

## AFDX网络虚拟链路时延抖动测试研究

湛文涛, 何 锋, 周一伟, 熊华钢  
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 采用虚拟链路机制的 AFDX 网络可以对带宽资源进行有效的分配和隔离, 极大地增强了网络的实时性。提出了基于虚拟链路的分布式时延抖动测试方法, 通过网络演算对时延分布进行理论分析, 并与物理测试得到的实际值进行对比, 实现了理论与实际的综合评价, 增强了分析结果的可信性。

**关键词:** 航空电子全双工以太网; 网络测试; 时间延迟; 抖动; 网络演算

**中图分类号:** V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0093-04

## Delay-Jitter Test of Virtual Links in AFDX Network

CHEN Wentao, HE Feng, ZHOU Yiwei, XIONG Huagang

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

**Abstract:** For AFDX network with virtual Link mechanism, bandwidth resources can be allocated and isolated effectively so that the real-time performance of AFDX network is greatly improved. In this paper, a method for testing delay-jitter in AFDX network based on virtual links was proposed. The theoretical value was obtained through network calculus theory, and was compared with the actual test value, thus comprehensive evaluation was realized and the credibility of analysis results was enhanced.

**Key words:** Avionics Full Duplex Switched Ethernet; network test; time delay; jitter; network calculus

### 0 引言

随着航空电子系统复杂性的提高和数据通信量的增加,对航空数据总线的带宽和性能提出了更高的要求。航空电子全双工以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)是适用于大中型飞机航空电子系统的网络互连技术<sup>[1]</sup>。它采用虚拟链路(Virtual Link, VL)对带宽资源进行有效的分配和隔离,极大地增强了网络的实时性,使其成为航空电子网络互连的确定性网络。

在缺少实际网络环境的情况下,对网络性能进行测试和评估一般采用计算机建模和仿真<sup>[2]</sup>的方法。通过网络演算(Network Calculus)建模,可以获得网络延迟在理论上的一个上限值。采用确定性网络演算技术分析网络延迟界限,最初是由 CRUZ R L 较为系统地提出,随后在 CRUZ R L 和 BOUDEC J-Y L 等学者<sup>[5]</sup>的共同努力下得以逐渐完善,2005年,CHARARA H 和 FRABOUL C 首次提出了运用网络演算的方法对 AFDX 网络时间确

定性进行分析与评价。

一般传统方法仅通过物理网络节点测试获取时延抖动情况,给出的是在一定条件下网络的数据传输情况<sup>[8]</sup>。本文提出的虚拟链路时延抖动测试方法,基于网络演算对时延分布进行理论分析,并与物理测试得到的实际值进行对比,实现了理论与实际的综合评价,增强了分析结果的可信性。

### 1 时延抖动概述

虚拟链路是指从数据源到接收端的一条逻辑链路,可以是一对一的单址传输或一对多的多址传输<sup>[9]</sup>。每个虚拟链路都被分配了固定带宽,不同的虚拟链路之间必须相互隔离,即一个虚拟链路的使用不能影响或占用其他虚拟链路的逻辑带宽。

如图 1 所示,源终端系统发送的数据帧通过虚拟链路承载,传输到交换机网络,再根据静态路由配置表转发到相应的目的终端系统。基于虚拟链路的 AFDX 网络属于一种确定性网络,可以为虚拟链路信息传输提供逻辑带宽和确定的路由<sup>[10]</sup>。在网络拓扑比较简单的情况下,虚拟链路可由操作人员建立和更新,静态路由网络可增强信息传输的时间确定性。

时间延迟测试的目的是确定数据帧经过网络节点

收稿日期:2012-12-17

修回日期:2013-01-21

基金项目:国家自然科学基金(61073012)

作者简介:湛文涛(1989—),女,湖北黄冈人,硕士生,研究方向为航空电子网络。

所需要的时间,时间延迟反映了交换网络执行转发操作的速度以及对待转发队列的处理情况。时延抖动是由调度发送不同虚拟链路上数据帧等因素引起的不确定时间,即时间延迟的变化量。时延抖动越小,说明交换网络处理数据帧的稳定性和确定性越好。

