

关于 SpaceWire 总线接口可靠性的研究

路向宁^{1,2}, 韩诚山¹, 黄良¹, 李祥之¹, 赵庆磊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足航天器有效载荷间高速数据传输的发展需求, 提出了两种 SpaceWire 总线可靠性的改进方案; 在 SpaceWire 总线描述的基础上, 分析了字符的正确性校验和传输过程中的错误及检测恢复机制等提高可靠性的方法; 针对通信链路发生物理性故障的问题, 提出了两种基于硬件冗余机制的 SpaceWire 可靠性改进方案, 一种是在系统间建立两个相独立的协议装置, 另一种是使用多路输出选择器进行切换将数据传输给目的节点; 通过实验验证, 两种方案能够处理通信链路出现物理故障的问题。

关键词: SpaceWire; 可靠性; 硬件冗余

Study on Reliability of SpaceWire Interface

Lu Xiangning^{1,2}, Han Chengshan¹, Huang Liang¹, Li Xiangzhi¹, Zhao Qinglei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To meet the high speed data transmission between the spacecraft payloads for the future development of demand, proposes two programs to improve the reliability of SpaceWire. Based on describing SpaceWire, analyzed the validity check of the characters, error detection and recovery mechanism in the process of transmission to improve the reliability of SpaceWire. For the problem of physical failures occurring in the communication links, presented two programs to improve the reliability of SpaceWire based on hardware redundancy mechanism. One is establishment of two separate protocol devices between systems, another is to use demultiplexer for switching transmit data to the destination node.

Keywords: SpaceWire; reliability; hardware redundancy

0 引言

由于我国航空航天技术、电子技术、空间探测技术地飞速发展, 直接影响了空间的数据传输的方式。空间相机中, 各种新型传感器不断涌现使其分辨率越来越高, 也就意味着更多的数据需要更高的速率来传输。对于应用于空间任务中的数据通信总线来说具有较高的可靠性是其必不可少的条件。目前国内外常用的 MIL-STD-1553 标准中具有硬件冗余的概念, 这就为航空和军事应用提供了高可靠性的保障。但是 MIL-STD-1553 标准属于低速的数据传输总线, 在某些数据量较大的任务中受到了局限。

目前, 国内对于高速数据传输接口的容错研究侧重于解决在空间环境中高能粒子的影响下容易发生单粒子翻转 (SEU)、单粒子功能中断 (SEFI) 等, 对存储模块造成功能失效的问题, 在接口的 FIFOs 中容错设计, 状态机状态编码的容错设计以及寄存器的冗余设计。但是, 国内尚未提出在标准中设计硬件冗余, 许多其他总线应用中的冗余只是简单的复制接口, 在外部来控制接口的选择。SpaceWire 总线虽在国外许多重大空间任务得到使用, 但在国内的空间任务中尚未应用, 对其的研究处于起步阶段, 对其硬件冗余的设计也未见报道。因此, 本文在分析 SpaceWire 总线标准可靠性的基础上, 为解决链路

电缆或者连接器发生物理性的故障, 提出了两种用来提高 SpaceWire 总线可靠性的基于硬件冗余的设计方案。

1 SpaceWire 总线概述

SpaceWire 是欧空局 (ESA) 为应对复杂空间任务而提出的一种高速、点对点、全双工串行总线网络。用来连接高速传感器、海量固态存储器、处理器单元、下行遥测子系统等, 以提供一个完整的星载数据处理网络。欧洲航天局以 IEEE-1355 商业接口标准为基础, 结合 LVDS 技术提出了应用于航天领域的 SpaceWire 标准, 并对 IEEE-1355 标准中不适合航天应用的连接器和电缆等部分进行了修改。2003 年 1 月, ESA 发布 ECSS-E-50-12A, 此时 SpaceWire 已经被 ECSS 认可; 2008 年 7 月 ESA 发布了 SpaceWire 标准最新版本 ECSS-E-50-12C, 在这一版对网络层做出了修订。该标准分以下六个层次: 物理层, 信号层, 字符层, 交换层, 数据包层, 网络层等。

