

# 面向空间应用的 FC-AE-1553 网络 拓扑性能研究

彭力<sup>1,2,3</sup>, 吕从民<sup>3</sup>, 刘迎春<sup>3</sup>, 贺宇峰<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100190;

3. 中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘要:**采用 OPNET 仿真平台, 建立 FC-AE-1553 网络的网络控制器、网络终端和交换机的节点模型以及相应的进程模型, 构建仲裁环型和交换型两种拓扑网络。针对某型号空间有效载荷系统的特点, 进行网络拓扑性能仿真, 测试节点数量和消息长度对网络性能的影响, 分析网络吞吐量随着网络负载的变化规律。结果表明: FC-AE-1553 网络具备良好的实时性能, 其中, 仲裁环型网络的传输性能更稳定, 适合节点数量较少的场合, 交换型网络的实时性能更优, 适合节点数量更多的场合。

**关键词:** FC-AE-1553; OPNET; 仲裁环型; 交换型; 实时性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)09-0010-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.09.003

## Study of Topology Performance of FC-AE-1553 Network in Space Application

PENG Li<sup>1,2,3</sup>, LÜ Cong-min<sup>3</sup>, LIU Ying-chun<sup>3</sup>, HE Yu-feng<sup>3</sup>

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** With OPNET, network controller, network terminal, switch node models, and their process models were established to simulate arbitration ring and fabric topology network. According to the feature of the space payload, network topology performance simulation is carried out, test the influence of node number and message length for network performance, analyze the change rule of network throughput with network load. The results showed that the real-time performance of FC-AE-1553 network was perfect, the stability of the arbitration ring topology network was better, and the real-time performance of fabric topology was more excellent.

**Key words:** FC-AE-1553; OPNET; arbitrated loop; fabric; real-time

## 0 引言

随着空间应用任务领域的不断扩展, 特别是大型航天器(如空间站)的有效载荷规模越来越大, 工作模式越来越复杂, 传输数据的速率越来越快, 对网络的传输带宽、实时性和可靠性提出了更高要求, 目前空间领域广泛使用的 MIL-STD-1553B 总线的传输速率只有 1 Mbps, 速率低, 而且传输介质主要是铜缆, 电缆网重量大, 无法满足未来空间应用需求。FC-AE-1553 网

络采用光纤技术, 速率高、误码率低、电缆网重量大大降低, 同时对传统 1553B 平滑兼容, 成为未来航天器主要候选网络。

根据调研资料, 国内对 FC-AE-1553 网络的研究主要集中在航空电子领域。文献[1]介绍了交换型 FC-AE-1553 网络的性能; 文献[2]实现了 FC-AE-1553 的协议桥模块; 文献[3]设计了一种点对点型 FC-AE-1553 网络传输平台; 文献[4]探讨了 FC-AE-

收稿日期: 2012-12-09

修回日期: 2013-03-12

网络出版时间: 2013-05-09

基金项目: 国家载人航天工程空间应用系统专项(编号略)

作者简介: 彭力(1987-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 研究方向为空间信息技术; 吕从民, 研究员, 研究方向为空间科学与应用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130509.1100.049.html>

1553 与 MIL-STD-1553B 协议的转换方案。上述研究主要集中在 FC-AE-1553 协议方面,网络拓扑结构也比较单一。FC-AE-1553 网络支持多种拓扑结构,不同的拓扑结构具备不同的通信特点和性能。在建造未来航天器网络之前,需要针对空间有效载荷系统的特点,对不同的网络拓扑进行性能评估,确定不同网络拓扑的使用场合和主要网络参数,为制定面向不同空间应用的设计方案提供依据。

文中以某大型航天器上的有效载荷系统为研究对象,采用 OPNET Modeler 仿真平台,搭建了 FC-AE-1553 仲裁环型和交换型两种网络拓扑模型,通过对比分析这两种拓扑结构的网络性能,说明各自性能优越性,给出了主要网络设计参数,为工程实施提供重要参考。

## 1 FC-AE-1553 网络基本原理

FC-AE-1553 网络主要由一个网络控制器 NC、多个网络终端 NT 以及若干条光纤链路组成。支持三种拓扑结构:点对点型、仲裁环型和交换型<sup>[5]</sup>。点对点型仅仅适用于两个节点间的数据传输,适用场合非常有限;仲裁环型最多支持 127 个设备,可扩展能力不强;交换型的全部消息都由交换机调度,节点数量不定,可以直接将新增加的节点接入交换机,可扩展能力最强。

