

引用格式:李龙,曹素芝,席隆. 面向 FC-以太网融合网络的嵌入式网关设计 [J]. 微电子学与计算机,2019,36(2):31-35. [LI L, CAO S Z, XI L. Design of embedded gateway for FC-ethernet convergence network[J]. Microelectroncs & Computer, 2019, 36(2): 31-35.]

面向 FC-以太网融合网络的嵌入式网关设计

李 龙^{1,2}, 曹素芝², 席 隆²

(1 中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049;

2 中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

摘 要: 为了降低网络维护成本和统一网络架构, 实现面向 FC 的多协议融合型网络. 本文给出 IP over FC 网关的设计方案和实现方法, 详细介绍基于 FPGA 的嵌入式网关其系统架构和数据处理流程. 同时对千兆以太网与 FC 之间帧格式的转换与地址映射进行仿真分析, 并结合某型号航天器具体应用场景完成前期工程验证. 结果表明, 嵌入式 IP over FC 网关能够高效实现数据帧的解析与路由, 协议转换最小时延为 25 μs , 完好地实现 FC 与千兆以太网的无缝衔接与协议转换.

关键词: 多协议融合网络; IP over FC 协议; 协议栈模型; 网关; 嵌入式系统

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)02-0031-05

Design of Embedded Gateway for FC-Ethernet Convergence Network

LI Long^{1,2}, CAO Su-zhi², XI Long²

(1 School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Technology and Engineering Centre for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to reduce network maintenance costs and unify network architecture, a multi-protocol convergence network oriented to FC is realized, the design scheme and implementation method of IP over FC gateway are presented, and the system architecture and data processing flow of embedded gateway based on FPGA are introduced in detail. The simulation and analysis of the frame format conversion and address mapping between Gigabit Ethernet and FC are carried out, and the preliminary engineering verification is carried out in combination with the specific application scenario of the manned spacecraft. The results show that the embedded gateway efficiently realize the data frame analytical and routing, the minimum delay of protocol conversion is 25 μs , which perfectly realize FC and Gigabit Ethernet seamless convergence and protocol conversion.

Key words: multi-protocol convergence network; IP over FC protocol; protocol stack model; gateway; embedded system

1 引言

网络互联成为未来通信的必然趋势, 但因网络异质性带来的众多不兼容问题也给通信带来了极大

的困难^[1]. 为了实现异构网络间的数据交互, 通信系统必须具备多协议融合网关. 该类网关会直接影响通信平台的网络性能, 对其的研究和设计对于提升复杂异构网络的性能具有十分重要的意义.

TCP/IP 协议凭借其成熟性、通用性,使得通信网络的开发成本与开发风险大大减少^[2];FC 作为高速串行通信协议,可提供长距离、高带宽、低延时的信息传输,除此之外,FC 还可支持多种介质类型和连接器件,使得在同一接口标准之上运行多种网络协议成为可能^[3]. IP over FC 协议定义了 IPv4,IPv6 数据报文如何承载在光纤通道上,依据此协议实现 IP over FC 网关能够实现数据报在 FC 网络与以太网之间的透明传输^[4].

采用独立的计算机作为网关会严重影响网络拓扑的灵活性,并且增大网络的开发成本^[5]. 嵌入式网关采用嵌入式处理器运行操作系统以及通信协议栈,可实现协议间的高速转换. 这种解决方案不仅便于网络布线,同时还提高了网络可靠性,降低了系统开发成本.

2 网关体系结构

2.1 硬件体系结构

IP over FC 嵌入式网关工作在网络的数据链路层及网络层,为接入该网络的节点提供独立的通信端口. 设计基于 FPGA (ZYNQ-7020)实现,其逻辑单元、片内存储单元可满足交换单元协议处理以及数据帧缓存的需求,GTX 收发器提供 FC 和千兆以太网的物理层链路接口,同时,作为 SOC(System-on-a-Chip),交换结构所需复杂的运算工作可由处理系统(PS)承担. 板卡提供 4 路对外数据端口,包括 2 路 4G FC 端口,2 路千兆以太网端口,网关板卡硬件体系结构如图 1 所示.