首先介绍 SpaceWire 总线标准中字符的定义, 以方便后文的介绍。在本标准中字符主要分为数据字符和控制字符。数据字符包括一位校验位、一位控制标志位和八位有效数字; 控制字符由一位校验位、一位控制标志位和两位控制编码组成。控制字符有 4 种, 分别为: FCT (Flow control token, 流控制字符), EOP (Normal end of packet, 数据包正常结束字符), EEP (Error end of packet, 数据包错误结束字符), ESC (Escape, 退出字符)。此外还有两个重要的控制编码: NULL, 它是由 ESC+FCT 组成; Time-code 时间编码, 它是由 ESC+数据字符组成。

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-03-26。

基金项目: 国家自然科学基金 (60506014)。

作者简介: 路向宁 (1989-), 女, 河北邯郸市人, 工学硕士, 主要从事空间相机主控系统方向的研究。

交换层主要负责在接口之间建立链接, 控制数据流, 保证 SpaceWire 接口在各种情况下按状态机设定的有序工作。如图 1, SpaceWire 按照该状态图控制接收端和发送端正常工作。设计中的主状态机就是按此状态图所示工作的。图中可以看到 SpaceWire 共有 6 个工作状态, 根据不同的触发条件在这 6 个工作状态中转换。

(1) 错误复位: 当系统复位、链接由于各种原因被中断或在链路初始化时出现错误之后, 状态机进入错误复位状态, 在本状态中状态机同时复位接收端和发送端。在复位信号结束 6.4 μ s 后, 状态机进入错误等待状态。

(2) 错误等待: 进入该状态后, 发送端仍处于复位, 接收端被使能。当接收端收到 NULL 字符, 那么在经过 12.8 μ s 延时之后状态机进入下一状态。

(3) 准备就绪: 此时发送端仍处于复位, 接收端使能, 在本状态等待主机的 [链接使能] 信号到来之后, 进入启动状态。

(4) 启动: 此时发送和接收端都被使能, 接口需要不断地通过收发 NULL 字符来维持链接的畅通。gotNULL 信号置位时, 进入连通状态。

(5) 连通: 本状态中除了可以收发 NULL 字符外还可以收发 FCT 字符。当接收端收到 FCT 字符后, gotFCT 信号置位, 状态机进入下一个状态。

(6) 运行: 进入本状态接口可以发送 Time-code、FCT、N-char (Normal-characters, 包括数据字符、EOP、EEP) 和 NULL 字符, 直到链接上出现错误, 回到复位状态为止。

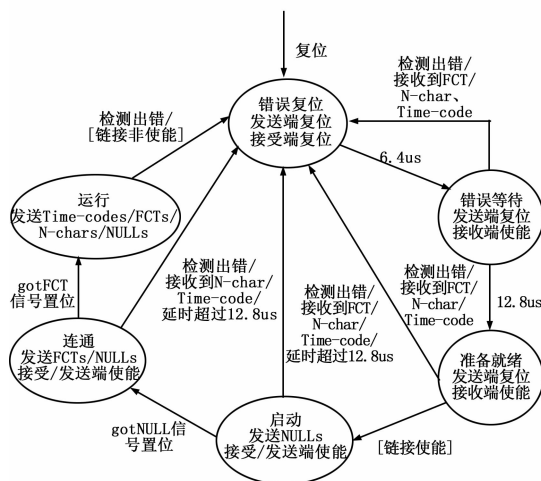


图 1 SpaceWire 状态图

2 SpaceWire 总线可靠性分析

可靠性的分析主要从字符的正确性的校验、字符在传输过程中所出现错误现象的总结, 以及检测恢复错误的方式等几个方面进行叙述。

2.1 字符的校验方式

首先 SpaceWire 总线和其他总线相同, 都采用了字符间的校验来增强其数据传输的可靠性。

以图 2 为例, 校验位包括的范围是前一个数据字符的后 8 位数据或者是控制字符的后两位数据、当前校验位和当前控制标志位。校验的方式采用奇数校验, 也就是说校验覆盖内有奇

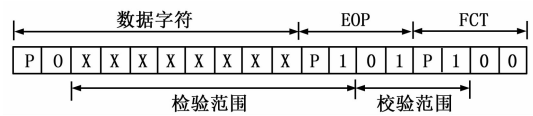


图 2 字符的校验方式

数个“1”, 当其校验不通过时将会重新发送。

2.2 传输中的错误及检测恢复机制

SpaceWire 总线针对传输过程中采用了相应的处理机制来提高其可靠性。交换层有以下 5 种错误: (1) Disconnect Error: 连接超时错误; (2) Parity Error: 奇偶校验错误; (3) Escape sequence Error: ESC 字符后跟非法字符时所检测到的错误; (4) Character sequence Error: 接收端收到非法字符时所检测到的错误; (5) Credit Error: 接收到的 N-char 数量与流控制协议不符时所检测到的错误。