FC-AE-1553 是一种命令/响应式协议,采用分层

表 1 空间某型号任务有效载荷系统组成

序号	名称	主要功能	数据类型	最大允许延时/ms
1	数据管理设备(NC)	数据采集、存储和传输	周期数据、突发数据	10
2	对地遥感设备 1(NT1)	观测和自检	周期数据、应用数据、突发数据	10
3	对地遥感设备 2(NT2)	观测、定标和调焦	周期数据、应用数据、突发数据	10
4	空间环境探测设备 1(NT3)	探测	周期数据、应用数据、突发数据	10
5	空间环境探测设备 2(NT4)	探测和热控	周期数据、应用数据、突发数据	10
6	空间科学实验设备(NT5)	科学实验	周期数据、应用数据、突发数据	10
7	供电设备(NT6)	工作电源	周期数据	10

## 3 FC-AE-1553 网络系统模型

### 3.1 网络模型

网络模型直接反映了网络拓扑结构,文中建立仲裁环型和交换型两种 FC-AE-1553 网络模型。仿真测试中,为了测试节点数量对网络性能的影响,将根据需要更改网络模型中 NT 节点的数量,但网络形式不变。

文中建立了点对点单工(仲裁环型)和点对点全双工(交换型)两种链路模型。链路传输速率采用标准的 1.062 5 Gbps,光纤误码率设为  $10^{-12}$ 。

### 3.2 网络控制器模型

网络控制器 NC 的节点模型采用四层结构,其中

结构,自下而上分成 FC-0 层、FC-1 层、FC-2 层、FC-3 层、FC-4 层。

FC-0 层定义了连接器的物理属性和数据传输速率;FC-1 层定义了设备接口协议,包括串行编码解码规则和字节同步措施;FC-2 层定义了命令帧、状态帧、数据帧的格式和组包拆包的规则;FC-3 层定义了一些特殊服务,用于功能扩展;FC-4 层定义了应用层协议,将上层 1553B 协议映射到 FC-AE-1553 网络中。

## 2 空间有效载荷系统及数据传输需求

空间有效载荷主要包括对地遥感设备、空间科学实验装置、空间环境探测器以及新技术试验设备等<sup>[6]</sup>。空间有效载荷的数据传输具有数据量大、数据类型多、传输实时性高、可靠性要求高等特点<sup>[7]</sup>,主要包括三种数据类型:周期数据、应用数据和突发数据。周期数据是指有效载荷按照某个频率传输的数据,如时间码、遥感数据、电源参数等;应用数据是指有效载荷对地遥感、科学实验或探测数据,一般存放在大容量中;突发数据是指由各种突发消息、指令或者突发事件产生的数据。

某型号任务有效载荷系统由 1 台数据管理设备、2 台对地遥感设备、2 台空间环境探测设备、1 台空间科学实验设备和 1 台供电设备组成,每台设备具有多种数据源,具体见表 1。

FC-3 层用于功能扩展,文中没有涉及。FC-0 层和 FC-1 层通过链路模型及其属性构建。

FC-2 层和 FC-4 层通过有限状态机构建。FC-2 层是核心层,实现数据发送和接收,以及流量控制;FC-4 层为应用层,依次循环向各个 NT 发送命令帧,采集各个 NT 的数据。

交换型网络的所有数据都由交换机调度,FC-2 层主要负责将来自 FC-4 层的数据发送到交换机,以及接收来自传输到 FC-0 层的交换机的数据。在发送数据时,需要在 WaitStatus 状态等待状态帧的响应,如果超时则重发数据,实现协议中的超时重传机制。

而仲裁环型网络增加了环路仲裁过程,所有设备

在发送数据之前都需要通过公平访问算法获得网络访问权,然后传输数据。

### 3.3 网络终端模型

网络终端 NT 的节点模型与 NC 的节点模型的形式一样。FC-0 层、FC-1 层、FC-3 层与 NC 建模过程完全相同,FC-4 层负责采集、发送周期数据和应用数据,FC-2 层是其核心层,受控于 NC,实现数据的接收和发送。

