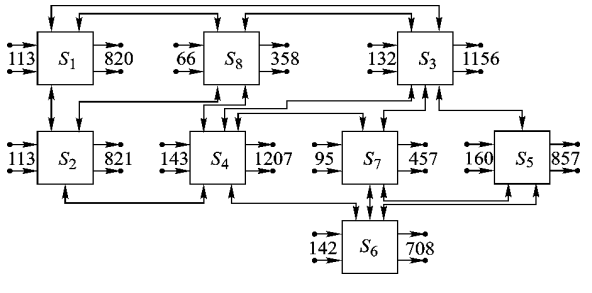


图 1　典型网络拓扑图

1.2　*AFDX* 端系统

端系统从应用程序分区中接收通信任务,完成数据帧的发送和接受,并将接受的有效数据转送到对应的程序分区中.

端系统发送过程中需要保证数据帧的最大延迟满足以下要求[2]:

$$J^{\max} \leqslant \left\{ J^{\min} + \frac{\sum_{i=1}^{N} (20 + L_i^{\max}) \times 8}{W},\ 500\ \mu s \right\} \tag{1}$$

式中,$J^{\max}$ 是数据帧在端系统中从应用程序接口到发送出来的延迟; $J^{\min}$ 是端系统传输的技术延迟(典型值为 40 μs[2]); $L_i^{\max}$ 是第 i 条 VL 的最大帧长,字节; N 为 VL 的数目; W 是当前网络的传输带宽,b/s.

1.3　*AFDX* 交换机

交换机主要完成基于 VL 的交换功能,并且需要对数据帧按照配置方案进行过滤和管制,以屏蔽错误产生的流量.

交换机输入端口对每条流入的 VL,采用了基于信用量的令牌桶算法[2]进行流量管制,典型的基于帧的流量管制方法如下: 第 i 条 VL 的账户被初始化为 $S_i^{\max} \cdot \left[1 + \frac{J_{\text{swith},i}}{T_{\text{BAG},i}}\right]$,并按速率 $\frac{S_i^{\max}}{T_{\text{BAG},i}}$ 增长,以初始值为上限. 数据帧到达的时候根据账户值进行判断,若大于 $S_i^{\max}$,则接受数据帧并按照数据帧的长度减少账户值,否则,丢弃数据帧. 其中,$S_i^{\max}$ 为数据帧最大帧长,$T_{\text{BAG},i}$ 为 VL 分配间隔,$J_{\text{switch},i}$ 为设计常数值.

1.4　虚拟链路(*VL*)

VL 是 AFDX 网络特有的元素,它在网络上对数据流量做出了区分. 对一条确定的 VL,其能使用的最大带宽为

$$B_{\text{VL}} = L_{\text{VL}}^{\max} / T_{\text{BAG,VL}} \tag{2}$$

式中,$L_{\text{VL}}^{\max}$ 为 VL 设计的最大帧长度; $T_{\text{BAG,VL}}$ 为 VL 的数据帧最小帧间隔.

2　网络演算方法

网络演算是一种以奇异代数(最小加代数或最大加代数)为基础的网络性能分析方法. 它最初是由文献[7-8]较为系统地提出,随后经过一系列完善后形成了一套比较完备的理论和方法[9].

以最小加代数为例,其中有以下定义:

定义 1　加运算.

$$(f \oplus g)(t) = \min[f(t), g(t)] \quad f, g \in F \tag{3}$$

定义 2　卷积运算.

$$(f \otimes g)(t) = \begin{cases} \inf\limits_{0 \leqslant s \leqslant t} \{f(t-s) + g(s)\} & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad f, g \in F \tag{4}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最小加卷积满足封闭性、结合律、交换律和分配律.

定义 3 反卷积运算.

$$(f \oslash g)(t) = \sup_{u \geqslant 0}[f(t+u) - g(u)] \quad f, g \in F \tag{5}$$

网络演算中对于经过网络的流量,定义了以下两种曲线.

定义 4 到达曲线. 给定一个广义递增函数 α,对于所有的 $t \geqslant 0$($\alpha \in F$),存在一个流 R 受限于 α,当且仅当对于所有的 $s \leqslant t$ 满足 $R(t) - R(s) \leqslant \alpha(t-s)$,则称 R 具有到达曲线 α,或者说 R 是 α 平滑的.

