

# 航空电子 FC 不同拓扑和服务类的实时性测试

郭蔡健, 熊华钢, 徐亚军

GUO Cai-jian, XIONG Hua-gang, XU Ya-jun

北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083

School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

E-mail: guocaijian@163.com

**GUO Cai-jian, XIONG Hua-gang, XU Ya-jun. Real-time performance test for different topologies and classes of service of fiber channel in avionics systems. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(31): 60-62.**

**Abstract:** Under different background stream, topologies and classes of service, Fiber Channel(FC) network performance has been tested. Graphs of relationship among throughput, delay and workload have been given in different traffic pattern. Through analysis the conclusions are presented. The message delay of fabric and class 3 of service of FC is respectively smaller than Arbitrated Loop and class 2 of service, and maximal throughput of the former is bigger than latter; The research on the message delay in FC reveals that the timely delivery of the message can be achieved in the network if the accumulated load is less than 50% of maximal throughput in a uniform traffic pattern.

**Key words:** avionics; Fiber Channel; performance test; delay

**摘要:**在不同的消息流分布模式下,对光纤通道(FC)各种拓扑结构和服务类进行了性能测试,给出了各种传输情况下的消息延迟和吞吐量随负载的变化关系。通过分析得出结论:光纤通道的交换网络和服务类3分别较仲裁环和服务类2延迟小,最大吞吐量大;FC网络在均匀负载模式下,累积负载为网络最大吞吐量的50%以下时,消息传输具有确定性延迟上限。

**关键词:**航空电子;光纤通道;性能测试;延迟

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2009.31.019 文章编号:1002-8331(2009)31-0060-03 文献标识码:A 中图分类号:TP393

## 1 引言

FC(光纤通道,是Fiber Channel的缩写)具有高带宽、低延迟、低位错率和灵活的拓扑结构等特性<sup>[1]</sup>;它是一种以COTS为基础完全开放的标准,有广泛商业支持。因此,FC成为未来航空电子系统互连的首选标准。但将FC应用于航空电子系统时首先要对其进行网络性能评价。

现有的有关FC网络性能评价的文献多针对存储区域网(SAN),以航空电子应用为背景的十分有限。文献[2]在假设节点缓存无限大,交换机种类相同和各个端口流量相同的条件下,对交换网络进行了研究并得出结论:FC的不规则交换网络结构性能优于规则交换网络结构;文献[3]通过实验得出了FC仲裁环结构的有关结论:环路长度的增加对于性能影响很大,而介质访问算法对于环路性能影响不大;影响环路传输延迟的主要因素是物理距离,而不是环路上的节点数量;文献[4]采用SCSI上层协议映射,通过计算机仿真得出结论:在FC仲裁环结构中,对于近距离和小数据块的传输,网络性能主要受到环路上节点数目的影响;对于远距离和大数据块的传输,网络性能主要受到物理连接距离的影响;文献[5]通过对具有冗余链路的对称的FC交换拓扑结构进行仿真,分析了链路故障及其发

生的位置对网络性能的影响;文献[6]将FC的实验数据与另外一种航空电子互连候选协议SCI的数据进行对比得出FC适合传输大数据块的结论;文献[7]通过对FC的流量控制机制建立数学模型进行性能分析,结果表明为保证网络的高性能,所需的FC信用值(Credit)与链路距离和带宽成正比。由于FC规定了多种传输方式,所以采用FC进行传输时首先要考虑不同通信任务需要采用何种传输方式来实现传输,在军用电子互连系统中,我们尤其关心网络中消息的端到端时间延迟特性,需要对FC各种传输方式进行实时性能评价,而性能评价中的数学分析方法和计算机仿真建模方法都在一定程度上依赖于网络的性能测试。

## 2 FC及其多种数据传输方式

FC是美国国家标准委员会(ANSI)的X3T11小组于1988年开始制定的一种高速串行传输协议,采用通道技术控制信号传输,在共享介质时采用基于仲裁或交换的信道共享冲突解决机制和基于信用的流量控制策略。FC由一个很大的协议簇组成,在各个网络层次上提供了多种选项,包括:多种介质方式、多种传输速率、多种通信方式、多种拓扑结构、多种服务等级、

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10477005)。

作者简介:郭蔡健(1982-),男,硕士研究生,研究方向为通信与网络技术;熊华钢(1961-)男,教授,博士生导师,主要研究方向为航空电子综合,高速数据总线等;徐亚军(1976-),男,博士,主要研究方向为航空电子系统综合化。

