

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2017.02.059

飞机悬挂物系统FC网络节点机的研究与设计

王世奎*, 邓发俊, 焦龙, 杨建茜

西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710068

摘 要: 为了提高飞机的武器装备作战能力, 最新颁布的飞机悬挂物系统接口标准中增加了对高带宽网络通信的新要求, 进而明确要求飞机悬挂物系统的上下行高速通信中应采用电传输的FC网络。设计了飞机悬挂物系统电传输FC网络的体系结构, 研究了飞机悬挂物FC网络节点机的高速电接口、限定的FC-AE-1553协议和FC-AV协议等关键技术。实现了双余度高可靠的FC通信节点机, 为建立飞机悬挂物高带宽FC通信网络奠定了基础。

关键词: 飞机悬挂物; FC网络; 节点机; FC-AE-1553; FC-AV

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2017) 02-0059-05

随着飞机作战使命需求的提升, 作为飞机机载系统重要组成部分的机载武器系统, 其关键功能与性能已非改进, 而在跨越式地发展。传统的基于1553B总线的1760系统已经成为制约机载武器系统发展的一个瓶颈。美军在飞机悬挂物系统中选择了1G速率的FC网络, 推出HS1760E标准^[1], 促进飞机悬挂物系统通信总线向着网络化、高速化的方向发展。国际自动机工程师学会结合FC系列标准, 基于FC-AE-1553协议, 针对H1760E要求, 在2008年颁布了飞机悬挂物系统FC高速网络通信标准AS5653^[2]。AS5653为高速FC通信技术在机载武器悬挂物系统中的应用给出了明确的规定。2011年以来, 美国AIT、DDC等公司公布了满足AS5653、1760E标准的FC网络节点机和交换机产品。据报道, 美在研的飞机武器系统上开始采用AS5653协议, 建立高带宽的FC网络, 以提高飞机的作战和侦查能力。

为提高飞机悬挂物系统的性能, 急需按照飞机悬挂物AS5653标准要求, 建立飞机悬挂物高速FC网络通信网络。综合国内外FC网络技术资料可见: 传统的民用FC网络采用的是SCSI协议, 航空嵌入式系统FC网络采用的则是航空电子环境(FC-AE)协议, 两者的物理层接口一般为光纤传输介质, 无法满足飞机悬挂物系统AS5653标准规定的高层协

议——限定的FC-AE-1553协议^[3]与FC-AV协议^[4]及物理层的电传输接口等要求。在飞机悬挂物FC网络中, 符合AS5653标准、电介质传输接口、高可靠性的FC网络接入设备FC网络节点机, 是飞机外挂物系统挂点、运载悬挂物接口、任务悬挂物接口等众多设备组网必备的FC网络通信接口, 是急需研发的网络通信的关键基础设备。

本文面向飞机悬挂物系统FC网络节点机研发需求, 研究FC网络的体系结构与组成要素, 重点分析飞机悬挂物系统FC网络节点机的层次功能、限定的FC-AE-1553和FC-AV协议、双余度电传输接口等关键技术, 设计了高可靠智能化的FC通信节点机, 将为研制飞机悬挂物系统高速FC通信网络奠定基础。

1 飞机悬挂物FC网络需求

依据1760E标准要求, I类飞机挂点接口(ASI)、运载悬挂物接口(CSI)、运载悬挂物挂点接口(CSSI)、任务悬挂物接口(MSI)等各个设备之间除传输命令、状态信息外, 扩展了对文件、图像等混合业务的高带宽通信的要求。

飞机悬挂物FC网络的主要功能需求:

(1) 网络带宽要满足混合信息流的要求, 因此, 带宽要

收稿日期: 2016-11-14; 退修日期: 2017-01-04; 录用日期: 2017-01-17

基金项目: 航空科学基金(2014ZC31002)

*通讯作者. Tel.: 13991921965 E-mail: kuishiwang@126.com

引用格式: WANG Shikui, DENG Fajun, JIAO Long, et al. Research and design of FC network node in aircraft/store system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(02): 59-63. 王世奎, 邓发俊, 焦龙, 等. 飞机悬挂物系统FC网络节点机的研究与设计[J]. 航空科学技术, 2017, 28(02): 59-63.