定义 5 服务曲线. 考虑一个系统 S 和一个数据流,这个数据流通过系统 S,且它的输入输出函数分别是 R 和 R^*,则称系统 S 为这个数据流提供了服务曲线 β,当且仅当 $\beta \in F$ 时,$R^* \geqslant R \otimes \beta$.

通过这两种曲线函数,可以基于网络演算的方法计算数据流的延迟.

定理 1 输出曲线. 对于输入受限于 α 的业务流在经过服务曲线为 β 的网络节点后,其输出受限于 α 与 β 的反卷积.

定理 2 延迟上界. 当受限于 α 的业务流经过服务曲线为 β 的网络节点时,其虚延迟的上界为 $h(\alpha, \beta)$($h(\alpha, \beta)$ 表示 α 和 β 的水平偏差):

$$h(\alpha, \beta) = \sup_{u>0}\{\inf\{T: T \geqslant 0, \alpha(u) \leqslant \beta(u+T)\}\} \tag{6}$$

定理 3 串联服务曲线. 当某业务流经过串联的两个网络节点,第 $h(h=1,2)$ 个网络节点的服务曲线为 β_h,则串联后的系统能够为该业务流提供的服务曲线为 $\beta_1 \otimes \beta_2$.

在 AFDX 网络的研究方面,文献[4-5]较为系统地将网络演算的方法应用于 AFDX 网络时间确定性的分析与评价中. 一般地,在知道 AFDX 网络中 VL 配置的前提下,运用式(6)和定理 3 即可通过网络演算求得网络中的数据延迟上界.

3 *AFDX* 网络建模

研究中采用了基于离散事件的模拟模型方法来进行 AFDX 网络建模.

3.1 离散事件方法

离散事件建模的方法是计算机仿真中常用的一种建模方法[10].

一般地,基于离散事件建模的系统由模型实体以及实体之间的关系构成. 在此,实体是描述系统的基本要素,事件是引起实体状态发生变化的行为[11]. 如图 2 所示,由事件来定义模型实体状态的改变,模型状态的修改由事件的发生而导致.

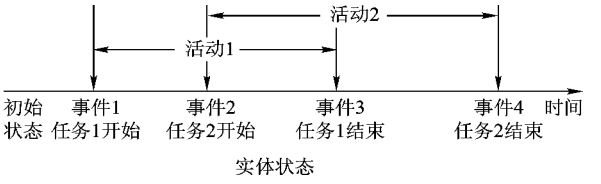


图 2 系统模型中实体、事件、状态关系图

如前所述,从物理环境来说,一个完整的 AFDX 网络由基本的网络设备组成: 端系统、交换机. 而从系统建模的角度来看,于设备之下,存在着更基本的网络元素: 连接、缓存、复用器、解复用器以及调度器. 这些网络元素通过搭配组合形成网络设备的模型,再利用抽象的事件定义网络元素交互行为,这样就能得到整个网络系统的模型.

3.2 端系统建模

如图 3 所示,是 AFDX 端系统的协议结构图. 端系统中需要存在一个 UDP/IP 协议处理栈来负责与应用分区的接口,协议中不建议使用 TCP 方式,因此建模中只考虑了 UDP 方式. AFDX 网络的实时性保障主要是在链路层处理,物理层将完成冗余管理.

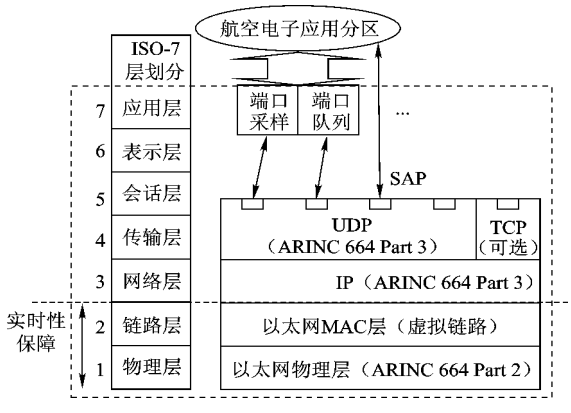


图 3 端系统层次结构图

进一步的模型抽象如图 4 所示,AFDX 协议里的 UDP 处理和 IP 处理与普通以太网中 PC 端的处理方式类似,主要是应用映射、分包组包等处理,因此可以将它们抽象为 1 个处理; MAC 子层需要完成 VL 队列管理,同时在发送的时候进行 BAG 保障; 最底层是通过冗余处理与物理链路相连接.