收稿日期:2009-04-27

修回日期:2009-06-29

多种上层协议映射、多种优先级控制、多个层次的检错机制以及两种流量控制方式等。用户可以根据需要对上述选项进行选择组合,形成一套特定的网络解决方案。

FC 应用于航空电子系统互连可以选择四种拓扑结构:点到点(Point to Point):在两个节点之间建立双向的全双工连接;仲裁环(Arbitrated Loop):无需交换机,将节点链接为环形拓扑,在两个仲裁环端口间提供逻辑上双向的,点对点的服务。各节点端口共享带宽,只有当检测到环路处于空闲状态时,才能通过仲裁获得仲裁环的使用权,同其他端口进行通信。这种拓扑结构同一时刻只能有一对端口进行双向连接,如果某个环节节点出错,则会中断整个仲裁环的运行;交换网络(Fabric)拓扑:为各个连接端口提供了一种交换式的内部连接,允许多个设备在同一时刻进行高速通信,且能对网络上的节点数目做很大的扩展而不减少每个端口的带宽。拓扑中多种数据传输率和多种服务类型可以并存;FC 仲裁环也可以同交换机连接起来组成混合拓扑结构,实现一种低带宽节点与高带宽节点的有效连接。

FC 提供了现在网络通信中的所有服务类型:服务类 1:面向连接的服务,通信端口间使用整个带宽进行通信,数据帧的接收顺序和发送顺序保持一致;服务类 2:有帧交付应答的无连接服务,支持多路复用和多点传送,通信端口和其他网络节点一起共享网络带宽。缓存到缓存和端到端的流控制均可使用,用于交付顺序和时间限制不是很严格的场合;服务类 3:和 2 类服务非常类似,不同之处是它没有交付确认,3 类服务用于顺序和时间不是很严格以及上层协议可以有效地处理帧丢失的场合;服务类 4:通信端口之间预先建立虚电路连接,保证数据帧的接收和发送顺序;服务类 5:尚未定义;服务类 6:通过交换机进行多点传送<sup>[1]</sup>。由于服务类 2 和 3 有着最为广泛的商业支持,该文将对二者的实时性进行对比。

消息在 FC 网络中的传输延迟可表示为  $d_{message}=d_{cons}+d_{vari}$ ,其中  $d_{cons}$  表示确定延迟, $d_{vari}$  表示可变延迟。前者包括消息源节点和目的节点处理延迟,介质传播延迟,链路传输延迟(取决于消息块大小和链路带宽),对于特定的系统具有可确定的延迟上限;后者为消息在源节点和交换机中的排队等待时间,取决于 FC 不同拓扑的介质访问控制机制和不同服务类的传输控制方式以及特定的负载情况。

### 3 FC 网络性能测试方法

#### 3.1 上层协议的选择

对于 FC 网络而言,进行网络性能测试的一项关键技术就是设计一种有效的 FC 上层协议,在实际搭建的 FC 网络平台上采用该协议进行数据传输,然后通过测试程序和测试设备来实现网络性能测试。该文的 FC 接口卡在最高层提供 IP 上层协议映射。在 IP 上层协议接口驱动的基础上通过插入中间层驱动的实现方法,可以对 IP 上层协议进行简化,即采用 IP 协议的 MAC 地址来标识通信端口,进行点到点的通信,实现一种光纤通道轻量 IP(Internet Protocol)上层协议。它具有通信模式简便、灵活,短消息传输效率高,以及通信端口标识易于实现等特点,适合用于 FC 网络性能测试,能反映 FC 网络运行的情况<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 性能评价指标

与商用网络不同,工作在飞机武器平台上的机载网络技术更加强调网络的严格实时性,有其特殊的性能评价指标。

该文的网络数据流由背景消息流和主动测试的探测消息

包组成,设在测试时间  $T$  内,网络所有节点产生并试图向网络注入  $M_{generated}$  字节的消息,所有节点成功接收到  $M_{received}$  字节的消息,其中,主动测试时共向网络注入字节长度固定的  $N_{received}$  个探测消息包,第  $i$  个探测消息包在  $T_{generated}^i$  时刻从源节点产生, $T_{arrival}^i$  时刻到达目的节点,则:

$$\text{网络累积负载: } L = \frac{M_{generated}}{T}$$

$$\text{网络吞吐量: } C = \frac{M_{received}}{T}$$

$$\text{消息延迟: } d_{message}^i = d_{cons}^i + d_{vari}^i = T_{arrival}^i - T_{generated}^i$$

$$\text{最大延迟: } T_{max} = \max(T_{arrival}^i - T_{generated}^i) \quad i=1, 2, 3, \dots, N_{received}$$

$$\text{最小延迟: } T_{min} = \min(T_{arrival}^i - T_{generated}^i) \quad i=1, 2, 3, \dots, N_{received}$$

$$\text{平均延迟: } T_{avr} = \frac{1}{N_{received}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{received}} (T_{arrival}^i - T_{generated}^i)$$

$$\text{延迟抖动: } D = \frac{1}{N_{received}-1} \cdot \sum_{i=1}^{N_{received}-1} |T_{arrival}^{i+1} - T_{generated}^{i+1} - T_{arrival}^i + T_{generated}^i|$$