### 3.4 交换机模型

交换机的节点模型如图 1 所示,包含 VOQ 模块、调度模块和交换模块。VOQ(Virtual Output Queued)技术指在输入端口为每个输出端口都开辟一个缓存队列,从而使发往不同输出端口的数据不会遭遇队头(Head of Line, HOL)阻塞<sup>[8]</sup>。

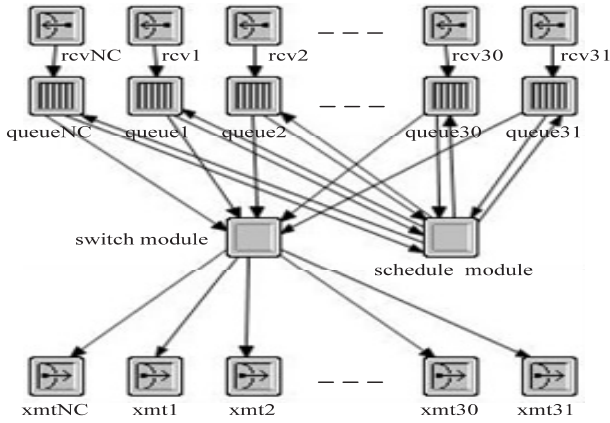


图 1 交换机的节点模型

交换机模型采用了基于优先级的 iSLIP 调度算法<sup>[9]</sup>,该算法运用优先级编码的轮询机制,将响应指针的变化由同步过程改为异步过程,提高了网络吞吐量。

## 4 仿真与结果分析

### 4.1 网络性能评价指标

该型号任务有效载荷系统重点研究的网络性能指标为端到端的延时和网络吞吐量<sup>[10]</sup>。

设系统运行的时间为  $T_{elapsed}$ ,产生第  $i$  条消息的时间为  $T_{src}^i$ ,长度为  $L_{gen}^i$ ,到达目的节点的时间为  $T_{dest}^i$ ,长度为  $L_{revd}^i$ ,则:

端到端的平均延时:

$$T_{avr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{dest}^i - T_{src}^i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

网络吞吐量:

$$C = \frac{1}{T_{elapsed}} \sum_{i=1}^n L_{revd}^i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

### 4.2 网络信息流

文中对表 1 中有效载荷的数据源类型和传输要求进行了合理简化,令所有 NT 仅包含一种信息流,具体见表 2。

网络信息流的优先级是:突发数据>周期数据>应用数据。NT1 采用 ON/OFF 模型,产生 100 B 的突发数据。NT3 随机在某特定时刻向 NC 持续传输 1 MB 的应用数据,其他 NT 都以 512 ms 的周期向 NC 传输 2 kB 的周期数据。

为了测试节点数量和消息长度对网络延时的影响,设计了两种模式的周期性信息流,模式一是指依次增加 2 个消息长度为 2 kB、周期为 512 ms 的 NT 节点;模式二是指节点类型按照表 2 建立,而周期数据的长度则以 2 kB 的步长逐渐增加。

表 2 网络中的信息流

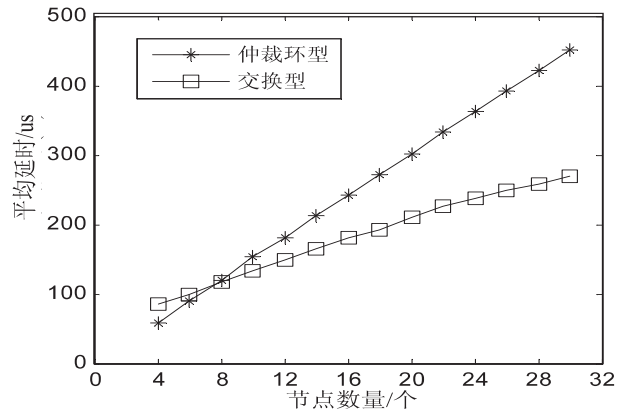
序号	源节点	目的节点	数据长度/Bytes	周期/ms	优先级	最大允许延时/ms
1	NC	NT <sub>n</sub>	2	512	0	10
2	NT1	NC	100	0	1	10
3	NT2	NC	2 048	512	2	10
4	NT3	NC	1 M	0	4	10
5	NT4	NT5	2 048	512	3	10
6	NT6	NC	2 048	512	3	10