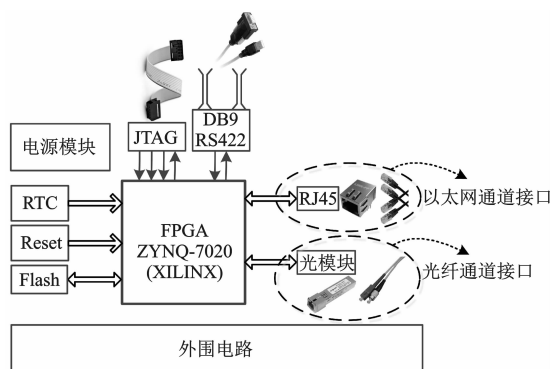


图 1 网关硬件体系结构示意图

2.2 软件体系结构

网关的软件采用模块化设计. 根据所要实现的功能以及为关联模块所提供的服务划分模块,确定接口. 功能模块经仿真、集成测试无误后,烧写至 FPGA,移植嵌入式操作系统内核至板卡,调试实现

网关的所有预期功能^[6].

以太网侧通过标准 GMII 接口与 PHY 芯片相连,网络协议栈开发语言采用 VHDL 以及 C 语言,以此来建立以太网通信节点;同样地,FC 侧采用 VHDL 及 C 语言实现 FC 协议栈,通过光电转换模块,实现 FC 通信. 网关的 FPGA 逻辑设计包含 3 个时钟域:单端 100 MHz 的 FC 时钟、单端 156.25 MHz 的以太网侧时钟以及 200 M 的 PHY 参考时钟,复位设计采用异步复位同步释放的方式,将全局复位信号同步至各时钟域,产生该时钟域的异步复位信号. 网关软件设计主要包括 IP 核参数配置,链路状态反馈等.

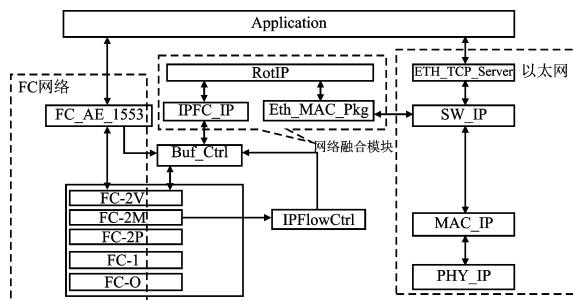


图 2 网关协议栈模型

2.2.1 网关协议栈模型概述

图 2 为融合网关协议栈模型,网络融合模块作为 FC 与以太网的互连部件,运行在网络的数据链路层及网络层,实现数据帧格式的转换及数据报文的寻址路由^[7]. 图 2 中各分立模块所能具备的功能及模块间互联接口如下所述:

PHY_IP 模块主要实现以太网物理层的功能;

MAC_IP 模块主要实现以太网数据链路层的功能,通过 GMII 接口与模块 PHY_IP 实现互连;

SW_IP 模块主要实现二层交换机的功能,转发局域网内部的 MAC 数据帧;

Eth_TCP_Server 模块主要实现 TCP/IP 协议栈(支持 TCP 服务器协议、UDP 协议、ARP 协议、PING 协议等)以及支持 DMA(Direct Memory Access)功能;

Eth_MAC_Pkg 模块为以太网 MAC 帧组帧、解帧模块. 其功能包括:对来自 SW_IP/Eth_TCP_Server 方向的 MAC 帧根据以太网协议进行过滤及解析;对来自 RotIP/IPFC_IP 方向的数据报进行组帧;

RotIP 为路由模块,实现跨网段 IP 数据包的路由转发以及局域网内的 ARP 功能. 具体而言,该模块应答来自 Eth_MAC_Pkg/ IPFC_IP 方向的 ARP

请求数据报、依据 ARP 数据报文更新 ARP 缓存表以及对 IP 数据报进行路由寻址及转发;

IPFC_IP 为协议转换模块,主要实现如下功能:对来自 Buf_Ctrl 方向的 FC-FS 帧进行解析和过滤,对来自 RotIP/ Eth_MAC_Pkg 方向的数据报文进行解析和封装。除此之外,模块还需进行跨时钟域处理以及需要具备在本局域网内的 FC_ ARP 功能;

BUF_Ctrl 模块实现数据帧的流控。具体而言,模块接收并缓存来自 FC_2V 的数据帧,待该数据帧发送至 IPFC_IP 后向 FC_2V 侧发送 ACK 帧进行响应;模块接收来自 IPFC_IP 的数据帧,根据当前信用值、背压信号和 IP 传输使能信号共同来决定是否向 FC_2V 发送数据;

IPFlowCtrl 模块为 IP 业务传输控制模块,以消息轮询时间(1 ms)为周期实现对 IP 业务传输的禁止和允许控制。该模块旨在解决如下问题:在 FC 网络中,IP 数据包与 FC-AE-1553 为并列在 FC 底层上的协议,由于 FC-AE-1553 的消息具有较强的时效性,要求 IP 数据包的运行不影响现有的 FC-AE-1553 协议的运行,设计选用轮询的方式实现对 IP 传输业务的控制,最大限度地保证了 FC-AE-1553 消息的实时性。