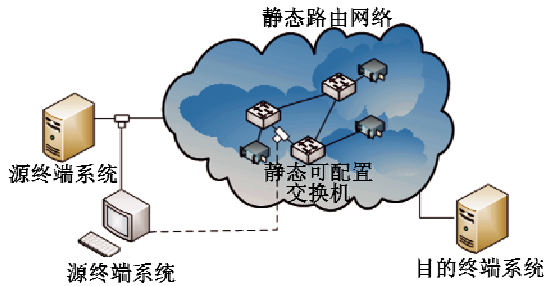


图 1 AFDX 网络示意图

Fig. 1 Sketch diagram of AFDX network

随着机载网络的快速发展,任务关键的航空电子功能分区要处理越来越多的数据,需要严格控制时延抖动。时延抖动测试对于航电网络拓扑的构建和网络规模的设计具有指导意义。

## 2 基于网络演算的理论分析

网络演算是一种基于最小加代数的确定性网络延迟界限的分析方法<sup>[11]</sup>。采用网络演算技术,可以计算数据帧经过交换网络的延迟、积压等性能参数的确界。确定性网络演算包括两个基本工具:到达曲线(arrival curve)和服务曲线(service curve)。利用到达曲线描述给定的输入流量约束,利用服务曲线描述多路复用排队服务规则,可以更数学化地表达流量和排队特性。

任何端到端的通路都可看成由网络节点串联而成,元件分解法将复杂网络抽象为一组独立的网络节点。端到端时延抖动界限即为传输路径上各个网络节点的时延抖动界限之和。这种方法孤立地对待每个网络节点,并且认为每个网络节点的输入流量是相互独立的。元件分解法假设数据帧经过每个网络节点都会遇到最坏的情况,得出的是最差情况下的系统延迟。

在 AFDX 网络中,数据帧经过传输路径上的固定延迟节点时,流量特性不变,所以只需考虑可变延迟节点。数据帧从源终端系统到目的终端系统的可变延迟由多路复用排队造成。多路复用排队包括源终端系统输出时虚拟链路的聚合,以及经过各交换节点时的多路复用排队。

假设数据帧经过某一可变延迟节点时的输入流量约束函数为  $\alpha_{in}(t)$ ,输出流量约束函数为  $\alpha_{out}(t)$ ,该网络节点的延迟上界为有限值,记为  $D$ 。根据 CRUZ R L 的确定性排队论,则有

$$\alpha_{out}(t) \leq \alpha_{in}(t + D) \quad (1)$$

在该网络节点处,流量争用造成的可变延迟使输出流量特性发生变化,可以将输出流量  $\alpha_{in}(t + D)$  作为下一级网络节点的输入流量约束函数。

对于最大数据帧长度为  $L_{max}$ ,带宽分配间隔为  $G_{BAC}$  的虚拟链路,可以用  $(\sigma, \rho)$  模型描述虚拟链路离开发送终端系统时的流量特征<sup>[12]</sup>,其中,  $\sigma$  为突发度,  $\rho$  为可持续的平均流量,存在

$$\begin{cases} \sigma = L_{max} \\ \rho = L_{max}/G_{BAC} \end{cases} \quad (2)$$

$(\sigma, \rho)$  形式的输出流量约束函数为

$$\alpha(t) = L_{max} + \frac{L_{max}}{G_{BAC}}t \quad (3)$$

将数据源到接收端的可变延迟节点依次编号为  $i = 1, 2, \dots, N$ 。假设第  $i$  级节点的输入流量约束函数为  $\alpha_i(t) = \sigma_i + \rho \cdot t$ ,延迟界限为  $D_i$ ,则经过该节点后第  $i + 1$  级节点的输入流量约束函数为

$$\alpha_{i+1}(t) = \alpha_i(t + D_i) = \sigma_{i+1} + \rho \cdot t \quad (4)$$

其中

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \rho \cdot D_i \quad (5)$$

假设最后一级突发度为  $\sigma_{final}$ ,由式(2)可知,第一级突发度  $\sigma_1 = L_{max}$ 。将每一级可变延迟节点的延迟界限累加,得到传输路径上的总延迟界限为

