

基于FPGA的多功能FC协议分析仪设计

杨海波,田泽,蔡叶芳,李攀,黎小玉

(中国航空计算技术研究所,陕西西安710119)

摘要:光纤通道是下一代航空电子统一网络的一种主要联网标准,广泛应用于航空电子系统设备的互连、通讯等领域。专门的FC仿真测试、调试分析设备是加速机载FC设备研制所必需的仪器,是设计的协议符合性、可靠性和性能等的保障,也是维护和排故的有效工具。但是,由于FC协议的复杂性等原因,目前专用FC协议仿真、测试分析设备的研发远滞后于机载FC设备的研制。针对这一现状,提出了一种支持原语和帧捕获分析、故障注入、压力测试等多项功能的FC协议分析仪设计方案,描述了其系统结构和硬、软件组成,并详细说明了其核心FPGA的设计思路。该分析仪具有便携、功能丰富、使用简便直观的特点,能够替代昂贵、复杂的国外商用FC测试设备,具有广阔的市场前景。

关键词:FPGA;光纤通道;协议分析仪

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)07-0214-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.07.055

Design of Multi-functional FC Protocol Analyzer Based on FPGA

YANG Hai-bo, TIAN Ze, CAI Ye-fang, LI Pan, LI Xiao-yu

(Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710119, China)

Abstract: Fiber Channel is a unified network of next-generation avionics networking standard, widely used in the field of avionics interconnect and communication. Special equipments for airborne FC equipment simulation, test and analysis are necessary instrument that accelerate its development, safeguard protocol compliance, reliability and performance. They are also effective tools of maintenance and debugging. But, because of the complicity of FC protocol, the development of special FC equipment for simulation, test and analysis lags behind the development of Airborne FC equipment. According to this status, proposed a multi-functional FC protocol analyzer, which support primitive and frame capture and analysis, fault injection, pressure testing. Describe its system architecture and hardware and software components, and then a detailed description of its core FPGA design is given. This FC protocol analyzer has a portable, feature-rich and easy to use alternative to expensive and complex foreign commercial test equipment and has a broad market prospects.

Key words: FPGA; FC; protocol analyzer

1 概述

光纤通道(Fiber Channel, FC)是由美国国家标准协会(ANSI)T11委员开发的一种高速传输数据、音频和视频信号的ANSI串行通信标准^[1,2]。它综合了通道和网络两方面的优点,在提供高速率传输的同时,还能够保证信号传输的质量,非常适合于下一代战机使用。因此其以高带宽、高可靠性以及良好的灵活性、连接能力和传输距离等优点,成为下一代航空电子统一网络的一种主要联网标准。

在FC协议基础上,FC标准开发组织的航空电子环境的分委员会,专门针对FC技术应用于航空电子

领域制定出了一组协议草案,即光纤通道航空电子环境(Fiber Channel Avionics Environment, FC-AE),包括无签名的匿名消息传输FC-AE-ASM(Anonymous Subscriber Messaging)^[3]、MIL-STD-1553高层协议FC-AE-1553、虚拟接口FC-AE-VI(Virtual Interface)、FC轻量协议FC-AE-LP(Lightweight Protocol)、远程直接存储器访问协议FC-AE-RDMA(Remote Direct Memory Access),每一部分都支持一个或多个高层协议和拓扑结构,能共同使用且实现实时光纤通道网络特征,具备了支持不同航空电子系统需求的网络能力。

收稿日期:2012-11-02

修回日期:2013-02-23

网络出版时间:2013-04-18

基金项目:“十二五”微电子预研(51308010601);国防预研基金(9140A08010712HK6101);中国航空工业集团公司创新基金(2010BD63111)

作者简介:杨海波(1982-),男,陕西宝鸡人,硕士,研究方向为SoC设计、验证以及嵌入式系统设计;田泽,博士,研究员,研究方向为SoC设计方法学、嵌入式系统设计、VLSI设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130418.1701.003.html>

