

光纤通道端口状态机设计

吴楚雄, 施海锋, 岳俊峰

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 在光纤通道(FC)协议环境中, FC端口(FC_Port)是基本的通信单元, 只有端口处于激活状态时, 链路才能进行FC数据帧的收发。在对FC_Port状态转换原理进行分析的基础上, 参照FC-FS-4协议, 提出了一种基于FPGA的FC_Port状态机设计方法。实验表明: 该设计满足协议的规定, 具有链路错误检测和端口流量管理的功能, 能够对FC端口在数据传输中遇到的链路故障进行恢复。

关键词: 光纤通道; 端口状态机; 原语序列; FPGA

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)02-0038-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of port state machine for fiber channel

WU Chuxiong, SHI Haifeng, YUE Junfeng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: In a fiber channel (FC) protocol environment, the FC port (FC_Port) is the basic communication unit, for that the link can send and receive FC data frames only when the port is in the active state. Based on the analysis of the FC_Port state transition principle and referred to FC-FS-4 protocol, a design method of FC_Port state machine based on FPGA is proposed. Experiments show that the design meets the requirements of the protocol and has the functions of link error detection and port traffic management as well as recovering the link faults encountered by the FC port during data transmission.

Key words: fiber channel; port state machine; primitive sequence; FPGA

0 引言

随着计算机科学和数据通信技术的快速发展, 信息时代的数据量正在爆炸性增长, 这对高速数据传输技术提出了迫切需求。现代通信技术需要安全快速地对数据进行远距离存储和传输, 而光纤通道(FC)协议具有高带宽、低延时、扩展性好和可靠性高等特性, 因而广泛应用于高端存储领域, 并逐渐替代现代航空电子系统总线^[1]。本文基于美国国家标准学会(ANSI)制定的光纤通道协议 FC-FS-4, 主要研究 FC_Port 的状态机设计, 对 FC_Port 的内部逻辑转换以及流控机制进行说明。本方案采用 Xilinx 公司 Kintex Ultrascale 架构的 FPGA 芯片实现端口状态机功能。

收稿日期: 2018-10-15。

作者简介: 吴楚雄(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生。2015 年于北京航空航天大学电子信息工程学院获得工学学士学位, 现为南京电子技术研究所硕士研究生。研究方向为雷达控制与计算机技术、光纤通道协议。



1 FC_Port 系统总体设计

根据 FC 协议的开放系统互连(OSI)分层模型, FC 协议一共可以分为 5 层, 其中 FC-0 层、FC-1 层和 FC-2 层组成了物理和信号层, 而 FC-3 层和 FC-4 层组成上层协议。FC_Port 系统总体设计方案如图 1 所示。该系统由发送部分、接收部分以及控制部分组成, 并通过 GTH 高速收发器进行数据传输。发送部分包括发送缓存和发送模块, 发送缓存中存储需要发送的数据, 发送模块根据不同数据类型的需要将数据组成 FC 帧。接收部分包括接收缓存和接收模块, 接收模块将接收到的帧进行解析, 并将得到的数据放入接收缓存中。控制部分包括端口状态机和流量控制模块, 流量控制模块用于跟踪 N 端口之间、N 端口与交换网之间

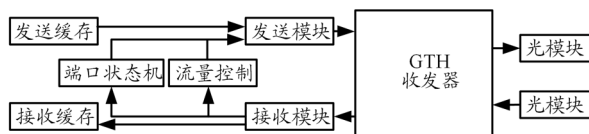


图 1 FC 端口总体设计框图

帧的传输,端口状态机根据链路状况控制和指示端口状态^[2]。

FC_Port 状态机是 FC-2 层规定的功能,最多可由 3 个子状态机组成,即速率协商状态机、发射器训练状态机和正常运行状态机(即本文研究的端口状态机)。其中,速率协商状态机、发射器训练状态机是可选的,而正常运行状态机是必须的。速率协商状态机中的 FC_Port 通过循环切换其支持的速率,直到它确定链路支持的最高速率。发射器训练状态机中的 FC_Port 尝试与其相连的 FC_Port 协商进行前向纠错,并优化发送均衡器系数^[3]。