$$D_{total} = (\sigma_{final} - L_{max})/\rho \quad (6)$$

具体的时延抖动理论值的计算原理如图 2 所示。

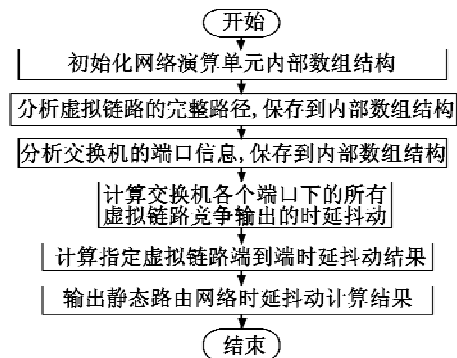


图 2 时延抖动理论值计算原理

Fig. 2 Calculation principle of delay-jitter

## 3 基于物理测试的实测分析

本文基于分布式网络测试技术构建物理测试平台,采用物理测试的方法得到时延抖动的实测值。图 3 为 AFDX 网络虚拟链路时延抖动测试环境图,涉及到的网络节点包括:端系统测试主机、端系统模拟器、监控采集板卡、高速网络测试分支器、静态可配置交换机系统和目的终端系统。其中,静态可配置交换机系统包括有分支器、交换机 1、交换机 2、……、交换机  $N$ ;目的终端系统包括有目的终端机 1、目的终端机 2、

……、目的终端机  $N$ 。

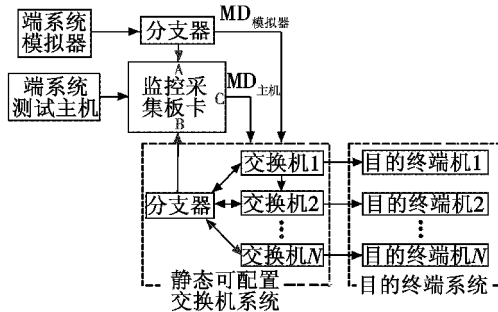


图 3 时延抖动测试环境图

Fig. 3 Test system of delay-jitter

端系统测试主机上安装有监控采集板卡。板卡的 A 端口与高速网络测试分支器连接, B 端口与静态可配置交换机系统中的交换网络分支器连接, C 端口与静态可配置交换机系统中的任意一个交换机连接。端系统测试主机发出的数据帧和端系统模拟器发出的数据帧在静态可配置交换机系统造成流量争用。高速网络测试分支器采集待测节点上的数据帧流量。监控采集板卡的 A 端口捕获进入静态可配置交换机系统之前的数据帧队列  $m\_InFramelist$ , B 端口捕获经过静态可配置交换机系统之后的数据帧队列  $m\_OutFramelist$ 。

在端系统测试主机上启动时延抖动测试模块, 可实现对 AFDX 网络虚拟链路时延抖动的分布式测试。下面给出了 AFDX 网络虚拟链路时延抖动物理测试的源程序伪代码。

```

1. LOOP
2. VLID ← input ( ) 3. SelectedframelistIn ← SelectFrame ( VLID, m_
InFramelist)
SelectedframelistOut ← SelectFrame ( VLID, m_OutFramelist)
4. Δt ← CalculateGap ( SelectedframelistIn, SelectedframelistOut)
5. End
6. Average_Delay ← Δt
7. Jitter ← var ( Δt)
8. JitterMax ← Δt_max - Δt_min

```

具体的时延抖动物理测试的计算原理如下所述。

1) 输入一个虚拟链路 ID 号, 记为 VLID。

2) 遍历输入队列  $m\_InFramelist$  中的数据帧, 查找出 ID 号等于 VLID 的数据帧  $MD_{in\_ID}$ , 将找出的数据帧  $MD_{in\_ID}$  放入队列  $SelectedframelistIn$  中; 遍历输出队列  $m\_OutFramelist$  中的数据帧, 查找出 ID 号等于 VLID 的数据帧  $MD_{out\_ID}$ , 将找出的数据帧  $MD_{out\_ID}$  放入队列  $SelectedframelistOut$  中。