注:NT<sub>n</sub> 表示 NT1, NT2, ..., NT6, 数字越小优先级越高,周期为 0 表示数据是随机产生的。

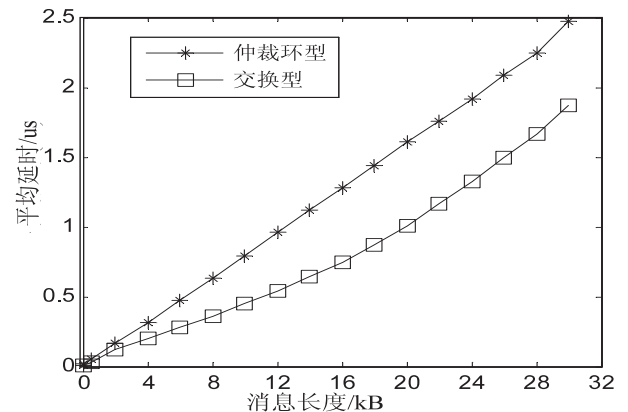
### 4.3 仿真结果分析

#### 4.3.1 网络的实时性能

分别对仲裁环型和交换型网络进行仿真,得到的网络平均延时的仿真结果如图 2 所示。



(a) 与节点数量的关系



(b) 与消息长度的关系

图 2 网络的平均延时

图2(a)表明,当NT节点的数量多达30个时,两种拓扑网络的平均延时都不超过500  $\mu\text{s}$ ,在最大允许延时10 ms的范围内,FC-AE-1553网络的实时性能非常好。

仲裁环型网络的平均延时随着节点数量的增加近似线性增长,传输延时比较稳定,可以认为影响仲裁环型网络延时的主要因素是NT转发数据时所消耗的时间。当节点数在20个以内时,交换型网络的平均延时近似线性增长,当节点数继续增加,网络延时不再线性增长,主要是由于NT数量的增加导致交换机处理数据包越来越频繁,数据包在交换机内停留的时间越来越长,增加了网络延时。所以,与交换型相比,仲裁环型网络更稳定。

此外,在消息长度为2 kB,节点数在8个以内时,交换型网络的实时性不如仲裁环型网络,当节点数继续增加后,交换型网络的传输性能显著优于仲裁环型网络。因此,交换型网络适合节点数更多的场合。

图2(b)描述了消息长度对网络延时的影响。仲裁环型网络的延时性能不如交换型网络,随着消息长度的增加,其差值越来越大。交换型网络的平均延时增加的幅度逐渐增大,这是由于FC-AE-1553协议规定每帧最多传递2 kB数据,当超过2 kB时,必须分包后再发送,增加了网络负担和丢帧几率,所以,在满足应用需求的前提下,消息长度不宜过大。

#### 4.3.2 网络的吞吐量

为了测试网络吞吐量的瓶颈值,文中设定网络中所有信息流的周期为1 ms,通过线性增加消息长度来增大网络负载,得到的仿真结果如图3所示。

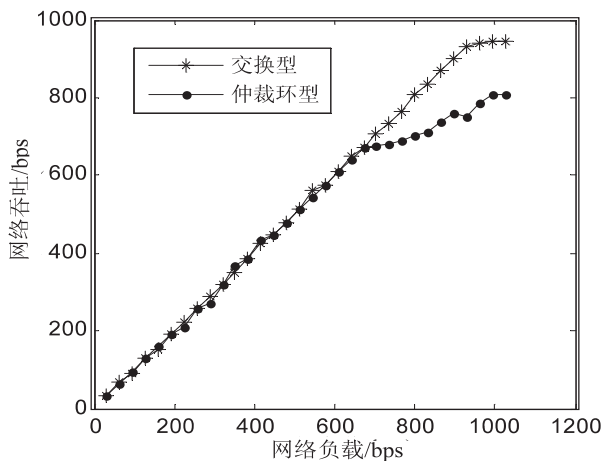


图3 网络吞吐量与网络负载的关系

当网络负载不超过672 Mbps时,仲裁环型网络和交换型网络的吞吐量随网络负载的变化趋势基本一致,都与网络负载呈线性关系,说明当网络负载小于672 Mbps时,所有消息都成功被目的节点接收。

当网络负载超过672 Mbps时,仲裁环型网络的网络吞吐量开始不如交换网络,最后得到仲裁环型网络吞吐量的瓶颈值为808 Mbps,交换型网络的吞吐量的瓶颈值为944 Mbps。