依照抽象出的结构模型,研究中对端系统进行了更细致的建模,分成了发送模型和接收模型.

1) 发送模型. 图 5 描述的是端系统的发送模型.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

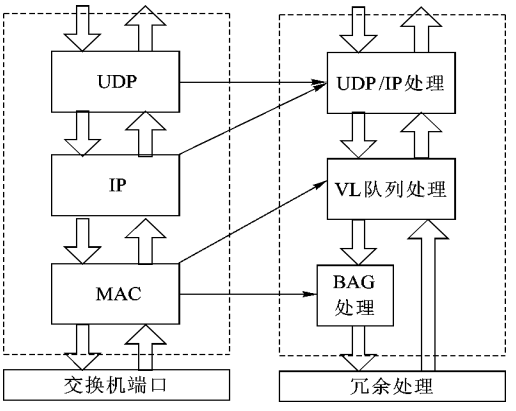


图 4　端系统模型抽象图

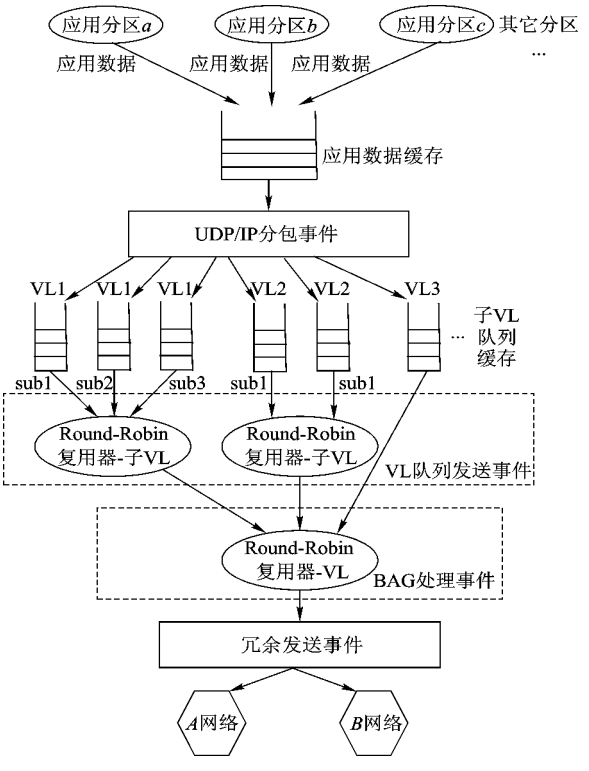


图 5　端系统发送模型图

发送模型中有 4 种网络元素:

① 应用数据缓存: 接收并缓存应用分区产生的应用数据;

② 子 VL 队列缓存: 按照网络定义接收并缓存对应的 IP 帧;

③ 子 VL 复用器: 按照 Round-Robin 的方式复用同一 VL 的子 VL 队列中的 IP 帧,值得注意的是对只有 1 个子 VL 队列的 VL 来说不存在该元素;

④ VL 复用器: 按照 Round-Robin 的方式复用所有 VL 的 IP 帧.

按照离散事件的方法建模,需要将设备实际发生的行为抽象为离散的事件. 在仿真中,这些事件将用来推进仿真时间. 结合模型结构,在发送模型中设定了 4 个事件:

① UDP/IP 分包事件: 从应用数据缓存中取出应用数据,添加 UDP 包头,按照 VL 的 L_{VL}^{max} 定义进行 IP 分包,添加 IP 包头,最后将 IP 帧放入对应 VL 的子队列缓存;

② VL 队列发送事件: 对各 VL 按照 Round-Robin 的调度策略取出子队列缓存中排在最前的 IP 帧;

③ BAG 处理事件: 根据 VL 的 BAG_{VL} 定义,按照 Round-Robin 的调度策略决定当前将要发送的 IP 帧;

④ 冗余发送事件: 为 IP 帧添加 MAC 包头,并拷贝为两份,分别发送到 A,B 网络上.