2.2.2 协议转换相关 IP 核设计

依据数据流向,IP over FC 网关对数据的处理包括两个流程,其一封装以太网侧的 IPv4 数据报为 FC-FS 帧;其二解析 FC-2V 侧的 FC-FS 帧为 IPv4 数据报。

网关同时维护两张查找表:以太网查找表与 FC 查找表。以太网查找表表项内容:网关所连接的以太网节点 IP 地址与 MAC 地址的对应关系^[8];FC 查找表表项内容:网关所连接的 FC 节点 IP 地址与 Port_ID 之间的对应关系^[9]。在数据转发过程中,网关基于目的 IP 地址,检索相应查找表,获取对应的目的 MAC 或 Port_ID,从而实现数据报的精确路由。图 3 简单描述了异构网络间 IP 数据报文的处理流程。

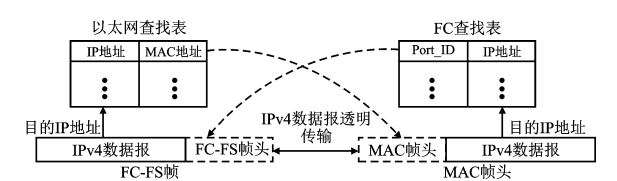


图 3 异构网络间 IP 数据报文简要处理示意图

(1)以太网侧数据报文处理流程

网关解析来自以太网侧的数据报文,区分数据报文的种类:IPv4 数据报、ARP 请求数据报、ARP 应答数据报。

对于 IPv4 数据报,网关缓存 IP 首部用于解析目的 IP 字段。依据该目的 IP 检索 FC 查找表,获取网关默认转发端口的 Port_ID。若此表项不存在,网关节点需要向 FC 侧做出请求,待应答后对表项做出更新,一旦请求不能及时得到反馈,则丢弃该 IPv4 数据报,后续转发工作由上层重传机制来确定;若 FC 查找表中存在所需表项,获取对应 Port_ID,完成数据报的封装与转发。

对于 ARP 请求数据报,依据以太网侧网掩码判断目的 IP 是否归属本网段,若是,意味着该请求数据报会由子网相应节点完成应答,网关丢弃该数据报。同时,网关解析该数据报文,获取源 IP 与对应 MAC 地址信息,添加表项,实现以太网查找表的更新;若不是,网关丢弃该请求数据报。

对于 ARP 应答数据报,依据以太网侧网掩码判断目的 IP 是否归属本网段,进一步地,考察目的节点是否为以太网侧默认网关 IP,若是,意味着应答数据报应由网关来完成解析。网关解析该应答数据报,获取源 IP 与对应 MAC 地址信息,更新查找表;若不是,原则上网关同样可以对应答数据报进行解析,但这会增加处理风险,建议对该类数据报做丢弃操作。

图 4 为以太网侧数据报文的处理流程图。

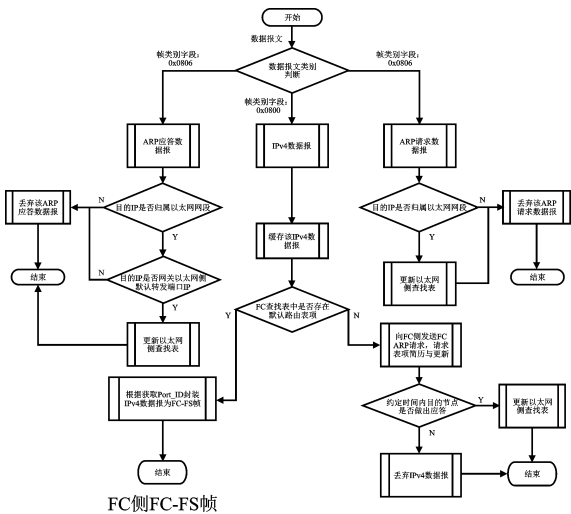


图 4 网关对以太网侧数据报文的处理流程图

(2) FC 侧 FC-FS 帧处理流程

网关解析来自 FC 侧的数据报文,区分数据报

文的种类: IPv4 数据报、FC ARP 请求数据报、FC ARP 应答数据报。

对于 IPv4 over FC-FS 帧, 网关缓存 FC-FS 帧首部字段, 解析目的 Port_ID 以及帧类型. 对于转发至网关的数据帧而言, 只有目的 IP 归属以太网子网, 才有检索以太网查找表的必要. 在上述条件下, 倘若查找表中不存在相应的表项, 网关需要缓存该 IPv4 数据报文, 同时, 向以太网侧发送 ARP 请求, 待获得应答后转发缓存的 IPv4 数据报, 同时, 更新查找表表项. 如果目的 IP 不归属以太网子网, 网关丢弃该 IPv4 数据报.