求大于100Mb/s的数量级,故选择1Gbps的传输速率;

(2) 除简单的外挂物点——点通信模式外,为满足外挂物系统各个设备分布式的通信模式,宜采用交换拓扑结构的网络,为保证网络可靠性,应采用如图1所示的双余度容错结构;

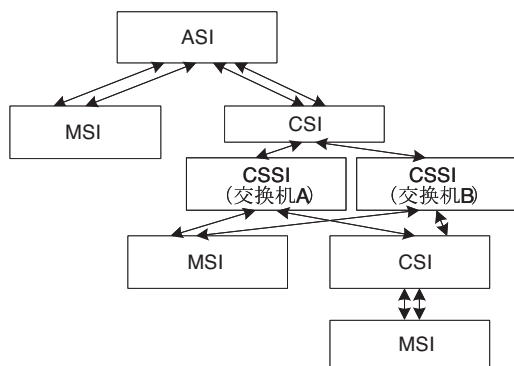


图1 飞机悬挂物系统双余度FC网络的拓扑结构

Fig.1 Topology of FC dual redundant network in aircraft/store system

(3) 命令、状态、文件的传输遵循AS5653中限定的FC-AE-1553协议,AS5653网络中只能有一个节点机作为FC-AE-1553网络控制器(NC),其余节点机作为FC-AE-1553网络终端(NT),共同完成帧信息的传输交换。

(4) 视频和音频传输,遵循限定的FC-AV协议——帧头控制协议(FHCP),AS5653网络规定,NC须具备FC-AV的通信协议处理能力,NT则视用户系统设备是否应用视频和音频来决定是否实现。

满足AS5653的FC网络较传统的外挂1553B总线,具有速率提高1000倍,误码率降低了3个数量级,传输延时缩小1~3个数量级,支持点对点、交换拓扑结构的优点,能够全面覆盖1760E标准I类的高带宽通信需求。

2 飞机悬挂物FC网络体系结构设计

基于飞机悬挂物FC网络的需求,综合研究AS5653协议,参照ISO网络的七层模型,建立飞机悬挂物FC网络系统的五层体系结构如图2所示。

在飞机悬挂物FC网络中,ASI、CSSI可作为FC网络交换机或节点机,CSI、MSI只能作为FC网络的节点机,交换机和节点机均要支持网络双余度容错。

基于以上的飞机悬挂物FC网络的体系结构,综合研究AS5653对电气特性和逻辑协议方面的规定,分析双余度FC网络节点机的各层要求如下^[5]:

(1) 物理层,按照FC-0规定,完成双路FC物理接口,实现1G速率、电缆接口传输介质的发送机、接收机。

(2) MAC层,按照FC-1规定,完成双余度发送端的

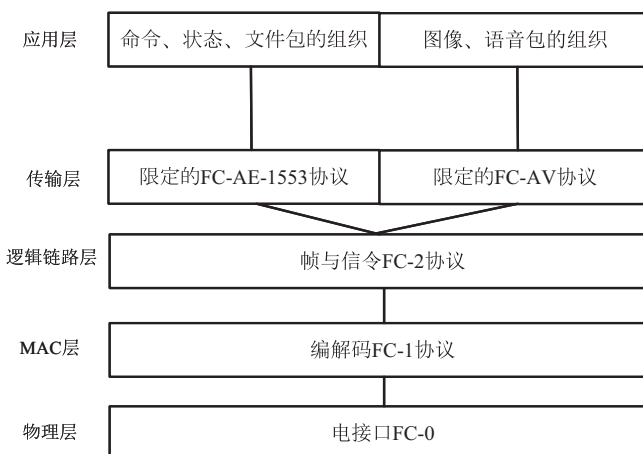


图2 飞机悬挂物系统FC网络的层次体系结构

Fig.2 Hierarchy architecture of FC network in aircraft/store system

8B/10B编码,将编码完成的传输字符(包括数据传输字符与特殊传输字符)进行发送,双余度接收端进行8B/10B的解码操作,恢复接收的数据字符。

(3) 逻辑链路层,按照FC-2规定,提供双余度端到端的数据传输机制、发送与接收的余度管理,包括节点标识、3类服务、帧组织、分段和重组。为保证通信的确定性,只使用缓存到缓存流控的3类服务。在点到点的拓扑结构中,只有节点机,因此,只需要N端口的注册;而在交换拓扑结构中,有交换机和节点机设备,需要N端口、F端口的注册。