3) 在输入队列  $SelectedframelistIn$  和输出队列  $SelectedframelistOut$  中找出顺序号 (Sequence Number, SN) 相同的一组数据帧  $MDSN_{i\_in}$ 、 $MDSN_{i\_out}$ , 其中,  $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ,  $N$  表示顺序号相同的数据帧组数。记  $t_{in\_i}$ 、 $t_{out\_i}$  分别为数据帧  $MDSN_{i\_in}$  和  $MDSN_{i\_out}$  的到达时间, 记  $\Delta t_i = t_{out\_i} - t_{in\_i}$ ,  $\Delta t_i$  即为输入队列和输出队列中相同

顺序号的数据帧的到达时间间隔;

4) 计算时间间隔  $\Delta t_i (i \in \{1, 2, 3, \dots, N\})$  的平均值  $\bar{\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \Delta t_i$ ,  $\bar{\Delta t}$  即为虚拟链路的平均延迟 Average\_Delay。

5) 计算时间间隔  $\Delta t_i (i \in \{1, 2, 3, \dots, N\})$  的标准差  $var(\Delta t) = \frac{1}{N} [ \sum_{i=1}^{i=N} (\Delta t_i)^2 - N(\bar{\Delta t})^2 ]$ ,  $var(\Delta t)$  即为虚拟链路时间延迟的统计抖动;

6) 分别计算时间间隔  $\Delta t_i$  的最大值  $\Delta t_{max}$  和最小值  $\Delta t_{min}$ , 则  $\Delta t_{max}$  为虚拟链路的最大时间延迟,  $\Delta t_{min}$  为虚拟链路的最小时间延迟, 所以虚拟链路时间延迟的最大抖动 JitterMax 为  $J_{max} = \Delta t_{max} - \Delta t_{min}$ 。

时延抖动物理测试通过分析数据帧流量在 AFDX 网络不同节点上的时延抖动变化情况, 从而实现 AFDX 网络的分布式时延抖动测试, 使端到端时延抖动测试成为分布式测试的一个特例, 使时延抖动测试具有全面性和普遍性。

## 4 测试案例

本文对如图 4 所示的典型 AFDX 网络模型进行测试。表 1 给出了 AFDX 网络的配置参数。

表 1 AFDX 网络配置参数

Table 1 Configuration of AFDX network

参数类别	参数值
BAG/ms	$2^N$ ms, 其中 $N$ 取 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
虚拟链路帧长范围/byte	84 ~ 1518
物理链路带宽/Mbps	100
交换机的处理速率/Mbps	100
端系统测试主机 IP 地址	10.1.37.1
端系统模拟器 IP 地址	10.1.38.1
目的终端系统 IP 地址	10.1.39.1

在图 4 所示的 AFDX 网络中, 端系统测试主机发出的数据帧通过虚拟链路 VL1、VL2、VL3 传输, 端系统模拟器发出的数据帧通过虚拟链路 VL4、VL5、VL6 传输。配置数据帧流量的参数如表 2 所示。

表 2 虚拟链路参数配置表

Table 2 Configuration of virtual links

VL ID	最小帧长/byte	最大帧长/byte	BAG/ms	源端 IP	目的 IP
1	84	163	2	10.1.37.1	10.1.39.1
2	84	159	2	10.1.37.1	10.1.39.1
3	84	159	1	10.1.37.1	10.1.39.1
4	84	159	1	10.1.38.1	10.1.39.1
5	84	157	1	10.1.38.1	10.1.39.1
6	84	163	2	10.1.38.1	10.1.39.1

虚拟链路 VL1、VL2、VL3、VL4、VL5、VL6 上的数据帧在排队输出的过程中相互影响, 抢占处理时间, 在静态可配置交换机处造成流量争用。对 AFDX 网络进行测试, 基于网络演算理论, 可得到表 3 所示的时间延迟