对于 FC ARP 请求数据报, 网关获取目的 IP, 判断目的 IP 是否归属 FC 子网网段. 若是, 意味着该请求数据报会由子网相应节点完成应答, 网关丢弃该数据报. 同时, 网关解析该数据报文, 获取源 IP 与对应 Port_ID 地址信息, 添加表项, 实现 FC 查找表的更新; 若不是, 网关丢弃该请求数据报.

对于 FC ARP 应答数据报, 依据 FC 子网掩码判断目的 IP 是否归属本网段, 进一步地, 考察目的节点是否为 FC 侧默认网关 IP, 若是, 意味着应答数据报应由网关来完成解析. 网关解析该应答数据报, 获取源 IP 与对应 Port_ID 地址信息, 更新查找表; 若不是, 原则上网关同样可以对应答数据报进行解析, 但这会增加处理风险, 建议对该类数据报做丢弃操作.

图 5 为 FC 侧 FC-FS 帧的处理流程图.

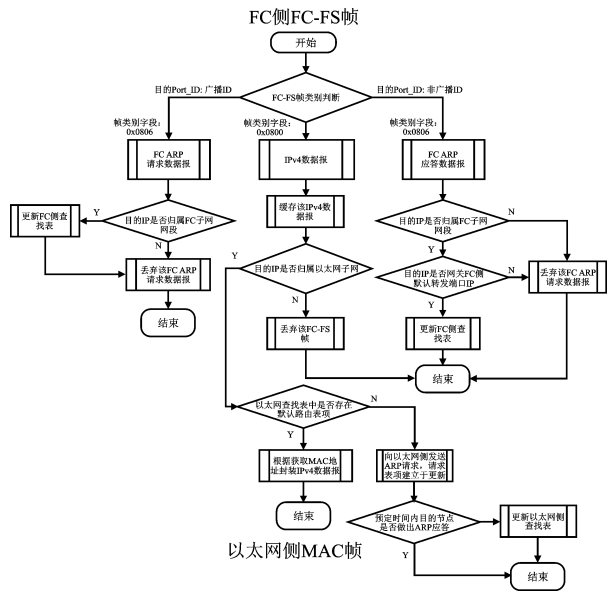


图 5 网关对 FC 侧 FC-FS 帧的处理流程图

3 仿真结果分析

设计采用 Modelsim 对数据流的处理进行功能与时序仿真, 具体仿真结果如下所述.

实验给出的时序图表明 FC-FS 帧的处理流程. 状态机在不同的状态下执行特定的功能: 状态 FC2V_Data_in 判断 FC 帧类型, LookFor_Eth_LUT 检索以太网查找表以及 MAC_frame_pack 完成 MAC 帧的封装与的转发. 同时, 网关对 FC 侧 ARP 数据报也做了相应的处理, 包括对 ARP 请求做出应答, 以及根据应答数据报更新 FC 查找表. 在真正意义上实现了通用 IP over FC 网关.

MAC 帧的处理流程表明, 状态 RotIP_Data_in 解析 MAC 帧, 区分帧类型, LookFor_FC_LUT 检索 FC 查找表以及状态 FC_frame_pack 完成 FC-FS 帧的封装及转发. 网关对以太网侧 ARP 数据报做了如下处理: 状态 Eth_arp_pkg 解析 ARP 请求数据报, Eth_arp_reply 对当前请求做出应答. 除此之外, 在状态 Pkg_discard 下, 设计对不满足标准帧格式的数据帧执行丢弃处理, 极大提高了网关的容错能力.

查找表采用双口 RAM 实现, 通过数据注入以及解析 ARP 应答实现表项的添加、更新与删除. 设计通过计算与 IP 地址相对应的 CRC 的值来获取检索 RAM 所需的地址, 最大限度地保证了 Port_ID 的唯一性. 为了保证检索数据的有效性, 设计对表项的更新以及检索通过信号 Valid 来标识. 如图 10 所示, 状态 CRC_WR 表示通过数据注入增添表项, CRC_WDID 表示通过解析 ARP 应答更新表项以及状态 CRC_RD 表示依据 IP 地址检索对应节点的 Port_ID.

