

基于 SpaceWire 时间码备份路由器实现与分析

庄洪毅 伊小素 张昊

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘要: SpaceWire 是由欧空局提出的新一代总线技术,作为新一代总线技术 SpaceWire 在链路故障检测、故障恢复等方面得到了加强^[1]。同时为了解决链路拥堵和减少网络传输延时^[2],SpaceWire-D 提出了在网络中流通时间码、调度表的运作机制。航天领域对设备的可靠性有着严格要求,路由器作为网络中不可缺少的组成部分,路由器的可靠性影响着通信系统的可靠性^[3]。本方案在改写 Dundee 路由 IP 核后实现一个路由器的基础上提出单板双路由结构,利用 SpaceWire 标准时间码保留位其中的一位与路由器模式切换相结合,达到实现路由器的热备份功能的目的,从而提高 SpaceWire 路由器的可靠性。最后通过测试平台加以测试证明路由的模式切换功能可以正常工作,并通过分析对比说明本方案提出的备份方案提高了路由器的可靠性。

关键词: Dundee IP 核;路由器;可靠性;热备份;保留位;模式切换

中图分类号: V1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Implementation and analysis of backup router based on SpaceWire Time-Code

Zhuang Hongyi Yi Xiaosu Zhang Hao

(School of Instrument Science and Wopto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: SpaceWire is a new bussing technique provided by European Space Agency. As the new bussing technique, SpaceWire enhances the functions of error detection and error recover^[1]. In order to solve the problem of blocking in the net and reduce the SpaceWire delay^[2],SpaceWire-D performs the time-code flowing in the net and schedule table. Aerospace has high requirements for the reliability of devices. Router is the indispensable component in the net, the reliability of the router affects the reliability of the net^[3]. This text based on accomplishment of the SpaceWire router by modifying Dundee router IP Core applies the structure that one board with two routers, it uses the corporation between one of the reserved bits of time-code in SpaceWire and mode-shift of the SpaceWire router to realize the hot backup function and enhance the reliability of the SpaceWire router. Finally, by using testbench to prove the function of mode-shift, it can work properly, analysis and comparison prove that this scheme can enhance the reliability of the router.

Keywords: Dundee IP Core; router; reliability; hot backup; reserved bit; mode-shift

1 引言

作为欧空局提出的新一代总线技术标准 SpaceWire 具有实时性、高速、高可靠性等优点,并且在实时通信系统中广泛应用^[4]。在 SpaceWire 网络中,节点与节点可以直接相连,节点也可以通过路由器与其他节点设备相连^[5]。在实用通信系统中,路由器是不可缺少的组成部分,但由此也极易引发通讯链路拥堵的问题。针对这一问题,SpaceWire-D 提出的在链路中流通时间码、调度表为各个节点设备分配时间槽的这一运作机制,减少了 SpaceWire 网络的延时抖动^[6]。

现在对 SpaceWire 总线以及网络中各个组件的研究研制工作已经取得了一定的进展:SpaceWire 总线 EMC 设计分析^[7]、基于 IP 核的 SpaceWire-PCI 通信卡设计^[8]。

但是现阶段对于提高 SpaceWire 路由器可靠性方面的研究稍显不足,而且 SpaceWire 标准仍然有待补充和扩展,已有的《一种 SpaceWire 网络备份方式及相应时间码使用方式》完全占用了 SpaceWire 时间码保留位,会对以后标准的扩充与系统的扩展造成阻碍。

本文目的为提高路由器的可靠性,只占用时间码保留位中的一位同时与路由器工作模式切换相结合,实现路由器的备份功能,然后通过测试平台测试,说明路由器的模式

切换功能已经实现,并经过分析与比对说明本方案提高了路由器的可靠性。

2 SpaceWire 网络以及时间码与时间槽

2.1 时间码与时间槽

- 1)时间槽是由 SpaceWire 时间码决定的;
- 2)设备接收到时间码那一刻就是时间槽的起点;
- 3)时间槽的数值与之前接收到的时间码的数值相同;
- 4)一个时间槽的结束是由下一个时间码到达的那一刻界定的;
- 5)SpaceWire 调度表规定了每台设备都有自己的时间槽^[9],每台设备在规定的时间内可以发送数据。

