航空电子环境下FC网络的建模与仿真

周天然 宋丽茹 熊华钢 林 强

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 机载网络是航空电子系统的重要部分.从航电系统对数据传输的需求出发,研究了光纤通道(FC,Fibre Channel)网络复杂混合拓扑的建模与仿真.在协议分析的基础上,将不同拓扑结构的网络抽象成终端与交换机模型的组合,并分别建模.基于离散事件系统仿真方法构建了适合航空电子环境的FC网络仿真平台,并提供网络吞吐量、延迟和实时性等性能指标的评价方法.仿真结果与实测数据相对比,误差小于10%,验证了模型的有效性.使用仿真模型进行案例分析,对机载FC网络做出性能评价.

关 键 词: 航空电子; 计算机仿真; 实时系统; 评价; 光纤通道

中图分类号: TP 393

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)10-1117-04

Modeling and simulation of fibre channel for avionics

Zhou Tianran Song Liru Xiong Huagang Lin Qiang

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

Abstract: Airborne network is an important part of the avionics system. According to the data transmission demand of avionics system, modeling and simulation of mixed complex topology fibre channel (FC) network was studied. Terminal model and switch model which can compose networks with different topology were built, based on the analysis of FC protocol. The FC network simulation platform which fits for the environment of avionics based on the discrete events system simulation method was built, and method of evaluating performance index such as throughput, delay and real-time characteristics was provided. Errors between simulation result and real data are less then 10%, which verified the accuracy of the model. A case was analyzed by the simulation model, and a performance evaluation of the airborne FC network was given.

Key words: avionics; computer simulation; real-time systems; evaluation; fibre channel

光纤通道是新一代网络和总线技术,具有带宽高、延迟低、位错率低和拓扑结构灵活等特性[1].由于其优异的性能和广泛的商业支持,成为未来航空电子系统互连的首选方案[2],并成功应用于美国最新一代战机F-35.

机载网络是航电系统的重要部分,其性能的好坏直接影响整个系统,因此设计和部署光纤通道之前,对其性能做出评价显得尤为重要.针对光纤通道在民用领域的应用——存储区域网,文献[3]建立了支持FC-2层描述的模型,并研究了吞吐量和I/O操作响应时间;文献[4]对交换结构的行为进行了模拟;文献[5]将SAN(Storage Area Network)中的节点按照功能划分成多级,对高层建立了MMQ(Multi-tier Multi-server Queuing)模型.然而在航空电子环境下运用光纤通道技术有其特殊性:系统结构复杂、实时性要求高、周期性数据流等,建立适合航电系统的仿真模型是一个重要的研究方向.本文将研究机载FC(Fibre Channel)网络的建模与仿真,支持混合拓扑结构,并对实时性和最坏情况下的通信特征做出评价.

收稿日期: 2007-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10477005)

作者简介: 周天然(1984—),男,江西南昌人,博士生,zhoutianran1@ee.buaa.edu.cn.

1 仿真策略

FC网络仿真采用离散事件驱动机制，即系统状态的改变由事件引发，仿真时钟的推进步长是随机的[6]. 仿真策略从整体上研究事件的调度方法和模型的控制逻辑，推进仿真的运行.

仿真系统模型的结构如图1所示. 事件管理器为FC仿真系统提供事件的调度和管理，控制仿真的运行. 其维护一个事件队列 $S=\{(s_1,t_1,p_1),(s_2,t_2,p_2),\cdots,(s_i,t_i,p_i),\cdots\}$，每个事件包含和执行顺序相关的时间参数 t_i 和优先级参数 p_i. 每次取出时间最小的事件 S_n，并将系统的仿真时间 t_{sim} 推进到 t_n，如果存在两个以上事件同时发生则取出具有最高优先级的事件. 事件管理器读取事件后，将系统控制权交给处理此事件的模型对象，并将事件从事件表中删除. 模型对象包含相应的事件处理函数处理执行此事件，并有可能产生新的事件. 新产生的事件通过事件管理器加入到事件队列中. 模型对象处理完此事件后，将系统控制权交还给事件管理器，进行下一事件的调度.