由于系统设计时,FC 传输速率通常是已知和固定的,因而可选的 2 个子状态机可不实现。本文端口状态机设计重点关注正常运行状态机的设计和实现,如图 2 所示。在正常运行状态下,FC_Port 已经完成了它可能支持的速率自适应以及传输器训练功能,从而能够进行 FC 帧的收发。

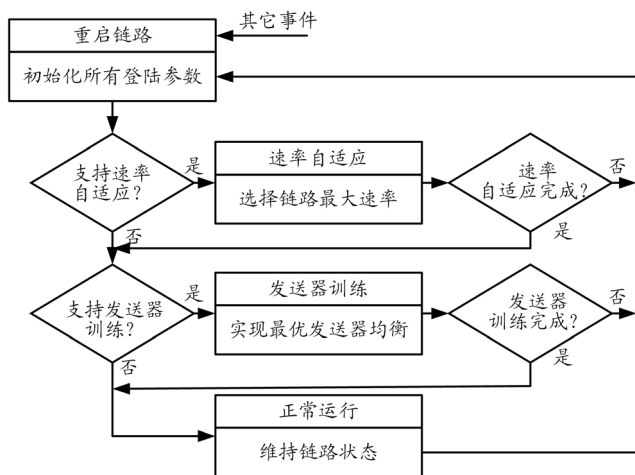


图 2 FC 端口子状态机转换图

2 端口状态机逻辑设计

FC-FS-4 协议定义了一系列原语序列来指示端口状态。原语序列是连续重复发送的有序集,FC 端口遇到了特殊情况,或端口接收机逻辑遇到特定的条件时,将发送原语序列。FC 原语序列包括 NOS、OLS、LR 和 LRR 共 4 种。

NOS 原语序列用来指示 FC_Port 检测到了链路故障或者离线的状况,等待接收 OLS 信号。

OLS 原语序列用来指示 FC_Port 正在初始化链路初始化协议、接收和识别 NOS 原语序列或进入离线状态。

LR 原语序列用来指示 FC_Port 在初始化链路重

启协议或者从链路超时状态恢复。

LRR 原语序列用来指示 FC_Port 正在接收和识别 LR 原语序列。

2.1 原语序列协议

原语序列协议提供 2 种基础功能。第一种功能是通知链路的其它端口发生了一个特定的连接错误。第二种功能是重置链路 2 端的端口,使其进入一个确定的状态^[4]。在正常运行状态下,端口的状态受到包括 4 个原语序列在内的协议的影响。

2.1.1 链路初始化协议

在以下事件发生后,链路初始化协议将被执行:开机或内部重置或已进入离线状态且希望回到上线状态。链路初始化协议在端口监测到上述事件从而进入 OL1(离线)状态后开始,在端口进入 AC(激活)状态后结束。

2.1.2 链路重置协议

监测到以下状况后链路重置协议将会被执行:连接超时或缓存到缓存越界(例如,一个 FC_Port 接收到一个缓存到缓存流控机制下的帧,而没有可用的缓存)。连接重置协议在端口监测到上述事件从而进入 LR1(链路恢复)状态后开始,在端口进入 AC 状态后结束。

2.1.3 链路故障协议

监测到以下状况后连接故障协议将会被执行:同步丢失时间超过 R_T_TOV 或在非离线状态下信号丢失或监测到链路重置协议超时。链路故障协议在端口监测到上述事件从而进入 LF2(链路故障)状态后开始,在端口进入 AC 状态后结束。

2.1.4 上线到离线协议

此协议是为关机而执行的,从而使 FC_Port 从 AC 状态进入离线状态。此协议能在信号丢失之前给 FC_Port 一个指示,这避免了为系统的正常操作记录错误。当 FC_Port 进入 OL1 状态时,上线到离线协议将开始执行。