随着航电系统的不断升级,其对 FC 设备功能和性能、研制周期和可靠性的要求越来越高,机载 FC 网络的规模和复杂度也不断提高。FC 技术在我国航空电子领域的逐步推广和应用以来,国产机载 FC 设备的研制紧跟航空电子系统发展的脚步,已经走在了系统研制的前沿,机载 FC 产品线(如 FC 协议处理芯片、基于专用协议芯片或 FPGA 的 FC 网络适配卡、节点机、FC 交换机、FC 视频卡等)日渐丰富。然而,与此相矛盾的是,研制机载 FC 设备的核心协议芯片以及核心网络接口设备所必需的专用仿真测试、调试分析、维护保障等配套产品的研发却滞后于机载 FC 产品的研制步伐,仍依赖于少量国外的昂贵、功能复杂且冗余的商用测试设备,造成机载 FC 设备的研制周期长,协议符合性、FC 网络互联互通性等协议相关测试代价大,维护和排故困难,产品的可靠性和性能难以保证。

因此,研制针对国产 FC 协议芯片和机载嵌入式 FC 设备的测试、仿真、故障诊断、协议分析验证的地面配套产品的需求越来越迫切。在此背景下,介绍了一种集协议数据过滤、采集、网络监控、仿真、故障注入、流量产生和压力测试等功能于一体的多功能 FC 协议分析仪,可以加速机载 FC 设备的设计、验证,提高产品的可靠性和协议符合性,打破国外测试设备的垄断。

2 协议分析

FC 协议采用的是五层分层结构(见图 1),各层之间技术相互独立^[4]。其中 FC-0 是光纤通道结构的最底层,定义了连接的物理特性。FC-1 定义了传输协议,包括串行编/解码规则以及差错控制机制。FC-2 层是信号传输协议层,它规定了数据传输的规则、通讯模型、拓扑结构,以及帧格式、帧序列、通信协议和服务分类等。该层定义了 6 类服务,不同传输要求的数据应该选择不同的服务种类(其中服务 1、2、3 和 6 最适合航空电子系统)。FC-3 层对物理和信号层以上的高层协议提供了一套通用的公共通信服务。FC-4 是光纤通道协议结构的最高层,定义了光纤通道的应用接口,规定了上层协议到光纤通道的映射。

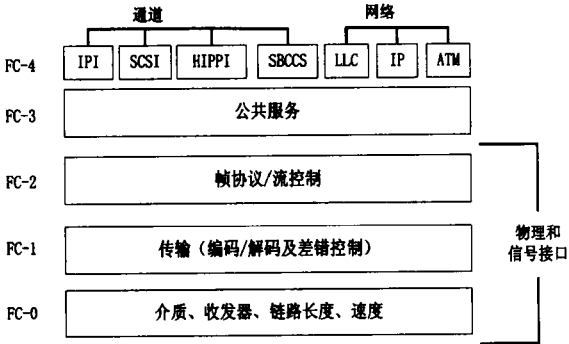


图 1 FC 协议的分层结构

机载 FC 设备的通讯,基于 FC-0 层即物理层传输数据。这些数据按照 FC-1 层定义的编/解码规则编码和解码,以 FC-2 层规定的帧和序列的格式传输,并且遵循 FC-2 层以上的上层协议。比如航空电子系统广泛选用的 FC-AE-ASM 协议,介于 FC-2 层(帧与信令)和 FC-3 层(通用服务)之间,定义于一个仲裁环或交换式结构的实时 FC 网络,通过对 FC 帧格式的数据域封装 ASM 帧头实现协议映射,要求实现该协议的设备必须将标记协议的 ASM 帧头字段独立放置于 FC 数据的恰当位置上,所有帧的 ASM 帧头将会在数据重组前被去掉。

因此,针对机载 FC 设备的协议分析仪,需要能够采集和记录 FC-0 层所传输的串行数据,按照 FC-1 层的规则解码和识别,还原为 FC-2 层所定义的序列中的帧,并解析出其所遵循的上层协议,比如 FC-AE-ASM 等,以友好的界面将相关信息传递给用户。另外,多功能协议分析仪还应该具备自主地按照标准协议和预定速率发送数据的能力,以用于机载 FC 设备的压力测试、故障注入等。

3 多功能 FC 协议分析仪系统设计

多功能 FC 协议分析仪是 FC 网络设备开发测试的集成平台,通过软件配置可完成协议分析、故障注入、流量发生等功能,无需对硬件进行改变。该分析仪为标准货架产品,采用模块化,设计由电源模块、数据处理模块、数据采集仿真模块以及底板和机架组成,如图 2 所示。