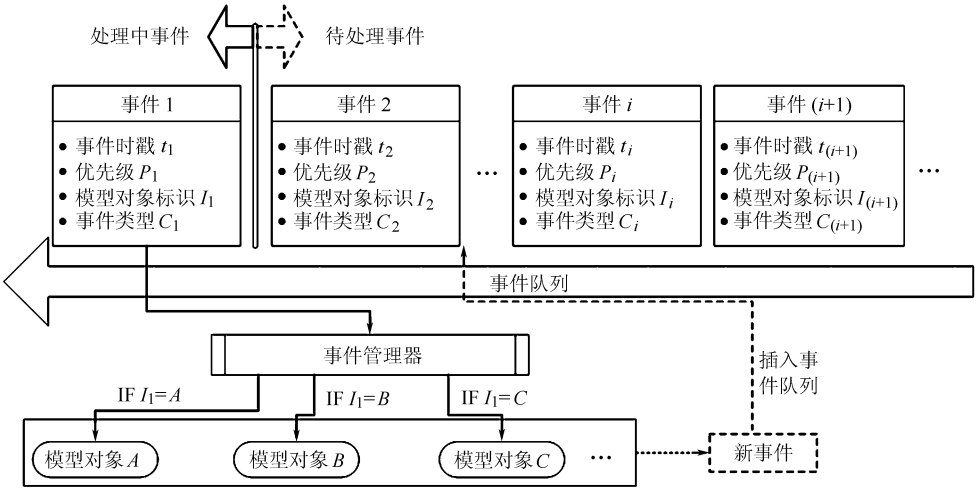


图1 仿真系统模型结构图

2 FC网络模型构建

在研究FC协议的基础上，可以将不同结构的FC网络抽象成终端和交换机的组合. 终端是数据的源和目的，可以通过不同的协议控制接入交换网络或仲裁环. 交换机是交换网络的核心，负责数据的路由和转发，同时提供端口允许仲裁环的接入. 下面分别对终端模型和交换机模型进行构建，并给出机载FC网络的性能评价指标.

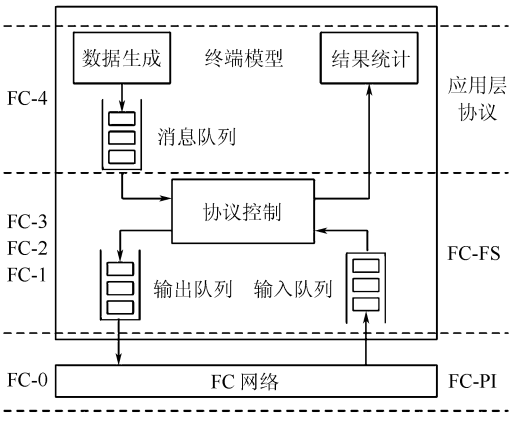


图2 终端模型结构图

2.1 终端模型

终端模型的结构以及相对应的FC层次与协议如图2所示，包括数据生成模块、结果统计模块、协议控制模块和消息队列、输入输出队列. 数据生成模块模拟航空电子环境中的各种设备产生负载数据流；结果统计模块记录终端收到的消息；协议控制模块是终端模型的核心，处理组帧、流量控制和服务.

表1列出终端模型中的主要事件和相应的处理动作. 数据生成模块产生应用层消息，并将其加入消息队列等待FC协议栈的处理. 协议控制模块接收到上层的数据发送请求后，取出消息队列中的第一个消息，按照最大载荷2 112 Byte分块并组成数据帧. 数据传输受到流量控制的约束，模型使用BB_Credit_CNT和EE_Credit_CNT两个计数器分别对应FC的缓冲到缓冲信誉(BB_Credit)和端到端信誉(EE_Credit)，每发送一帧计数器加1，收到相应的确认时计数器减1，计数值大于相

表1 终端模型主要事件列表

类型	事件名称	事件动作	新事件

N_1	初始化	初始化模型状态,建立信誉	N_2
N_2	消息生成	产生新消息,加入消息队列	N_2,N_3
N_3	组帧处理	将消息分块,添加帧头	N_4
N_4	准备传输	流量控制,仲裁环申请仲裁	N_5
N_5	传输数据	数据传出终端	N_6,S_2
N_6	帧到达	数据帧加入输入队列	N_7
N_7	帧处理	返回确认,尝试数据帧的拼接	N_7,N_8
N_8	结果统计	记录接收到的消息	无

应的信誉值时停止发送. 数据帧到达后被读入输入队列,由协议控制模块处理和拼接,最后交给结果统计模块. 协议控制模块同时实现了仲裁环端口状态机[7],仲裁环上的终端在数据传输前需要申请仲裁,并使用公平访问算法[7](fairness access algorithm)保证仲裁的公平性.

2.2　交换机模型

交换机模型如图 3 所示,由端口和交换核心组成. 端口负责在 FC 协议的控制下接收和发送数据帧. FC 交换机模型实现了多种端口类型,通过 F_Port 与终端设备相连,通过 E_Port 可以扩展交换机,通过 FL_Port 与仲裁环相连构成一种混合型拓扑. 交换核心模块是交换机模型中最重要的部分,通过查找路由表,将帧转发到相应的端口. 采用虚拟输出排队,在输入端口为每个输出端口分别排队,可以有效的解决排头阻塞问题,使吞吐量接近 100%[8].