2) 接收模型. 类似发送模型的建模过程,端系统的接收模型如图 6 所示.

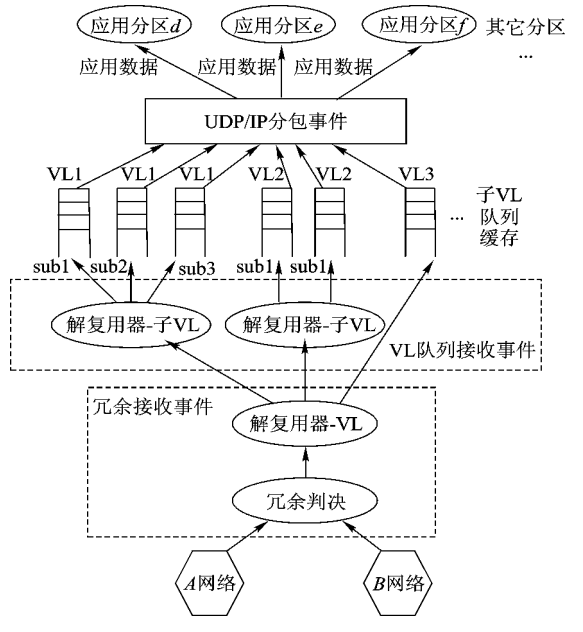


图 6　端系统接收模型图

接收模型中也有 4 种网络元素:

① 子 VL 队列缓存: 按照网络的预先定义接收并缓存解复用后得来的 IP 帧;

② 子 VL 解复用器: 解析 UDP 包头,按照网络定义将 VL 得到的 IP 帧映射到各子 VL;

③ VL 解复用器: 解析 IP 帧,按照网络定义将 IP 帧映射到各 VL;

④ 冗余判决器: 解析 MAC 包头,按照 SN 值判决 A,B 网络上传来的数据帧,按照“先到胜出”的原则判决出有效帧,丢弃其拷贝.

发送模型中设定了 3 个模型事件:

① 冗余接收事件: 接收 A,B 网络上传输得到的 MAC 帧,解 MAC 包头,通过冗余判决器和 VL

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

解复用器后得到有效的 IP 帧;

② VL 队列接收事件: 将 IP 帧解复用放到对应的 VL 子队列缓存中;

③ UDP/IP 组包事件: 解 IP 包头,进行 IP 帧组帧,如果组帧成功则解 UDP 包头,则意味着该应用数据一次成功的传输; 如果组帧不成功,则等待传输完成或丢弃.

3.3 交换机建模

交换机的各端口是相互独立、具备网络收发功能的网络模块,在交换机内部通过背板总线和交换控制模块完成数据帧的交换转发功能,所以对交换机的建模主要是对交换机端口的建模.

端口模型同样具有接收和发送两个主要功能,而接收完成后只需要查询配置表,即可得到对应需要转发到的目的端口,因此在建模中,交换转发功能整合到了接收功能中,不需要对交换控制再单独建模. 细化后的交换机端口模型如图 7 所示,需要注意的是,这仅是 1 组交换机端口接收到发送的功能模型; 一个完整的交换机模型实体将由多个端口模型实体共同构成,并且它们共享一个配置表.

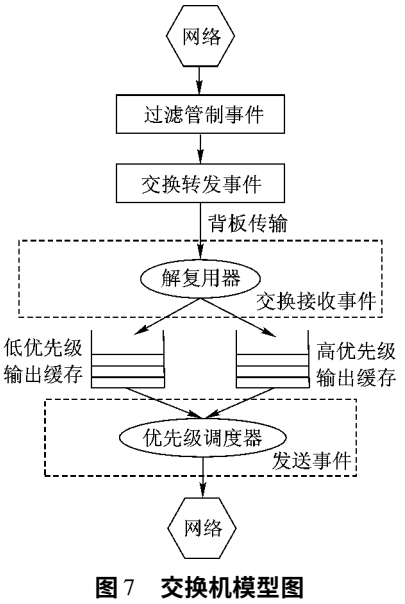


图 7 交换机模型图

交换机端口模型中有 3 种网络元素:

1) 端口输出缓存: 用来存储需要发送的 MAC 帧队列,分为高优先级和低优先级,按 VL 定义区分;

2) 优先级解复用器: 将背板总线传送来的 MAC 帧依据 VL 定义映射到各自的优先级;

3) 优先级调度器: 按照 2 级优先级调度的方式将缓存中的数据帧依次取出.