在传输 OLS 原语序列特定时间后,FC_Port 将进入离线状态,并可能做以下事情:进行诊断过程、关闭发送器、关机和开始链路初始化协议。

2.2 端口状态

端口状态机的设计重点在于端口状态转移逻辑,表 1 和表 2 详细规定了端口状态及其转移方向。由表 1 可见,FC 端口状态机本质上是一个包含 9 个状态的 Moore 型状态机,状态机的输出与当前状态有关而与输入无关^[5]。

表 1 FC 端口状态输出表

状态名称		当前输出状态
激活	AC	Fill Word
链路恢复	LR1	LR
	LR2	LRR
	LR3	Idle
链路故障	LF1	OLS
	LF2	NOS
离线	OL1	OLS
	OL2	LR
	OL3	NOS

表 2 FC 端口状态转换表

输入的事件	下一状态输出								
	激活	链路恢复			链路故障		离线		
	AC	LR1	LR2	LR3	LF1	LF2	OL1	OL2	OL3
LR	LR2	LR2	LR2	LR2	LR2	LR2	LR2	LR2	LF2
LRR	LR3	LR3	LR3	LR3	LF1	LF2	OL1	LR3	LE2
Idles	AC	LR1	AC	AC	LF1	LF2	OL1	OL2	OL3
OLS	OL2	OL2	OL2	OL2	OL2	OL2	OL2	OL2	OL2
NOS	LF1	LF1	LF1	LF1	LF1	LF1	LF1	LF1	LF1
Loss-of-Signal	LF2	LF2	LF2	LF2	LF2	LF2	OL3	OL3	OL3
Loss of Sync> (R_T_TOV)	LF2	LF2	LF2	LF2	LF2	LF2	OL3	OL3	OL3
Eventtime_out (R_T_TOV)	N/A	LF2	LF2	LF2	LF2	N/A	OL3	OL3	N/A
Link_time_out (E_D_TOV)	LR1	LR1	LR1	LR1	LR1	LR1	LR1	LR1	LR1

下面具体分析 9 个状态的特点和要求。

2.2.1 激活状态(AC)

FC_Port 在完成链路初始化协议或链路复位协议时应进入激活状态。进入激活状态,FC_Port 必须先发送至少 6 个 Idle 原语信号,在此之后,才可以发送其它原语信号和 FC 帧。

原语信号是标准指定的有特殊意义的有序集,所有的 FC_Port 都必须能识别 R_RDY 和 Idle 原语信号,未被识别的原语信号将被视为 Fill、Word。当 FC_Port 处于激活状态时,它能够发送、接收帧和原语信号。当接收到原语序列时,激活状态应转换到其它状态,以执行原语序列协议。如果接收到帧或原语信号,FC_Port 应保持激活状态。

2.2.2 链路恢复(LR)

◆LR 传输状态(LR1)。FC_Port 进入 LR1 状态从而初始化链路重置协议。当在 LR1 状态时,FC_PORT 将传输 LR 原语序列。同时,FC_Port 端口中 BB_CREDIT_CNT 的值将被设置为 0,此端口应处理或丢弃当前保存在接收缓存区的任何第二类和第三类帧。第二类服务 EE_CREDIT 将不会受到影响。

◆LR 接收状态(LR2)。FC_Port 不在 OL3 或者 LF2 状态的情况下,接收并识别到 LR 原语序列后应进入 LR2 状态。当在 LR2 状态时,FC_Port 应传输 LRR 原语序列。FC_Port 收到和识别链路重置原语序列后,应该处理或丢弃当前存储在接收缓存区内的帧。此时,BB_CREDIT_CNT 需被设置为 0。