以上是由于仲裁环型网络在进行数据传输时,需要对节点的网络使用权进行仲裁,增加了网络开销,进而增加了网络负载。

## 5 结束语

文中指出了相比仲裁环型网络,交换型FC-AE-1553网络的可扩展能力更强。另外,针对空间有效载荷数据的特点,测试了节点数量和消息长度对FC-AE-1553网络延时的影响以及网络吞吐量的瓶颈值。

仿真结果表明FC-AE-1553网络的传输性能优越;仲裁环网络传输数据更稳定,适合节点数较少、环境更恶劣的应用场合,而且交换型FC-AE-1553网络的实时性更好,适合节点数更多,消息长度更大的应用场合。

## 参考文献:

- [1] 丁凡,熊华钢,宋丽茹. FC-AE-1553网络的建模仿真研究[J]. 计算机工程与应用,2008,44(31):20-24.
- [2] 李颖,宗竹林. FC-AE-1553协议桥研究与控制程序设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(10):330-334.
- [3] Leng Yue, Zong Zhulin, Liu Wei. Design and Implementation of FC-AE-1553 Point to Point Transmission Hardware Platform [C]//Proc. of 2009 IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis. Piscataway:IEEE,2009:1-4.
- [4] 查翔,南建国,罗海英. FC-AE-1553与MIL-STD-1553协议转换方案的设计[J]. 计算机工程与设计,2012,33(3):895-890.
- [5] FC-AE-1553 INCITS working draft proposed of American national standard for information technology[S]. 2006.
- [6] 胡行毅. 空间科学与应用卫星有效载荷系统的远程电测研究[J]. 空间电子技术,2004(4):51-56.
- [7] 贺宇峰,赵光恒,吕从民,等. 基于CLIPS专家系统的自动数据判读方法[J]. 中国科学院研究生院学报,2011,28(4):505-513.
- [8] Banovic D, Radusinovic I. Scheduling Algorithm for VOQ Switches[J]. International Journal of Electronics and Communications,2008,62(6):455-458.
- [9] McKeown N. The iSLIP Scheduling Algorithm for Input-Queued Switches[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,1999,4(2):188-201.
- [10] 梁向阳,赵佳. 计算机网络系统的性能评测[J]. 计算机技术与发展,2011,21(1):218-221.

# 面向空间应用的FC-AE-1553网络拓扑性能研究

作者: 彭力, 吕从民, 刘迎春, 贺宇峰, PENG Li, L Cong-min, LIU Ying-chun, HE Yu-feng

作者单位: 彭力, PENG Li(中国科学院 光电研究院, 北京 100094; 中国科学院大学, 北京 100190; 中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094), 吕从民, 刘迎春, 贺宇峰, L Cong-min, LIU Ying-chun, HE Yu-feng(中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京, 100094)

刊名: 计算机技术与发展

ISTIC

英文刊名: Computer Technology and Development

年, 卷(期): 2013(9)

## 参考文献(10条)

1. 丁凡, 熊华钢, 宋丽茹 FC-AE-1553网络的建模仿真研究[期刊论文]-计算机工程与应用 2008(31)
2. 李颖, 宗竹林 FC-AE-1553协议桥研究与控制程序设计 2009(10)
3. Leng Yue, Zong Zhulin, Liu Wei Design and Implementation of FC-AE-1553 Point to Point Transmission Hardware Platform 2009
4. 查翔, 南建国, 罗海英 FC-AE-1553与MIL-STD-1553协议转换方案的设计[期刊论文]-计算机工程与设计 2012(03)
5. FC-AE-1553 INCITS working draft proposed of American national standard for information technology 2006
6. 胡行毅 空间科学与应用卫星有效载荷系统的远程电测研究[期刊论文]-空间电子技术 2004(04)
7. 贺宇峰, 赵光恒, 吕从民 基于CLIPS专家系统的自动数据判读方法[期刊论文]-中国科学院研究生院学报 2011(04)
8. Banovic D, Radusinovic I Scheduling Algorithm for VOQ Swit-ches 2008(06)
9. McKeown N The iSLIP Scheduling Algorithm for Input-Qu-eued Switches[外文期刊] 1999(02)
10. 梁向阳, 赵佳 计算机网络系统的性能评测[期刊论文]-计算机技术与发展 2011(01)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201309003.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201309003.aspx)