在端口模型中设定了 4 个模型事件:

1) 过滤管制事件: 接收网络传输来的 MAC 帧,按照 AFDX 协议进行帧过滤,并依据漏桶算法完成流量管制功能,丢弃违规流量和错误帧;

2) 交换转发事件: 查询配置表,将 MAC 帧传输到对应交换机端口,协议中规定交换机应当具备线速度转发的能力,因此,背板传输过程中不会发生拥塞排队的情况;

3) 交换接收事件: 接收端口转发过来的 MAC 帧,并通过优先级解复用器将帧放入对应的优先级缓存;

4) 端口发送事件: 执行优先级调度器,将排于队首的 MAC 帧从缓存中取出发送到网络上.

对于交换机来说,它并不具备冗余管理的功能,因此其模型不用区别 A,B 网络.

4 AFDX 网络仿真

按照前文的网络模型,研究中基于 C ++ 编程语言实现了各仿真模块,并按离散事件仿真的调度流程,以软件的形式在 VC 开发环境下实现了仿真系统,应用该系统可以由软件完成指定配置的 AFDX 网络仿真,并统计传输过程中的各种传输延迟值.

4.1 模型验证

模型验证过程采用了图 1 所示的网络拓扑,具体 VL 配置如表 1、表 2 所示. 数据消息均按各 VL 能承载的最大容量周期性产生,即构造出 VL 满负载的工作场景. 在这样极端的工作状态下,网络拥塞将更容易发生,对应延迟结果将更逼近理论计算值.

表 1 VL 的 BAG 配置表

T_{BAG}/ms	VL 数量	T_{BAG}/ms	VL 数量
1	10	16	40
2	30	32	48
4	35	64	46
8	40	128	11

表 2 VL 的最大帧长配置表

L^{max}/字节	VL 数量	L^{max}/字节	VL 数量
100	10	800	35
200	100	1 000	15
500	90	1 500	10

按照第 1.4 节的符号约定和第 2 节的定义,每条 VL 的到达曲线可以描述为

$$\alpha_{VL}(t) = (20 + L_{VL}^{max}) \times 8 + \frac{(20 + L_{VL}^{max}) \times 8}{T_{BAG,VL}} \times t = (20 + L_{VL}^{max}) \times 8 \times \left(1 + \frac{t}{T_{BAG,VL}}\right) \quad (7)$$

采用第 2 节描述的网络演算方法,将表 1、

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2所列参数代入式(7) 可以得到每条 VL 的到达曲线表达式; 再运用式(6) 和定理 3,即可分析计算 VL 上数据的最大延迟界限值. 将相同配置的参数输入到仿真软件,运行结束后可以统计得到网络模型的仿真结果. 该验证场景下,VL 数据传输延迟的理论分析与仿真结果对比如图 8 所示.

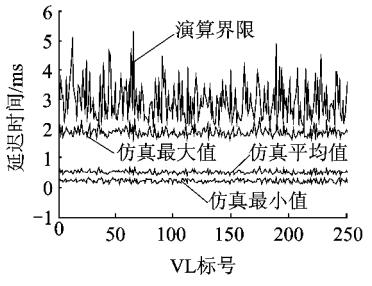


图 8　演算仿真对比图

观察图 8 可见,仿真得到的延迟最小值基本接近消息单独传输的时间延迟; 仿真得到的延迟最大值在延迟界限以内. 分析可知,理论计算得到的最大延迟界限是在极限的边界条件(各复用器均发生最坏情况的拥塞) 下得到的; 在普通情况下,这样的极限状况罕有发生. 因此,仅有少量 VL 在仿真中得到最大延迟时间能接近延迟界限,并且,所有延迟时间均在延迟界限的约束范围内. 据此,仿真模型的结果得到了网络演算的验证.

4.2　仿真分析

基于前文提出的 AFDX 网络模型,可以利用仿真工具进一步进行网络性能分析.