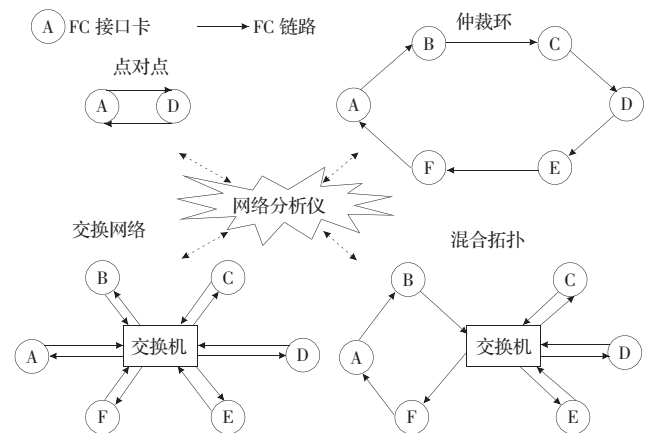


图1 FC 网络性能测试平台

#### 3.3 测试平台

由图 1 所示,测试平台由 FC 接口卡,FC 交换机,光纤介质和网络分析仪组成,它们分别搭建成各种拓扑结构。其中,接口卡 B,C,E,F 分别安装在 4 个节点机上以产生背景消息流,背景消息流的各个消息周期为 1 毫秒,通过线性增大消息块的长度来增大网络的累积负载;主动测试时,接口卡 D 向 A 连续发送 30 字节固定大小的探测消息包,它的周期大于最大延迟时间并使探测流量远小于网络总流量。为避免时钟的同步,接口卡 D 和 A 安装在同一台节点机上,消息产生和接收的时间均以本地节点机的时钟为参考以计算消息的单向延迟时间;使用网络分析仪监测各个链路是否出现预定的数据流以确保测试的正确性。

在图 1 的拓扑结构中,在不同背景消息流形式,不同拓扑结构和服务类的情况下,分别测量网络吞吐量  $C$  和探测消息包的延迟同网络累积负载  $L$  的关系。取  $T=1$  s,共测量了 220 次。测试软件监测到整个过程探测消息包的丢包数为零。

### 4 测试结果及分析

#### 4.1 不同拓扑结构的性能评价

在链路带宽为 1 Gb/s,服务类 2 条件下,考虑最坏的情况,

使背景消息流集中向一个节点即接口卡 A 传输, 测量比较 FC 不同拓扑结构的网络性能, 得图 2。

由于测试在一段连续时间内完成, 曲线存在一定扰动, 但不影响总体的规律。由图 2 所示, 随着负载的增大, 交换网络的平均延迟和最大延迟比仲裁环拓扑的增大要缓慢, 而混合拓扑的延迟大体上处于二者之间; 从吞吐量来看, 当网络负载增大时, 仲裁环拓扑吞吐量达到瓶颈 84 MB/s, 而交换网络的为 97 MB/s, 混合拓扑则处于二者之间(当消息流均匀分布时, 交换网络的吞吐量将要大得多)。以上是因为相同条件下, 确定延迟  $d_{cons}$  相等, 仲裁环进行数据传输时需要对接点的网络使用权进行仲裁, 较交换网络增加了协议开销, 增大了可变延迟  $d_{vari}$ , 进而增加了网络负载和延迟。

### 4.2 不同服务类的性能评价

交换网络拓扑结构下, 其它条件不变, 测量比较 FC 服务类 2 和服务类 3 的网络性能, 得图 3。

由图 3 所示, 从关系曲线的整体规律可以看出, 服务类 3 的平均延迟和最大延迟比服务类 2 小, 极限吞吐量比服务类 2 大。这是因为服务类 2 较服务类 3 的不同处是, 服务类 2 有帧

交付确认且支持端到端流量控制, 增加了网络开销, 增大了可变延迟  $d_{vari}$ 。所以服务类 2 较服务类 3 一定程度上牺牲了实时性, 但增加了可靠性。

### 4.3 临界工作负载点

以上测试由接口卡 A 接收背景消息流, 为具代表性, 在混合拓扑结构中使背景消息流均匀分布, 即提供背景消息流的每一个接口卡 B, C, E, F 同时向其他 3 个接口卡传输数据, 接口卡 D 和 A 只负责探测消息包的发送和接收, 其他条件不变, 得性能曲线如图 4 所示。

从图 4(c) 测试结果可以看出, 在网络累积负载不超过 160 MB/s 时, 网络吞吐量与网络累积负载呈线性关系增长, 并且斜率约为 1, 表明 FC 网络具有较好的可扩展性; 当网络累积负载超过 160 MB/s 时, 曲线斜率远小于 1, 网络达到饱和状态, 斜率为 1 的最大吞吐量为 160 MB/s 左右。