(4) 传输层,按照限定的FC-AE-1553协议、FC-AV协议提供一组通用服务,为应用层完成FC-AE-1553消息、FC-AV容器帧收发组织。

(5) 应用层,提供用户的命令、状态、文件、图像、语音的传输透明服务,建立FC底层协议与用户接口控制(ICD)数据的映射。

3 FC网络节点机的设计与实现

通过飞机悬挂物系统FC网络需求和体系结构的研究可见,有别于传统的FC网络节点机设计,飞机悬挂物FC网络节点机需要重点解决高速电传输接口、限定的FC-AE-1553协议和FC-AV协议处理功能、双余度容错接口等技术。

3.1 高速电传输接口

根据飞机悬挂物系统特殊的工作环境、安装等要求,FC网络传输介质不能选用光缆传输介质,而选择75Ω的同轴电缆组网。为提高1G高速FC信号的电传输距离,达到 10^{-12} 的误码率,首先开展传输链路电信号的损耗余量的计算和仿真,其次在节点机的电收发器设计或选择中,既要提高发送信号

的峰峰值,又要提高接收器的接收灵敏度。

3.2 限定的FC-AE-1553协议处理

在飞机悬挂物系统中,通过适当限定FC-AE-1553协议,FC网络能实时传输命令、状态、文件等应用数据。按照限定的FC-AE-1553协议,FC网络节点机作为NC或NT完成消息帧的收发,FC-AE-1553协议帧是传递数据最基本的信息单元,分为命令帧、状态帧和数据帧^[6]。其中数据帧与正常的FC帧没有区别,下面说明限定的FC-AE-1553协议命令帧和状态帧格式。NC向NT发送的限定FC-AE-1553协议命令帧格式如图3所示。

字 \ 位	31-24	23-16	15-8	7-0
0	R_CTL	D_ID (NT 地址)		
1	CS_CTL	S_ID (NC 地址)		
2	TYPE(0×48)	F_CTL		
3	SEQ_ID	DF_CTL	SEQ_CNT	
4	OX_ID		RX_ID	
5	参数			
6	保留位 (5 位)	NT-NT 传输 (1 位)	NC 监控 NT-NT 传输 (1 位)	NT-NT 传输地接收或发送 NT 地址
7	子地址 / 方式命令			
8	数据字个数 / 方式代码			

图3 限定的FC-AE-1553命令帧格式

Fig.3 The format of FC-AE-1553 command frame

NT响应NC的命令帧,发送的限定FC-AE-1553协议状态帧的格式如图4所示。在飞机悬挂物系统中常用的FC-AE-1553传输模式包括3种:NC-to-NT、NT-to-NC和NT-to-NT。这3种模式的传输过程要求分别为:(1)NC-to-NT模式,NC作为传输主体发起一次传输操作,实现数据从NC到NT的传输过程如下:NC向NT发送命令序列,NT向NC应答响应序列,NC再向NC发送数据序列,最后NT向NC应答响应序列。(2)NT-to-NC模式,NC作为传输主体发起一次传输操作,实现数据从NT到NC的传输过程为:NC向NT发送命令序列,NT向NC应答响应序列,NT再向NC发送数据序列,最后NT向NC发送最后一个数据序列。(3)NT-to-NT模式,NT作为传输主体发起一次传输操作,需要发送型NT和接收型NT共同参与,实现数据从NT到NT的数据传输过程为:NC向NT发送命令序列(包含发送与接收两个命令信息),发送型NT将接收到命令序列中与接收型NT相关的信息组帧发送给接收型NT,发送型NT再组织相应的数据帧发向接收型NT,接收型NT响应状态序列给发送型NT,最后发送型NT组织本地的状态与接收型NT的状态成帧发送给NC。