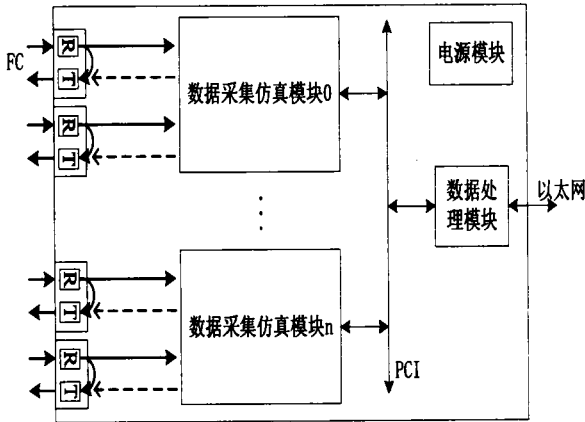


图 2 多功能 FC 协议分析仪系统框图

数据采集仿真模块数目可扩展,单模块提供 2 个 1.0625Gbps 或 2.125Gbps 速率可配置的 FC 端口。此 FC 端口支持三种模式,可以进行 FC 链路数据的过滤、采集、记录,在故障注入模式下,也可以按要求产生 FC 数据激励,完成数据仿真或错误注入,同时能够进行被测节点的收/发性能监控。分析仪为独立设备,通过以太网与上位机(如工控机)相连。分析仪底层驱动软

件配合运行于上位机的 GUI 应用软件,完成分析仪参数配置以及 FC 协议数据的回放、解析。

4 多功能 FC 协议分析仪硬件设计

如前所述,多功能 FC 协议分析仪的硬件主要由电源模块、数据处理模块、数据采集仿真模块和底板、机箱组成。电源模块的主要功能是电压转换以及对整个分析仪供电和电源保护;数据处理模块负责与上位机通讯配置数据采集仿真模块的工作模式,处理数据采集仿真模块采集到的 FC 协议数据,用于回放和分析。数据处理模块的设计要求是具备 CPU 和一定容量的存储器(用于数据暂存),具备 PCI Host 接口(对内)和以太网接口(对外)。

数据采集仿真模块是多功能 FC 协议分析仪的关键硬件模块。其以一片 FPGA 芯片为核心,外围配以必须的电源、时钟、复位电路以及光电转换器件和 DDR2 存储器,能够根据配置完成两路 FC 数据(包括原语、帧或链路上的其他信息)的过滤、采集、记录,同时可以按照上位机软件要求,产生数据激励,对被测设备进行 FC 协议的仿真和压力测试、性能测试。

如图 3 所示,数据采集仿真模块的核心功能在 FPGA 中实现,包括相同的两套独立电路,分别实现 1 路 FC 端口的数据采集和仿真。每一路电路均由高速串行接口、FC-2 协议处理、协议数据采集、FC 数据注入、DDR2 存储器接口、配置寄存器组、PCI 接口及译码与数据选择逻辑组成。

GTX 高速串行接口^[5]是 1.0625Gbps 或 2.125Gbps 的串行接口,接收、发送差分数据电信号,并进行并串转换和 8b/10b 编解码;由 FPGA 提供的硬核实现。

FC-2 层是信号传输协议层,它规定了数据传输的规则、通讯模型、拓扑结构,以及帧格式、帧序列、通信协议和服务分类等。FC-2 协议处理电路实现 FC MAC 功能,负责 FC 协议原语、数据帧的识别和并行输出,同时还可以按照协议规定发送准备好的数据。

协议数据采集电路可按照配置寄存器中预先配置的原语、帧过滤或触发模板,如特定 SOF、EOF 字段,特定 FC 帧头字段,特定位置的特定数据字段或其组合

等,将满足条件的 FC-2 协议处理电路所输出的数据,加上本地时标,以约定格式(区分原语和数据帧)输出。

DDR2 存储器电路包括片内缓冲以及 DDR2 存储器控制器,将协议数据采集电路的输出暂存后,通过 DDR2 存储器接口写入。

FC 数据注入电路实现了 FC 原语或数据帧的循环发送,原语的内容、发送次数以及帧的长度和帧头、帧尾参数字段和 payload 字段、发送次数均可由软件在模板中设置。

FPGA 中的两路采集仿真电路共用同一个 PCI 接口,通过地址划分,由各自的译码及数据选择逻辑实现数据处理模块对数据采集仿真模块的配置、控制,以及从 DDR2 存储器到上位机的数据回放。