从延迟时间来看, 在网络负载较低时, 即小于临界负载点 80 MB/s, 同时网络吞吐量达到最大吞吐量的 50% 左右 ( $80/160=50\%$ ), 无论是消息的平均延迟时间还是最大延迟时间随负载的增大而增长较缓慢, 最大延迟时间不超过最小延迟时间的

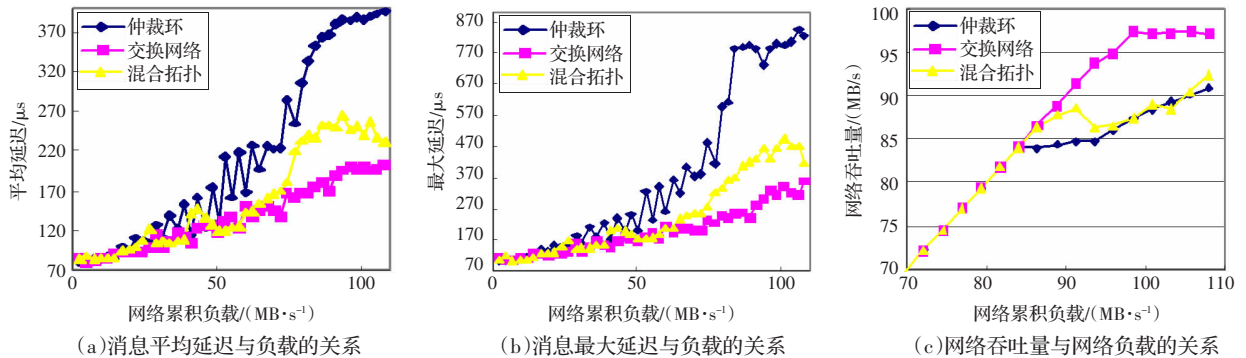


图 2 FC 网络不同拓扑结构的测试结果

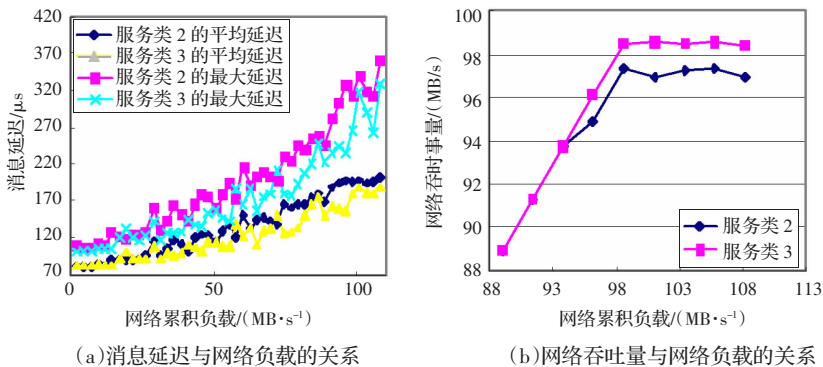


图 3 FC 网络不同服务类的测试结果

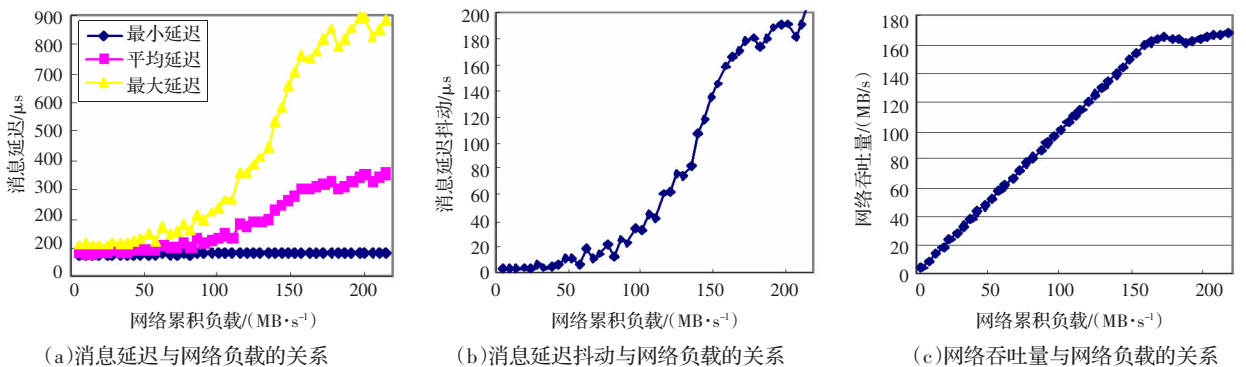


图 4 FC 混合拓扑均匀消息流条件下的测试结果

(下转 76 页)