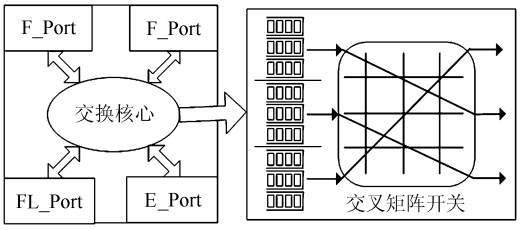


图 3　交换机模型结构图

表 2 列出交换机模型中的主要事件和相应的处理动作. 交换机接收到数据帧,检查帧头中的目的地址并查询路由表,将其缓存入相应的虚拟输出队列. 端口队列中的第一帧提出转发请求,检查输出端口的状态,并判断缓冲到缓冲的流量控制条件. 模型支持 FL 端口连接交换网络和仲裁环,去往 FL 端口的数据在转发前需要参与仲裁环的仲裁. 最后,数据帧从相应端口转发,并触发与之相连终端或交换机的帧到达事件.

表 2　交换机模型主要事件列表

类型	事件名称	事件动作	新事件
S_1	初始化	初始化状态,建立路由表和信誉	无
S_2	帧到达	接收数据帧,加入虚拟队列	S_3
S_3	申请转发	判断输出端口状态和流控条件	S_4,S_5
S_4	申请仲裁	FL 端口申请仲裁	S_5
S_5	转发数据	数据帧移出虚拟队列,并转发	S_2,N_6

2.3　性能评价指标

航空电子环境下,数据以固定长度的周期消息为主,如雷达、传感器等需要周期的将数据传给处理器. 定义一个包含 n 条实时消息流的消息集 $M=\{M_1,M_2,\cdots,M_n\}$. 每个消息流 M_i 由一个三元组$[L_i,P_i,D_i]$描述,其中 L_i 表示消息长度,P_i 表示消息产生周期,D_i 表示消息的最大允许延迟,即消息产生后必须在时间 D_i 内到达目的节点,通常可以假设 $D_i=P_i$. 消息产生时间为 T_{src},到达时间为 T_{dst}.

1) 最大延迟是最坏情况下通信特征之一

$$T_{\max}=\max(T^i_{\mathrm{dst}}-T^i_{\mathrm{src}})\quad i=1,2,3,\cdots,n$$

2) 平均延迟

$$T_{\mathrm{avr}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T^i_{\mathrm{dst}}-T^i_{\mathrm{src}})\quad i=1,2,3,\cdots,n$$

3) 网络吞吐量定义为单位时间内终端收到的消息字节,即

$$C=\frac{1}{T_{\mathrm{sint}}}\sum L^i_{\mathrm{received}}\quad i=1,2,3,\cdots,n$$

4) 延迟时间率是衡量网络严格实时性的指标之一,定义为消息的实际传输延迟时间与消息的最大允许延迟时间的比率,即

$$R^i=\frac{(T^i_{\mathrm{dst}}-T^i_{\mathrm{src}})}{D_{\mathrm{msg}}}\quad i=1,2,3,\cdots,n$$

3　仿真分析

为验证模型的有效性,将仿真结果与实测数

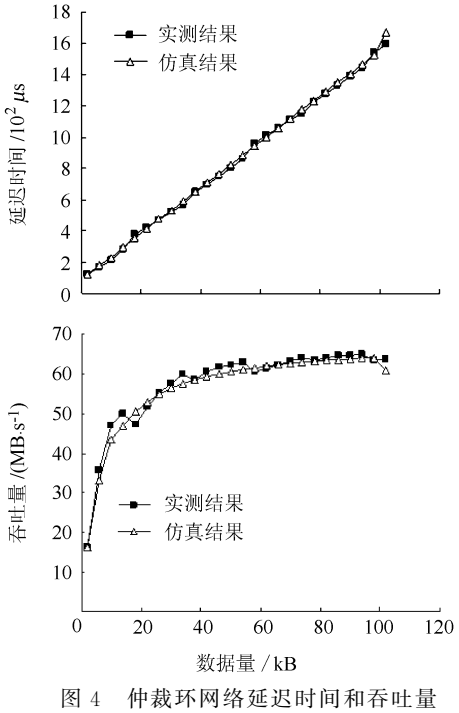


图 4　仲裁环网络延迟时间和吞吐量

据进行对比. 实验中设置 FC 的数据传输率为 1 GB/s,并采用轻量 IP 上层协议进行通信[9].

仿真实验 1 在仲裁环拓扑中,单个消息在网络轻载条件下,仿真端到端的传输特性. 数据包长度从 2 kB 开始,以 4 kB 为间隔增长直到100 kB,得到网络平均吞吐量和平均消息延迟. 结果如图 4,平均消息延迟曲线与纵坐标轴的截距是每个消息传输的固定开销. 随着数据长度的增大,吞吐量急剧增加,达到拐点后(约为20 kB),吞吐量趋于平稳. 仿真结果与实测值相比,延迟时间误差不超过 8%,吞吐量误差不超过 7%.