4 系统验证及测试

4.1 测试模式

系统上电完成后, 操作系统软件配置网关对外端口, 采用分析仪监测当前连接状态. 同时, FC 及以太网逻辑 IP 核及时上报当前连接状态, 打印端口连接信息. 在保证各外部端口之间交换链路有效的前提下, 测试当前网络数据转发的各项指标.

(1) 以太网功能测试: 两台测试用 PC 机分别与网关对外以太网端口相连, PC 机装有以太网抓包软件 Wireshark, 用于查看发送以及接收的数据包格式.

(2) FC 功能测试: 两台测试用 PC 机分别与网

关对外 FC 端口相连,将 FC 测试仪串入 FC 链路用以抓取和分析 FC 数据帧。

(3)FC 与千兆以太网融合测试:网关作为两类节点的桥接设备,进行节点间数据的转发及路由。测试内容包括链路有效性以及协议转换性能。

(4)其它测试模式:根据应用场景搭建特定的网络拓扑,开展相应的功能与性能测试。

4.2 测试结果分析

4.2.1 功能指标

(1)实现网络连通,能够接收并响应上位机的 ping 请求。网关对网络拓扑的动态变化具有较强的适应能力,通过运行 ARP 协议实现查找表的动态刷新。网关具备大数据量的传输能力,同时具备较强的容错性,可通过上位机对错误数据报进行监测与上报。

(2)实现协议转换;各 IP 核工作正常,数据发送和接收完全符合预先规定的通信协议。

(3)采用流量控制实现高传输效率;FC 能够感知 TCP/UDP 的传输状况和传输能力,相应调整 FC 的传输速率,保证传输效率最大化。

4.2.2 性能指标

(1)高吞吐量(Throughput):网络融合模块双向协议处理带宽典型值 30 MB/s;千兆以太网交换链路正确有效,交换带宽 ≥ 800 Mb/s。

(2)低时延(Latency):网关的时延主要包括处理时延和排队时延。网关协议转换最小时延为 25 μ s, ping 典型值 < 1 ms。

(3)低丢包率(Packet loss rate):在不同负荷下,网关丢包率数量级为 1%。

(4)较短的系统恢复时间与系统复位时间:网关在上电复位或过载条件下,恢复到正常工作所需时间数量级为 ms 级。

5 结束语

本文基于 FC 和以太网共有的交换式网络模型,设计并实现了一种同时支持两种网络的兼容式网络设备。详细阐述了 IP over FC 网关的硬件实现和软件设计。该嵌入式网关基于 FPGA 开发平台,采用模块化设计思想开发网络协议栈,能够极大地

减少开发成本,缩短开发周期。在此基础上,文章对各 IP 核功能进行了仿真及测试,同时搭建了 IP over FC 网关测试平台,对网关功能及性能做全面验证、测试与优化,测试结果表明融合网关各项功能均正确有效,测试性能均达到设计目标。

参考文献:

- [1] 王海涛,宋丽华,陈晖等. 异构网络融合及实现技术方案探讨[J]. 数据通信, 2014(2): 4-7.
- [2] Ahmed A, Michele L, Cesare R. TCP Wave: a new reliable transport approach for Future Internet [J]. Computer Networks, 2017, 112: 122-143.
- [3] 李攀,田泽,蔡叶芳等. FC-AE-ASM 协议优化设计[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(2): 280-284.
- [4] 曹卓. 基于 ARM9 的嵌入式网关的设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [5] 郭基伟. 基于多异构协议的嵌入式网关设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [6] 张晓飞. FPGA 技术入门与典型项目开发实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [7] 陈嵘. 路由器以太网协议的实现[J]. 计算机工程与应用, 2001 (18): 77-79.
- [8] WANG S. Ethernet Address Resolution in the Context of Dynamic IP Address Changes[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS 2016). IEEE Computer Society, 2016: 306-309.
- [9] 李鸿健,朱国锋,朱马锋. 基于地址映射的分段式地址分配算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(6): 1877-1881.

作者简介:

李 龙 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为异构网络融合技术、IP over FC 技术、空间电子学等。

E-mail: lilong15@csu. ac. cn.

曹素芝 女, (1982-), 副研究员, 硕士生导师. 研究方向为空间信息网络技术, 在轨光纤网络技术, 空间光交换与路由技术, 天基边缘计算。

席 隆 男, (1972-), 研究员, 硕士生导师. 研究方向为空间电子学。