以上正常的FC有效数据载荷长度应小于或等于2048B。根据AS5653协议,能够通过FC-AE-1553的长消息来传输文

字	位	31-24		23-16		15-8		7-0	
		R_CTL		D_ID (NT 地址)		S_ID (NC 地址)		F_CTL	
0		CS_CTL <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td>							
1		TYPE(0×48)							
2		SEQ_ID		DF_CTL		SEQ_CNT			
3		OX_ID				RX_ID			
4									
5									
参数									
6	保留 (21)	10.. 消息差错	9.. 测手段	8.. 服务请求	7.. 保留 (3 位)	4.. 广播命令接收	3.. 忙	2.. 子系统标志	1.. 动态网络控制接收
									0.. 终端标志

图4 限定的FC-AE-1553状态帧格式

Fig.4 The format of FC-AE-1553 stsus frame

件数据。在传输文件时,NC-to-NT或者NT-to-NT交换中,命令字中的“NT Burst Size Request”位应被设置为“1”,且“Delayed NT Burst Size Request”位应设置为“0”。FC网络节点机控制的一次交换可实现大文件传输,而不必由用户的应用划分文件为记录规划多次FC传输,因此,实时性得到了保证^[7]。

3.3 限定的FC-AV协议处理

根据AS5653协议,FC节点机传输视频和音频实采用FC-AV的帧头控制协议(FHCP)。FHCP协议定义了一个容器系统,数字音频/视频格式可以被映射到该容器系统中,包含容器头帧、辅助数据帧、音频数据帧和视频数据帧,容器头包含接收方识别视音频格式的信息及各个对象的定义;对象0为辅助数据,表示视频的大小、刷新方式等辅助信息;对象1为音频数据;对象2和对象3为视频数据。对象信息不能交叉传输,必须按照顺序发送每个对象的信息,只有发送完一个对象的数据,才能发送后一个对象的数据。

基于飞机外挂系统的视频传输特性,作以下限定:(1)容器头有简单模式和扩展帧头模式两种格式,选用整个容器头只需要22个字的简单模式,减少延时;(2)因对象3仅用于传输叠加的视频信息,因此删去对象3,只使用对象2传输视频。限定的FC-AV容器与FC帧的关系如图5所示。

3.4 双余度容错通信接口

飞机悬挂物系统执行作战任务,安全性和可靠性必须得到确切保证。因此,要求悬挂物系统FC网络采用双余度网以达到可靠的容错能力。双余度FC节点机的硬件余度到什么层次,需要综合网络系统的可靠性指标、故障模式、器件失效率指标、节点机功耗体积等因素。通过分析,得到以下合理的冗余方案:双余度的FC节点机在物理层、MAC层两层采用双通道设计,MAC层以上采用单通道设计。针对故障概率高的FC物理层和MAC层采用完全独立的器件或电路实现,保证FC网络的某一个物理链路出现失同步、误码、丢包等错