在下面的分析中,主要关注了传输任务的突发情况对网络传输性能的影响,这是航空电子系统中网络性能的一个重要方面. 在常用的以太网传输中,突发性的流量往往会对整个网络传输的延迟和确定性带来恶劣的影响,而这在航空电子环境中是不能接受的.

性能分析以上节使用的网络场景为基础,其中仿真使用的网络拓扑和 VL 配置集合如前所述; 性能分析在该网络场景基础之上通过改变部分配置进行仿真对比分析,具体地,采用了以下两种方案:

方案 1: 选取目标端系统,随机选取该端系统承载的一半数量的消息变更为非周期消息;

方案 2: 选取目标交换机,随机选取其中一个端口,将进入该端口的所有消息变更为非周期消息.

这里的非周期消息是指产生时间符合泊松分布随机发生的消息. 从周期消息到非周期消息的映射方法如下: 假设周期消息的周期为 P_i,则改变为按泊松到达的非周期消息后其期望间隔为 $1/P_i$. 图 9 ~ 图 12 为仿真后的分析图例. 图中比较了原始模式和方案模式下对应 VL 每次发送的延迟时间值,还标示了该 VL 理论计算的最大延迟时间值. 对每种方案的仿真结果,各选取了两条消息作为典型图例.

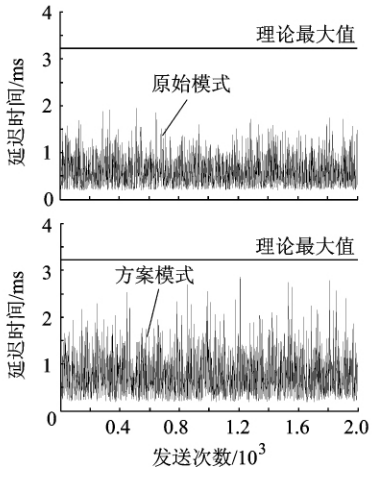


图 9　方案 1 下非周期消息的典型延迟图

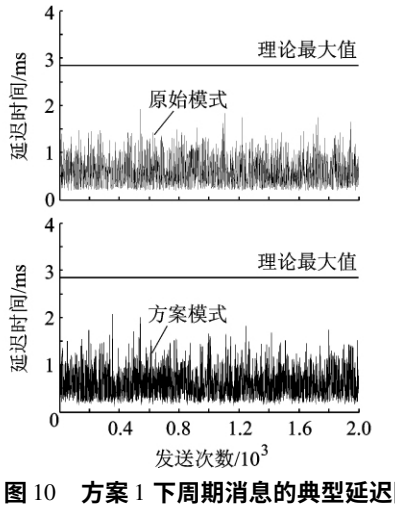


图 10　方案 1 下周期消息的典型延迟图

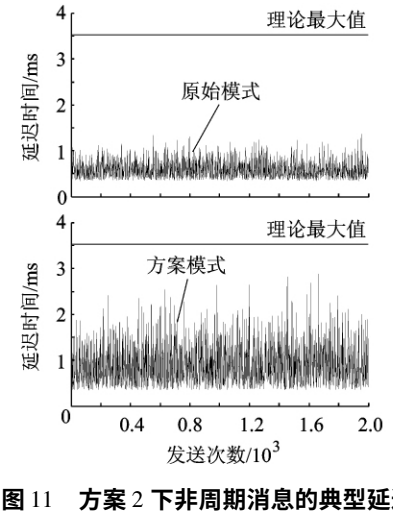


图 11　方案 2 下非周期消息的典型延迟图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

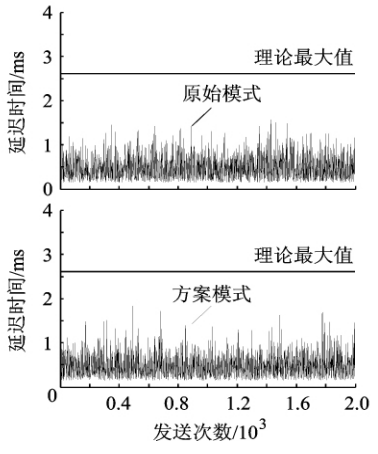


图 12 方案 2 下周期消息的典型延迟图

两种方案分析了 AFDX 网络中突发性流量对网络性能的影响. 其中,方案 1 关注于突发流量对同一个端系统上其它流量的影响,方案 2 关注于突发流量对同一个交换机上其它流量的影响.