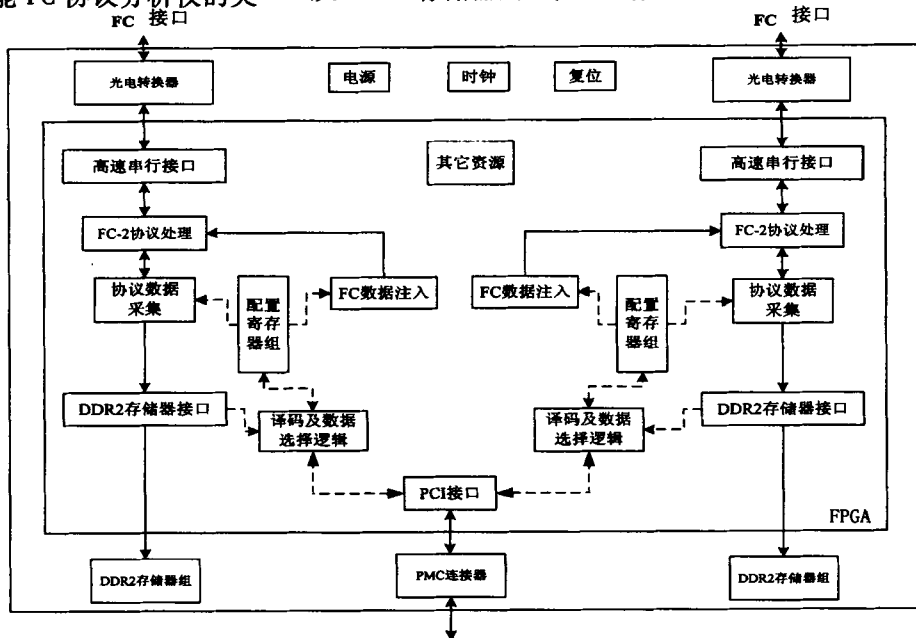


图 3 数据采集模块硬件结构图

配置寄存器组存储数据处理模块对数据采集仿真模块的配置、模板等信息,包含设备管理寄存器、捕获/触发控制寄存器、模板设置寄存器等寄存器资源,实现多功能 FC 协议分析仪的功能配置,具体信息如表 1 所示^[6,7]。

多块数据采集仿真模块与一块数据处理模块通过底板组成的系统,形成完整的多功能 FC 协议分析仪硬件架构^[8]。底板可预留扩展 PMC 槽位以使系统具有良好的端口扩展能力。

5 多功能 FC 协议分析仪软件设计

多功能 FC 协议分析仪的软件由运行于分析仪的驱动软件、传输软件和运行于上位机的应用软件组成,具有数据回读、查看和协议分析等功能。应用软件能提供友好、易用的人机界面,可用于监控 FC 网络上的

数据和状态,测试和分析 FC 网络。图 4 给出了多功能 FC 协议分析仪的软件结构,其具体设计另文描述,不作文中重点。

表 1 数据采集仿真模块寄存器说明

寄存器分组	内容
设备控制寄存器	包括软复位寄存器、设备状态寄存器、命令寄存器、中断控制寄存器、信号量寄存器、链路状态寄存器、端口锁定寄存器、显示刷新定时器、LED 控制寄存器等
捕获/触发控制寄存器	包括捕获定时器、帧/原语捕获使能寄存器、过滤使能寄存器、错误数据强制捕获寄存器、错误标示寄存器、缓冲区配置寄存器、停止捕获寄存器等
模板设置寄存器	FC 帧捕获/过滤条件模板设置寄存器 0~12(分别对应 SOF、FC-Header0、FC-Header1、FC-Header2、FC-Header3、FC-Header4、FC-Header5、FC-ASM_Header0、FC-ASM_Header1、FC-ASM_Header2、FC-ASM_Header3、payload 以及 EOF 字段)、FC 帧捕获过滤条件模板掩码寄存器等
注入控制寄存器	发送通道控制寄存器、注入次数寄存器、错误注入使能寄存器、帧内容模板寄存器等