◆LRR 接收状态(LR3)。FC_Port 在 AC、LR1、LR2 或 OL2 状态下,在接收和识别 LRR 原语序列后应进入 LR3 状态。当在 LR3 状态下时,FC_Port 应传输 Idle 原语。

2.2.3 链路故障

端口一旦进入链路故障状态,FC_Port 将会更新链路错误状态模块(Link Error Status Block)中的错误计数器,每次链路故障事件被记录一次错误。

◆NOS 接收状态(LF1)。FC_Port 在接收和识别出 NOS 原语序列时应进入 LF1 状态,在 LF1 状态下,FC_Port 应传输 OLS 原语序列。

◆NOS 传输状态(LF2)。FC_Port 在链路故障状况被监测到时进入 LF2 状态,在 LF2 状态下,FC_Port 应传输 NOS 原语序列。当导致链路故障的原因仍存在时,FC_Port 将会保持在 LF2 状态。当链路故障情况不再被监测到时,FC_Port 将由表 2 定义的那样对接收到的原语序列做出响应。

2.2.4 离线模式

当离线时,FC_Port 不会记录接收器的错误(例如同步丢失等)。监测到 NOS 或链路故障状态也不会作为链路故障事件被链路错误状态模块记录。

◆OLS 传输状态(OL1)。FC_Port 可能由于以下 2 个原因进入 OL1 状态:为了离开离线状态而运行链路初始化协议以及使用上线-离线协议由上线状态变为离线状态。当 FC_Port 进入 OL1 状态时,它将传输 OLS 原语至少 5ms 而不管任何接收到的数据。在这段时间以后,FC_Port 将根据表 2 的定义进行响应。当 FC_Port 尝试上线的时候,如果在 R_R_TOV 以后没有检测到导致 FC_Port 离开 OL1 状态的原语序列或者事件,FC_Port 将进入 OL3 状态。

◆OLS 接收状态(OL2)。FC_Port 一旦接收和识别到 OLS 原语序列将进入 OL2 状态。当接收到原语序列时,FC_Port 将按表 1 的定义进行响应。监测到信号丢失和同步丢失时,将不会作为链路故障事件记录在链

路错误状态模块中。

◆等待 OLS 状态(OL3)。在链路初始化协议中,当 FC_Port 处于 OLS 接收或发送状态中,在监测到信号丢失和同步丢失一段时间(R_T_TOV)后会进入 OL3 状态。一旦进入到 OL3 状态,FC_Port 应传输 NOS 原语序列。当接收到原语序列的时候,FC_Port 将按表 2 的定义进行响应。

根据表 1、表 2 以及 FC-FS-4 协议中对端口状态机功能的定义,可以设计出如图 3 所示的端口状态机模块。输入信号是 FC 原语序列和原语信号,用来指示链路的状况以及相连端口的状态。输出信号一部分由状态机各状态的输出指示信号组成,另一部分与链路错误状态模块、计时模块和流量控制模块相连,从而使端口状态机具备错误记录 and 流量控制的功能。