从仿真结果可以看到: ①在两种方案下,周期流量按照前面所述的映射方法变成了非周期流量,增大了该 VL 对应流量的突发度,但其流量从统计意义上来看并没有增大,即在保持流量状态下增大了突发度. ②周期消息变为非周期消息后,其最大延迟明显变大,如图 9、图 11. 这主要是因为 VL 对承载流量的整形作用导致: 突发流量整形后发生时间间隔变得平滑,这是以该 VL 数据延迟增大为代价而达到的结果. ③未调整的周期消息(同节点或同交换机) 所受影响均不大,如图 10、图 12. 这得益于 AFDX 网络中 VL 对流量的隔离作用,使用 VL 区分流量后独立流量的突发度并不会扩散影响到别的流量,无论流量是否同源节点. 这意味着,即使独立流量的产生源发生故障,突发大量异常流量,也不会影响到网络上其它流量的传输,这表明 AFDX 网络在传输的可靠性上比普通以太网具有很大提高.

5 结 束 语

AFDX 网络是交换式以太网在航空电子环境下的正式应用. 其传输性能是与网络设计相关的,模型仿真可以为网络的设计规划提供支持.

本文主要分析了 AFDX 网络的协议机制,基于离散事件的方法实现了 AFDX 网络仿真模型的构建,完成了网络中典型设备——端系统和交换机的模型设计,并实现了模型仿真工具. 通过在典型配置下,传输延迟模型仿真结果与理论计算结果的对比,进行了模型验证. 并采用两种场景变化方案下仿真得到的传输延迟对比,分析了 AFDX 网络中 VL 对突发流量的约束和隔离作用,证实了网络的可靠性. 进一步地,还可以利用该模型仿真方法对 AFDX 网络的实时性和容错性等方面进行深入研究.

参考文献(References)

[1] 熊华钢,周贵荣,李峭. 机载总线网络及其发展[J]. 航空学报,2006,27(6):1135 - 1144
Xiong Huagang,Zhou Guirong,Li Qiao. A survey on avionics bus and network interconnections and their progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(6):1135 - 1144(in Chinese)

[2] ARINC 664 Aircraft data network [S]. 2005

[3] 周强,熊华钢,张晓林,等. AFDX 交换机在强实时性条件下的分组调度[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(4):449 - 452
Zhou Qiang,Xiong Huagang,Zhang Xiaolin,et al. Packet scheduling for AFDX switch under hard time constraints [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4):449 - 452 (in Chinese)

[4] Grieu J. Analyse et évaluation de techniques de commutation ethernet pour l'interconnexion des systems avioniques [D]. France: INP-ENSEEIHT,2004

[5] Boyer M,Fraboul C. Tightening end to end delay upper bound for AFDX network calculus with rate latency FIFO servers using network calculus [C] //IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden: IEEE,2008: 11 - 20

[6] 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
Chen Xin,Zhou Yongjun,Jiang Wenbao,et al. Performance analysis of AFDX protocol and scheduling algorithm [J]. Acta Electronica Sinica,2009,37(5):1000 - 1005 (in Chinese)

[7] Cruz R L. A calculus for network delay,part I: network elements in isolation [J]. IEEE Trans Information Theory,1991,37 (1): 114 - 131

[8] Cruz R L. A calculus for network delay,part II: network analysis [J]. IEEE Trans Information Theory,1991,37(1):132 - 141

[9] Boudec J Y L,Thiran P. Network calculus [M]. Berlin,Germany: Springer Verlag,2004

[10] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社,2001
Lin Chuang. Performance evaluation of computer network and computer system [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2001 (in Chinese)

[11] 周天然,宋丽茹,熊华钢,等. 航空电子环境下 FC 网络的建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(10):1117 - 1120
Zhou Tianran,Song Liru,Xiong Huagang,et al. Modeling and simulation of fibre channel for avionics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2008,34(10): 1117 - 1120 (in Chinese)

(编 辑: 赵海容)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net