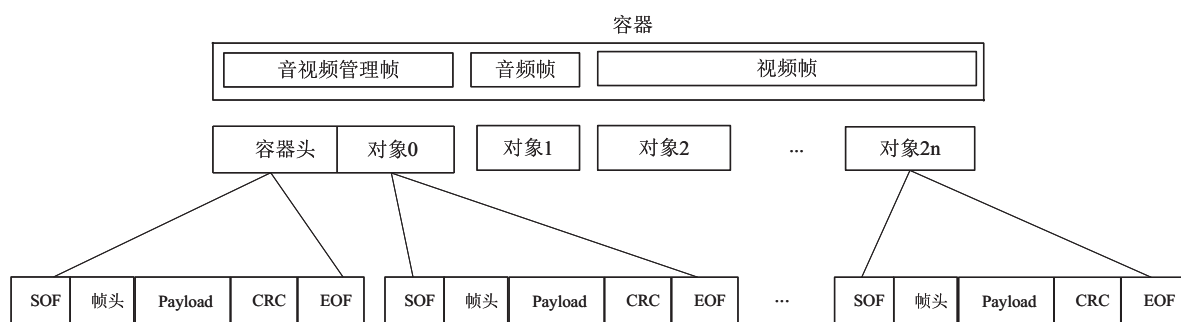


图5 限定的FC-AV 容器与FC帧的映射关系

Fig.5 The map relation of FC-AV container and limited FC frame

误时,另有一条FC通路能保持正常,网络传输不受到影响逻辑;而FC的逻辑链路层、传输层和应用层则采用非冗余的器件、电路或软件实现。

3.5 FC网络节点机实现

为使FC节点机满足高可靠、易升级的设计目标,FC节点机设计为内含处理器的智能通信接口,完成通信协议处理、数据收发管理、编解码等功能,其功能组成框图如图6所示。

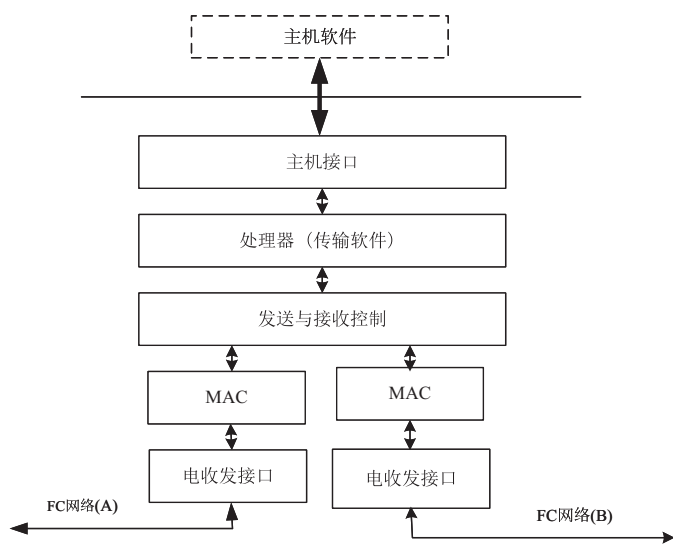


图6 FC节点机功能组成框图

Fig.6 FC node function composition

FC节点机硬件设计主要包括:

(1)双余度FC物理接口单元;(2)双余度MAC单元;(3)发送与接收控制单元;(4)处理器单元,支持节点机传输软件执行;(5)主机总线接口。

双余度FC节点机物理单元,按照AS5643的电气特性要求,设计为2个1G速率、75Ω同轴电缆电接口。为保证FC物理接口设计的误码率特性小于 10^{-12} ,可通过专用的电发送驱动电路提高发送电压幅度,在后端的发送器增加可编程的预加重,根据FC电网络的特性调整加重比例;也可通过专用的电

接收滤波电路提高接收信噪比,在后端的接收器增加均衡可编程功能,以支持依据FC电网络的特性调整均衡系数。

FC-MAC单元按照FC-1要求,实现8B/10B编解码、原语信号、原语序列的识别,同时提供字边界对齐定位、字同步、CRC编码生成和校验等功能。

发送与接收控制单元按照FC-2要求,实现数据帧的发送组织、接收帧的解析、端口状态管理、3类服务缓存--缓存流量管理等功能。

处理器与传输软件支持节点机作为NC或NT,按照限定的FC-AE-1553或FC-AV协议要求,依次分别组织FC序列与帧的发送,负责与主机接口PCIE的数据读操作与发送MAC的写操作;负责接收FC-MAC收到的正确消息,按照限定的FC-AE-1553或FC-AV协议要求,依次分别解析FC序列与帧的类型,负责与主机接口PCIE/PCI的数据写操作,然后通知主机处理;负责主机命令的处理、节点机的自测试、网络的调试及维护等功能。

主机接口单元与主机软件,硬件采用PCIE接口,软件提供API库由主机调用,负责完成节点机的初始化、启动、自测试、应用数据的管理等功能。

3.6 FC网络节点机通信试验

在实验室条件,将研发的两块飞机悬挂物系统双余度FC节点机模块,用75Ω的同轴电缆互联进行通信测试。2个节点机模块分别作为NC和NT角色,由NC配置3条NC—NT消息、3条NT—NC消息和两条FHCP流消息,消息编号分别为1~8,组织发送给NT,详细测试结果如表1所示。测试结果表明,FC节点机模块能够作为NC、NT完成AS5653规定的通信协议帧组织。