仿真实验 2 模拟多个终端通过 FC 交换机向一个终端发送数据,以验证随终端数的增加端到端延迟的变化和交换机端口的吞吐量瓶颈. 每个终端以 1 ms 为周期,传输长度为 25 kB 的大块数据. 结果如图 5,吞吐量在终端数增加到 4 个时达到 1GB/s 的瓶颈,同时消息平均延迟急剧增加. 仿真结果与实测值相比,延迟时间误差不超过 9%,吞吐量误差不超过 2%.

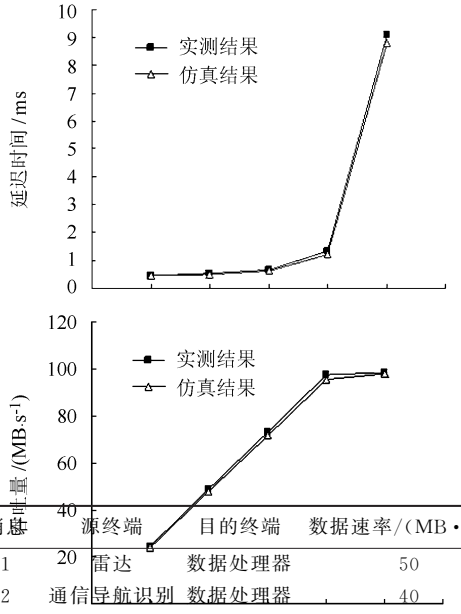


图 4 20 kB 数据块延迟时间和吞吐量

通过上述两个实验,仿真结果与实测数据得到很好的吻合,误差均小于 10%,从而证明了模型的有效性,也为后面对航空电子统一网络的设计与评价提供了可靠的保证.

4 应用举例

FC 提供一种混合式的拓扑,允许多种拓扑结构互连,在未来航电统一网络中,最有可能采用这种结构. 可以将系统按照功能、数据流分配等需要划为多个分系统,并根据其特点采用不同的拓扑. 图 6 建立了 FC 在航电系统互连中的一种概念模型,演示了航空电子环境下几个重要分系统之间的互连.

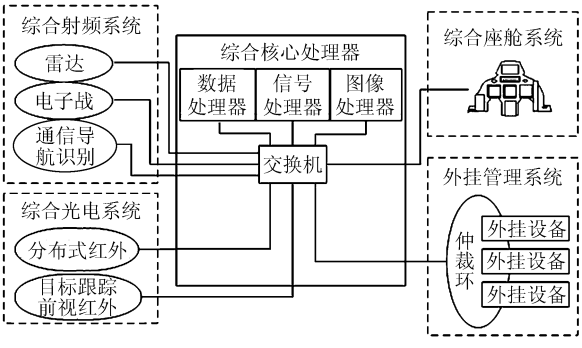


图 6 FC 航电系统互连举例

在上述场景下,对数据流进行分配,并对网络构建的合理性进行评估. 当交换机端口速率配置为 2 GB/s 时,仿真结果中的部分典型数据如表 3 所示. 可以得出,各消息的最大延迟均小于最大允许延迟,平均延迟时间率小于 60%,实时性得到保证,同时数据的流量小于交换机的负载能力. 建立的网络模型基本能够满足此应用的互连需求.

表 3 部分仿真结果

消息	源终端	目的终端	数据速率/(MB·s⁻¹)	最大允许延迟/ms	平均延迟/ms	最大延迟/ms	平均延迟时间率/%
1	雷达	数据处理器	50	100	49.78	51.03	49.78
2	通信导航识别	数据处理器	40	100	6.09	6.23	6.09
3	分布式红外	图象处理器	40	100	39.42	40.4	39.42
4	图象处理器	座舱显示	50	100	49.24	50.52	49.24
5	外挂设备	数据处理器	1	100	1.45	1.48	1.45
6	数据处理器	图象处理器	50	100	59.23	60.6	59.23

5 结束语

光纤通道作为一种基于商用现货(COTS, Commercial Off-The-Shelf)的新型总线网络,将广泛应用于航空电子系统互连. 本文针对 FC 在航空电子领域的应用,将复杂拓扑的网络模型抽象为终端和交换机的组合,并对其分别建模,给出网络性能评价指标. 利用实测数据对所提出的模型进行了验证,实测值和仿真结果之间误差均小于 10%,证明了模型的有效性. 通过对案例进行仿真评价,得出 FC 网络基本能够满足此应用的互连需求. 对航空电子环境下 FC 网络的建模与仿真研究,为 FC 用于未来航空电子系统互连提供了简单有效的设计和评价方法.

(下转第 1125 页)