理论值。

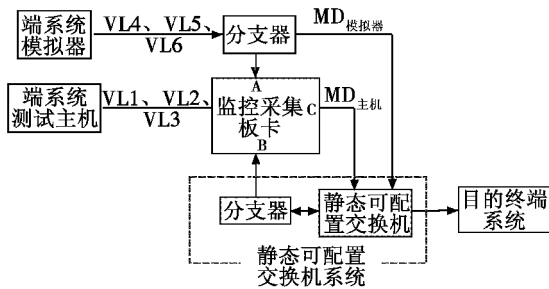


图 4 典型的 AFDX 网络测试模型

Fig. 4 Test model of typical AFDX network

表 3 虚拟链路时间延迟理论值

Table 3 Theoretical delay

VL ID	端到端延迟/ms	传输延迟/ms	阻塞延迟/ms	VL ID	端到端延迟/ms	传输延迟/ms	阻塞延迟/ms
1	0.171280	0.078480	0.09280	4	0.171120	0.078320	0.09280
2	0.171280	0.078480	0.09280	5	0.171120	0.078320	0.09280
3	0.171280	0.078480	0.09280	6	0.171120	0.078320	0.09280

由表 3 测试结果可以得出:任何一个虚拟链路端到端延迟等于物理链路上的传输延迟与该虚拟链路经过所有交换节点竞争输出时的阻塞延迟之和。

若指定虚拟链路 VL3,其他虚拟链路(VL1、VL2、VL4、VL5、VL6)上的数据传输会对 VL3 的时间延迟造成抖动。VL3 经过静态可配置交换机时,利用本论文提出的虚拟链路时延抖动测试方法,可得 VL3 经过静态可配置交换机的时延抖动理论值与实际值,具体数据如表 4 所示。

表 4 VL3 时延抖动测试结果

Table 4 Actual jitter of VL3

测试类别	理论抖动值	实测统计抖动值	实测最大抖动值
测试值/ $\mu s$	93	16	27

依据表 4 中的测试结果,可以绘制如图 5 所示的柱状图,该图形在显示器中示出,方便观察。基于网络演算得到的结果是考虑最坏情况下的网络抖动最大理论值,它为实测抖动值提供了边界参考,实测抖动值小于理论抖动值,从而为 AFDX 网络拓扑结构的设计和优化提供一定的数据参考。

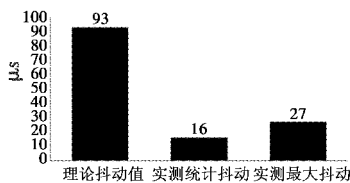


图 5 VL3 时延抖动测试结果柱状图

Fig. 5 Histogram of delay-jitter of VL3

## 5 结束语

本文提出了虚拟链路时延抖动测试方法,并基于

网络演算对时延分布进行理论分析,与物理测试得到的实际值进行对比,实现了理论与实际的综合评价,增强了分析结果的可信性。本方法可以分析数据帧流量在 AFDX 网络不同节点上的时延抖动变化情况,实现了 AFDX 网络的分布式时延抖动测试,使端到端时延抖动测试成为分布式测试的一种特例。同时,使用网络演算建模得到的是时延抖动的理论最大值,将这个最大延迟作为网络构建的指导值,从而为 AFDX 网络拓扑结构的设计提供数据参考。

## 参考文献

- [1] 熊华钢,王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 王锦,张奕楠,熊华钢. AFDX 的分布式仿真[J]. 电光与控制,2008,15(8):76-80.
- [3] CRUZ R L. A calculus for network delay, part 1: Network elements in isolation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):114-131.
- [4] CRUZ R L. A calculus for network delay, part 2: Network analysis [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):132-141.
- [5] BOUDEDEC J Y L, THIRAN P. Network calculus [M]. Berlin Germany:Springer Verlag, LNCS volume 2050, 2004.
- [6] CHARARA H, FRABOUL C. Modeling and simulation of an avionics full duplex switched Ethernet [C]// Advanced Industrial Conference on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference, 2005:207-212.
- [7] CHARARA H, SCHARBARG J L, ERMONT J, et al. Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX network [C]// The 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS'06), 2006:10pp-202.
- [8] 孙继磊,何锋,王昊天,等. 航空电子交换节点端口缓冲能力测试方法研究[J]. 电光与控制,2011,18(9):69-72.
- [9] 楼晓强,田泽. AFDX 网络终端系统的确定性分析与实现[J]. 计算机技术与发展,2010,20(8):56-62.
- [10] 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(8):1000-1005.
- [11] 樊葆华. 基于网络演算的计算机网络性能分析模型研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
- [12] 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.