以上 5 种错误在链接的初始化过程中出现时, 都将使状态机的状态恢复到复位状态, 重新建立链接。恢复方法是: 假设链接的一端 A 失效, 而此时链接的另一端 B 使能且处于启动状态, 会发送 NULLs 给 A 端, 由于 A 此时失效无法恢复 B 端, 所以 B 端在经过 12.8 μ s 仍未收到 NULLs 字符时也会跳到错误复位状态, 这时链接两端同时进行复位建立新的链接。如果错误产生于运行状态时, 将会发送给网络层, 在网络层进行恢复或者上报应用层。

网络层错误包括以下 3 种情况: (1) 链接错误: 由交换层检测出来并发送给网络层的错误。(2) 接收 EEP: 数据包以 EEP 结尾的会被提前终止传输, 如果在节点之间传输检测到该错误将会发送应用层; 如果在路由器之间传输, 它的处理方式与接收到以 EOP 字符结束的数据包是相同的。(3) 无效目的地址: 当含有无效目的地址的数据包到达路由器的输入端, 该数据包的内容将被丢弃, 直到该数据包结束为止。

如果检测到链接错误出现就会通过如图 3 的方式来恢复: 1) 检测到错误, 这些错误主要是来源于交换层中所产生的五种错误形式; 2) 使链接断开; 3) 如果当前传送的字符不是 EOP 则对接收端的缓存区加 EEP 字符, 这样链接断开时正在传输的数据包中已到达接收端的前半部分数据将会被删除; 4) 删除发送端缓存区下一个 EOP 字符之前的数据, 即未完成传输的数据包的后半部分数据; 5) 再次建立连接; 6) 发送下一个数据包。

3 SpaceWire 总线可靠性改进方案及验证结果

虽然协议中规定了在交换层和网络层中可能出现的错误及检测恢复错误的机制, 但是 SpaceWire 总线标准尚未提供一种冗余机制, 来确保其在空间任务中的万无一失。对于提高数据传输总线的可靠性所依靠的冗余机制, 基本可以包括硬件冗余, 信息冗余以及时间冗余。信息冗余就是在接口的 FIFOs 中采用特殊编码, 来解决在恶劣的空间环境中由于辐射造成某位信息反转, 导致传输信息出错等问题。时间冗余则是如总线协议中恢复错误的方式, 重复执行发生错误的某一过程直到连通, 以此来消除错误。这些冗余机制虽然在数据的传输中是必不可少的, 也提高了总线的可靠性, 然而假如链路发生物理性故障, 如电缆、接口损坏等, 还是需要添加硬件冗余机制来保障其正常工作。

该冗余机制可以通过以下两种方案得以实现: 一种方案是

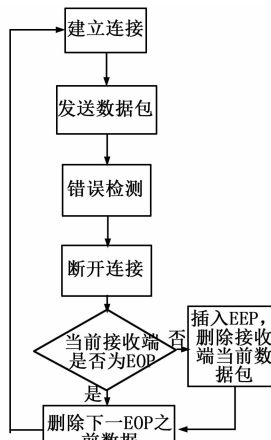


图 3 错误的检测及恢复过程

在系统之间建立两个相独立的协议装置，当其中一个协议装置连接失败时，需要根据网络层的协议通过虫孔式路由转换到备用协议装置上。另一种方案是建立一个协议装置，使用多路输出选择器连接到备用电缆上，将数据传输给目的节点。

3.1 基于路由器的冗余机制

首先介绍第一种冗余机制，该机制相当于将某节点进行备份，通过路由器的端口地址来选择数据的传输路径。当其中一个链路出现错误，经过多次尝试都无法恢复数据传输时，数据将会通过另一套协议装置进行传输，以保证该系统的正常运行(如图 4)。这之间就需要路由器来完成协议装置转换的工作，SpaceWire 路由器采用了虫孔路由形式，削减了在每个路由器内使用的缓冲器数量，降低了数据包传输的延时，增强了其实时性，接口接收完数据完成地址识别后，选择传输路径，完成协议装置的选择。该冗余机制装置原理简单，便于设计实现。