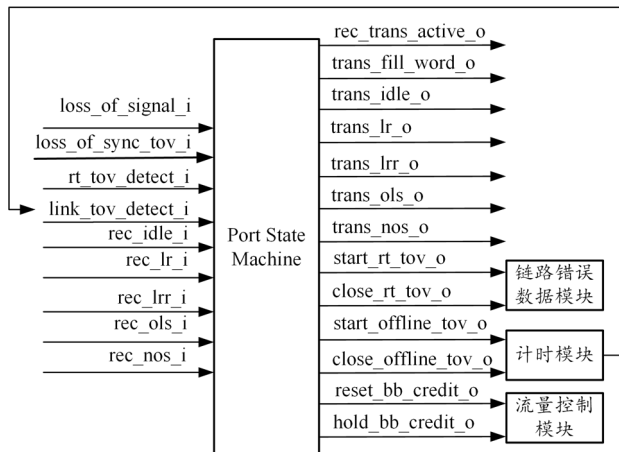


图 3 FC_Port 端口状态机模块框图

输入信号 loss_of_signal_i、loss_of_sync_tov_i 和 rt_tov_detect_i 信号分别表示链路发生信号丢失、同步丢失和事件超时的情况。link_tov_detect_i 信号由计时模块产生,用于表示链路已经在某状态下工作特定时间。rec_idle_i、rec_lr_i、rec_lrr_i、rec_ols_i 和 rec_nos_i 信号分别表示端口接收到 Idle、LR、LRR、OLS 和 NOS 原语,进而根据 FC 端口状态转换表进行状态转换。输出信号中,rec_trans_active_o 为 1 时表示端口处于激活状态;trans_fill_word_o、trans_idle_o、trans_lr_o、trans_lrr_o、trans_ols_o 和 trans_nos_o 分别表示端口发送 Fill Word、Idle、LR、LRR、OLS 和 NOS 原语;start_rt_tov_o 和 close_rt_tov_o 用来控制链路错误数据模块,进行错误统计;start_offline_tov_o 和 close_offline_tov_o 用来控制计时模块,对模块特定状态进行计时,比如模块进入 OL1 状态时必须先发送 5ms 的 OLS 原语序列;reset_bb_credit_o 和 hold_bb_credit_o 控制流量控制模块,实现端口流控功能。

3 仿真与实验

基于 FC-FS-4 协议对 FC 端口状态机的规定,本文针对 Xilinx 公司 Kintex Ultrascale 架构的 XCKU115 芯片,在 Vivado 集成开发环境下,采用 Verilog 编程语言,实现 FC 端口状态机功能^[9]。仿真实验中,将 2 个 N 端口互连(将各自的输出端接到对方的输入端),对 FC 端口的链路初始化进行仿真。端口状态的编码采用独热码设计,输入信号 loss_of_signal、loss_of_sync_to 和 rt_tov_detect 均设为 0,表示链路没有出现信号丢失、同步丢失和事件超时的情况。2 个 N 端口分别接收 offline_tov_detect 脉冲信号,表示处于 OL1 状态的端口传输 OLS 原语已有 5ms,可以进行状态转换。实验结果表明:FC_Port 从 S_OFFLINE (800) 进入 S_OL1 (100) 状态;接收到 OLS 原语序列后进入 S_OL2 (200) 状态;接收到 LR 原语序列进入 S_LR2 (010) 状态;最后接收到 Idle 信号进入 S_AC (001) 状态。端口从离线到上线的状态转移过程与协议的规定一致。至此,FC 端口进入激活状态进行 FC 帧和信号的收发。

4 结束语

本文根据 ANSI 制定的 FC-FS-4 协议中对端口状态机的有关规定,提出了一种基于 FPGA 的光纤通道端口状态机的设计方法。实验与仿真结果表明:使用 FPGA 实现的端口状态机能够完成协议中规定的各项功能,能够根据链路连接情况正确实现状态的跳转,输出相应的原语序列和流量控制信号,在遇到错误或故障时能够进行链路恢复,有较强的可靠性。

参考文献:

- [1] 林强,熊华刚,张其善. 光纤通道综述[J]. 计算机应用研究,2006(2): 9-13.
- [2] 高润莲,周晴. 基于光纤通道数据收发系统的设计与实现[J]. 电子设计工程,2018,26(2):189-193.
- [3] INCITS Secretariat/ITL. Fiber Channel Framing and Signaling-4 (FC-FS-4): INCITS 488-2016 [S]. New York: American National Standards Institute, 2016.
- [4] 刘小刚,周东. 光纤通道端口状态机的研究及 FPGA 实现[J]. 通信技术,2011,44(7):1-3.
- [5] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学, 2013:166-210.
- [6] 李春来,顾军,王宁,等. 基于 GTH 规范的高速背板性能仿真与优化设计[J]. 舰船电子对抗,2018(2):106-111.