4 结束语

本文针对飞机悬挂物AS5653标准要求,研究了高速FC网络体系结构,分析了飞机悬挂物系统FC网络节点机的

表1 两个FC节点机模块通信测试表
Table 1 Communication test of two FC node modules

序号	消息类型	消息长度	传输次数	总传输位数
1	NC—NT 消息	128B	10^7	10,240,000,000
2	(模拟命令下发)	1024B	10^6	8,192,000,000
3		2048B	10^6	16,384,000,000
4	NT—NC 消息	128B	10^7	10,240,000,000
5	(模拟状态采集)	1024B	10^6	8,192,000,000
6		2048B	10^6	16,384,000,000
7	流数据消息	1MB	10^5	838,860,800,000
8	(模拟图像传输)	2MB	10^5	1,677,721,600,000

注：由表中统计：累计总传输位数为 2.56×10^{12} ，对接收到的消息数据内容进行逐位比对，通信中无误码产生，计算传输误码率小于 10^{12} 。

5个层次功能要求，研究了满足飞机悬挂物通信限定的FC-AE-1553协议、FC-AV协议的功能要求，给出了双冗余度电传输接口的设计方案，最后完成了高可靠智能化的FC通信节点机的硬软件设计和试验，为飞机悬挂物高速FC通信网络的研制奠定了良好的技术基础。

AST

参考文献

[1] Department of Defense. MIL-STD-1760E: Aircraft/store electrical interconnection system[S]. U.S.: Department of Defense, 2007.

[2] SAE. AS5653: High speed network for MIL-STD-1760[S]. U.S.: SAE, 2008.

[3] ANSI.TR-42-2007: INCITS technical report for information technology-fibre channel-avionics environment-upper level

protocol(FC-AE-1553)[S]. U.S.: ANSI, 2007.

[4] ANSI. INCITS 356-2002: Fibre channel-audio video(FC-AV)[S]. U.S.: ANSI, 2007.

[5] 屠晓杰, 熊华钢, 徐鼎, 等. 支持多种FC-4层协议的光纤通道接口卡实现[J]. 电讯技术, 2013(2): 188-194.

TU Xiaojie, XIONG Huagang, XU Ding, et al. Implementation of fibre channel interface card supporting multiple FC-4 layer protocols[J]. Telecommunication Engineering, 2013(2): 188-194.(in Chinese)

[6] 杨建新, 彭海军, 金石娇. 数字视频总线在综合航电系统中的应用研究[J]. 航空计算技术, 2014(3): 109-112.

YANG Jianxin, PENG Haijun, JIN Shijiao. Application of digital video bus in integrated avionics system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014(3): 109-112.(in Chinese)

[7] 曹素芝, 张善从. FC-AE-1553高级特性介绍[J]. 光通信技术, 2010(2): 49-51.

CAO Suzhi, ZHANG Shancong. Analysis on advanced features of FC-AE-1553[J]. Optical Communication Technology, 2010(2): 49-51.(in Chinese)

作者简介

王世奎(1965—) 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 计算机网络。
Tel: 13991921965
E-mail: kuishiwang@126.com

邓发俊(1985—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 计算机网络。

焦龙(1987—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 计算机网络。

Research and Design of FC Network Node in Aircraft/store System

WANG Shikui*, DENG Fajun, JIAO Long, YANG Jianxi
Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China

Abstract: In order to improve the battle capability of aircraft weapon, the high bandwidth network communication requirement was added in the newest aircraft/store system interface standard, FC network with electrical transmission media shall be applied in high bandwidth up and down communication paths of aircraft/store. The architecture of FC network of aircraft/store was designed. The key techniques of electrical interface, limitative FC-AE-1553 and limitative FC-AV were studied. The dual redundant FC communication node was implemented. The base for FC high-band network in aircraft/store was established.

Key Words: aircraft/store; FC network; node; FC-AE-1553; FC-AV