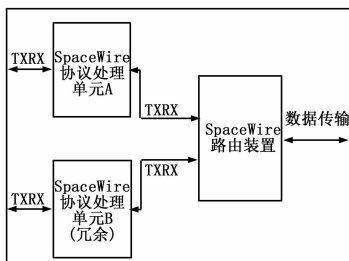


图 4 基于路由器硬件冗余原理框图

3.2 基于多路选择开关的冗余机制

第二种冗余机制的实现只需一个协议装置，因此不需要复制接口。首先，它的逻辑结构比较简单，节约设计成本；其次，它避免了用户对转换协议装置中算法创建的负担。这个方案的设计原理是以 SpaceWire 的状态框图(图 1)为基础的，SpaceWire 的状态框图决定了何时转换到备用接口。这个设计方案的优点在于，冗余接口是由源于协议逻辑的多路输出选择器简单构成的(如图 5)。SpaceWire 的状态图是设计中的核心，而这个应用方法就是利用多路输出选择器在两个端口之间进行转换。根据 SpaceWire 状态机试图将链接连通的次数来决定是否转换通道，通过链接连通，状态机会进入 Run 状态。试图连通的次数，也就是通过状态机试图连通失败的次数，连通失败将会出现从 ErrorReset 状态到回到 ErrorReset 状态中

的任何一种不能运行的状态序列。一个典型尝试失败的例子是：ErrorReset→ErrorWait→Ready→Started→ErrorReset 这样的状态序列。通过计数器统计状态机试图连通失败的次数，通过软件编程来实现传输通道的转换。

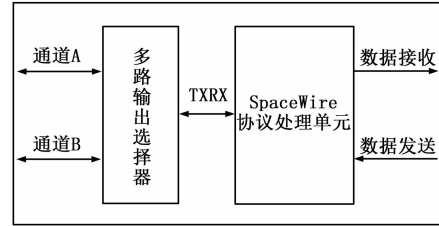


图 5 基于多路开关硬件冗余原理框图

以上两种方案的实验验证通过 TMS320C30 对 SpaceWire 总线接口的协议芯片 AT7911E 进行配置，搭建硬件连接电路，采用 C 语言与 TMS320C3X 汇编指令集混合编程。当硬件电路出现物理故障时，两种方案均能够及时启用备用通道，可以提高总线接口的可靠性。

4 结论

本文通过对 SpaceWire 总线标准中关于容错机制以及可靠性的分析，提出了两种建立 SpaceWire 总线硬件冗余机制的方案。前者利用总线的路由装置涉及到网络层协议，建立了冗余机制；后者则使用多路选择器来建立数据的冗余传输通道。前者原理简单，便于设计实现；后者逻辑结构简单，节约设计成本，同时避免了用户对转换协议装置中算法创建的负担。通过实验，证明了两种冗余机制的方案能够解决链接在出现物理故障时所遇到的问题。在今后的实验研究中可以通过进一步对两种方案的实现，根据实际需求和两者各自的特点，来提高空间数据高速传输总线 SpaceWire 在空间相机应用中的可靠性。

参考文献:

[1] ECSS. Space Engineering: SpaceWire— Links, nodes, routers and networks (ECSS— E— 50— 12A) [S]. The Netherlands: ESA Publications Division ESTEC, 2003.

[2] Glenn Parker Rakow, Ristopher Dailey, Locksley Haynes et al. SpaceWire Physical Level Redundancy Mechanism [A]. 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology 2006 [C], Pasadena: Computer Society, 2006: 344— 348.

[3] 钟雪燕, 姚 睿, 鲍小胜. 一种应用于 SpaceWire 路由器动态部分重构的容错技术 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (3): 703— 705.

[4] 陈苏鹏, 于立新, 飞海东, 等. 基于 FPGA 的 SpaceWire 接口容错设计与评估 [J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21 (3): 142— 144.

[5] 袁 鹏, 王友仁, 张 睿. 可重构电子系统芯片级在线自主容错方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (6): 2172— 2175.

[6] 程照强, 刘淑芬. SpaceWire CODEC 的容错设计和实现 [J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38 (3): 52— 57.

[7] 谢拴勤, 宋 捷, 宋怀达. 基于 FPGA+DSP 的 1553B 总线通用接口设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 183— 186.

[8] 郭晓松, 王振业, 于传强, 等. 基于 CAN 总线的容错冗余技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 60— 63.