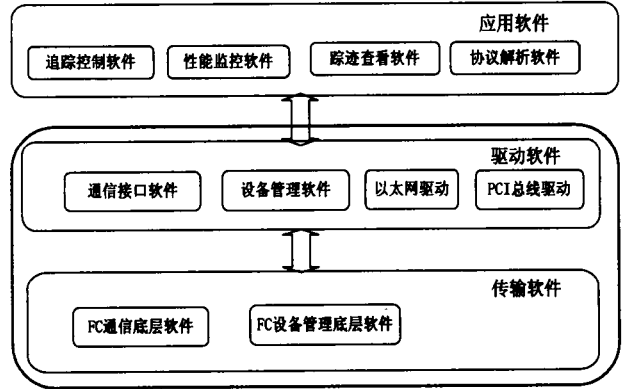


图 4 多功能 FC 协议分析仪软件架构

6 结束语

针对机载 FC 设备的研制对配套仿真测试及调试分析等配套设备的迫切需求,以及 FC 协议分析、仿真设备发展的滞后现状,提出了一种多功能 FC 分析仪的设计方案,以其核心部件——数据采集仿真处理模块为重点,详述了分析仪的系统架构以及硬、软件的实现。该分析仪具有便携、功能丰富、使用简便直观的特点,借助其强大的仿真、测试及协议分析功能,能够帮助系统工程师在较短的时间内研制、应用高质量的 FC 协议芯片或整机产品到航电网络,占据市场先机。

参考文献:

[1] ANSI. Fiber Channel Framing and Signaling-2 (FC-FS-2), Rev0.01[S]. USA:ANSI,2003.

[2] ANSI. Fiber Channel Physical and Signaling Interface (FC-PH),X3[S]. USA:ANSI,1994.

[3] ANSI. Fiber Channel Avionics Environment-Anonymous Subscriber Messaging (FC-AE-ASM),Rev1.2[S]. USA:ANSI,2006.

[4] 田泽,韩炜,蔡叶芳,等.基于 FC 接口的 SoC 软硬件协同设计验证平台构建与实现[C]//第十三届计算机工程与工艺会议论文集.西安:西北工业大学出版社,2009.

[5] Xilinx. LogiCORE™ Fiber Channel v2.1[M]. [s.l.]:Xilinx,2006.

[6] 田泽,侯锐.基于 FC 接口智能电源管理模块的设计[J].电脑知识与技术,2010,6(10):2449-2450.

[7] 黎小玉,田泽,王泉,等.基于 SoC_FC 芯片的电源管理系统设计与实现[J].计算机技术与发展,2010,20(8):247-249.

[8] 廖寅龙,田泽.FC 网络通信中 PCIe 的接口的设计与实现[J].航空计算技术,2010,40(4):127-130.

(上接第 213 页)

转换及低通滤波后即可得所需激励信号。实验结果表明,该信号发生器稳定可靠、精度较高。完善系统功能,实现周期数、幅值及信号宽度等参数均可调将是下一步工作重点。

参考文献:

[1] 周正干,冯海伟.超声导波检测技术的研究进展[J].无损检测,2006,28(2):57-63.

[2] 董为荣,帅建.管道超声导波检测技术[J].管道技术与设备,2006(6):21-23.

[3] 何存富,李隆涛,吴斌.超声导波在管道中传播的数值模拟[J].北京工业大学学报,2004,30(2):129-133.

[4] Rose J L,Zhao Xiaoliang. Flexural mode tuning for pipe elbow testing[J]. Material Evaluation,2001,59(5):621-624.

[5] Aristegui C,Lowe M J S,Cawley P. Guided waves in fluid-

filled pipes surrounded by different fluids[J]. Ultrasonics,2001,39(5):367-375.

[6] Lowe M J S,Alleyne D N,Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves[J]. Ultrasonics,1998,36(2):147-154.

[7] 金传喜,武新军,夏志敏,等.导波检测用激励源的设计与应用[J].制造业自动化,2006,28(10):79-81.

[8] 蒋献丰,钱卫飞.基于单片机与 FPGA 的波形发生器[J].中国测试技术,2008,34(3):77-80.

[9] 曹郑蛟,滕召胜,李华忠,等.基于 FPGA 的 DDS 信号发生器设计[J].计算机测量与控制,2011,19(12):3175-3177.

[10] 王金明.数字系统设计与 Verilog HDL[M].第 3 版.北京:电子工业出版社,2009:285-286.

[11] 张轩硕,王建斌,王军阵,等.基于 SoPC 的超声导波激励信号发生器设计[J].电子技术应用,2011,37(7):82-85.

基于FPGA的多功能FC协议分析仪设计

作者： 杨海波, 田泽, 蔡叶芳, 李攀, 黎小玉, [YANG Hai-bo](#), [TIAN Ze](#), [CAI Ye-fang](#), [LI Pan](#), [LI Xiao-yu](#)
作者单位： [中国航空计算技术研究所, 陕西西安, 710119](#)
刊名： [计算机技术与发展](#) 
英文刊名： [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013, 23(7)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201307055.aspx