时间码与时间槽的关系如图 1 所示^[10]:

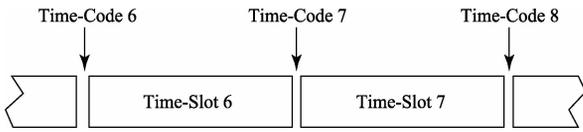


图 1 时间码与时间槽的关系

星载计算机向网络中发送时间码,SpaceWire 路由器收到有效时间码后,更新内部的时间码计数器,并将刚收到的时间码发送出去。设备接收到由 SpaceWire 路由器发送过来的时间码,该时间码意味着一个时间槽的开始。如果 SpaceWire 调度表分配给某一个设备时间槽,且这个时间槽的数值与现在的时间槽的数值相同,那么这个设备可以发送数据。

2.2 路由器结构及各模块功能

用 SpaceWire IP 核制作的路由器如图 2 所示:

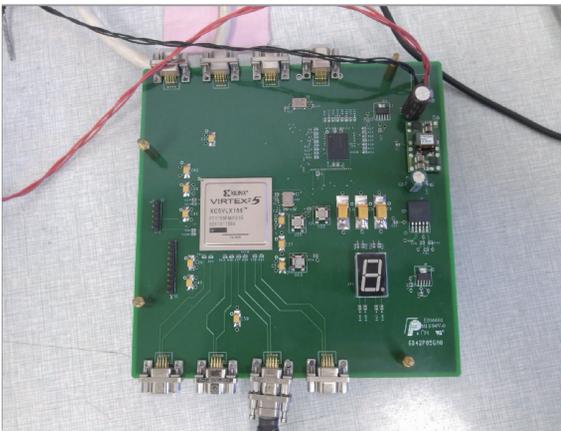


图 2 SpaceWire 路由器

1)SpaceWire 接口:在 SpaceWire 网络中用于连接节点、传输数据。

2)配置接口:命令包的地址是 0 时,命令包将被发到配置端口,命令包将对路由器内部寄存器进行读写(如:命令包对时间码使能寄存器进行读写)。

3)路由表:命令包的一种,用于定义逻辑地址向物理地

址端口的映射,删除包头地址寻址方式也由路由表决定。

4)错误状态寄存器:使用 RMAP 协议,命令包被路由器接收后,可用于读取该寄存器。

2.3 网络中各个设备的状态寄存器

状态寄存器:使用 RMAP 协议^[11]并通过配置接口可以读取路由器的状态寄存器。

链路被相关的链路寄存器以及路由控制逻辑模块所控制。链路状态被链路状态寄存器记录,状态寄存器可被读取。例如与端口 1 相连的链路断开,这个信息将被路由器内部寄存器记录,星载计算机读取路由器内部寄存器得知这一情况。

链路中的路由器以及节点设备都有自己的状态寄存器。

3 单板双路由备份系统结构

提高 SpaceWire 路由器的可靠性,备份是有效的方法。同时应注意串行传输线在工作时存在的电磁泄漏问题^[12]以及电磁兼容技术重要的一环:接地技术^[13]。

本方案在实现路由器备份功能的同时,只占用时间码保留位中的一位,从而在提高 SpaceWire 路由器可靠性的基础上,为标准的扩充与系统后续的扩展留下充足的余地。

单板双路由备份系统结构如图 3 所示:

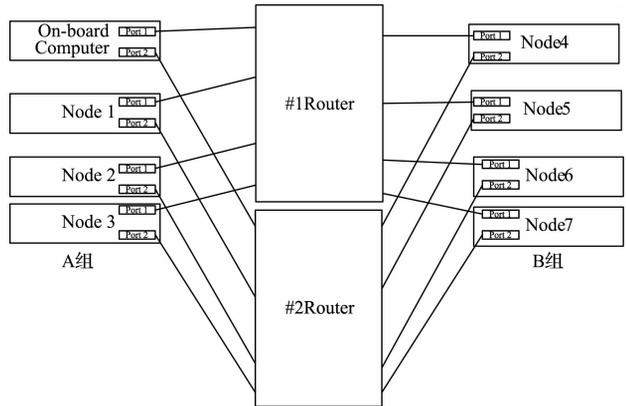


图 3 单板双路由备份系统结构

每台设备有两个端口,接口 1 和接口 2,用以连接备份路由器。

3.1 本备份系统中时间码使能寄存器的设计

时间码使能寄存器决定了 SpaceWire 路由器的工作模式,结构如图 4 所示:

31	30	1	0
----	----	---	---

图 4 时间码使能寄存器

1~30 位:时间码传输使能,在相应的数位设置为‘1’时,则该 SpaceWire 端口可以发送时间码。例如,该寄存器第 2 个数位设置为‘1’,则时间码可以从 SpaceWire 路由器的 2 号端口发出。

31位:Time-code Flag mode,这一位是‘0’时,路由器处于“模式0”,路由将T6是‘1’的时间码视为有效;当这一位是‘1’时,路由器处于“模式1”,路由器只将T6是‘0’的时间码视为有效。

3.2 时间码保留位与路由器模式切换的联合使用

由SpaceWire标准可以看出,时间码T6、T7这两位都做保留,均未使用。

在本方案中:若T6用作子网标号,那么T7仍作为保留位默认是0,不做使用;若T7用作子网标号,那么T6仍作为保留位默认是0,不做使用。

在本SpaceWire路由器热备份方案中,只占用T6、T7其中的一位用于网络融合,且没有全部占用这两个保留位,为系统后续的开发扩展留下余地。

下面使用T6作为子网标号,T7作为保留位进行说明(T7作为子网标、T6作为保留位时,其运作方法相同)。

按照各个设备之间是否有相互通信要求的情况,将它们分为两组。如图3所示:设备1,设备2,设备3可以编为一组A组;设备4、设备5、设备6、设备7可以编为一组B组;A组与B组之间没有通信要求。

若有特殊设备要在A组与B组间有通信要求,则可以让该种设备将两套时间码均视为有效。

由上一小节可知,根据路由器的时间码使能寄存器将路由器的工作模式分为两种:

“模式0”将T6是‘1’的时间码视为有效并将其发送;

“模式1”将T6是‘0’的时间码视为有效并将其发送。

星载计算机通过接口1与接口2同时向A、B组发送时间码。接口1流通的是T6为‘1’的时间码,接口2流通的是T6为‘0’的时间码。

两组设备使用两套时间码。

对于A组设备使用接口1,#1路由(处于模式0)将T6是‘1’的时间码视为有效并将其发送,且A组设备视T6为‘1’的时间码为有效,否则忽略,这样可保证A组设备由#1路由得到有效时间码,使用接口1进行通信;

对于B组设备使用接口2,#2路由(处于模式1)将T6是‘0’的时间码视为有效,并将其发送,且B组设备视T6为‘0’的时间码为有效,保证B组设备由#2路由得到有效时间码,使用接口2进行通信。

即正常工作时:

A组设备由#1路由得到有效时间码,使用接口1进行通信,并将T6为‘1’的时间码视为有效;

B组设备由#2路由得到有效时间码,使用接口2进行通信,并将T6为‘0’的时间码视为有效;

#1路由器处于模式0,只将T6是‘1’的时间码视为有效;

#2路由器处于模式1,只将T6是‘0’的时间码视为有效。

两组设备使用不同的子网络,减少单个网络工作负荷,

缩短事务表周期从而提高网络传输效率。两个SpaceWire路由器工作保证资源利用。

4 链路故障的应对

本小节将详细说明当链路出现故障时,本系统的运作过程。

1)当A组中一些设备的接口1或与接口1相连的链路出现故障,且A组设备的接口2与B组设备的接口1无故障发生。

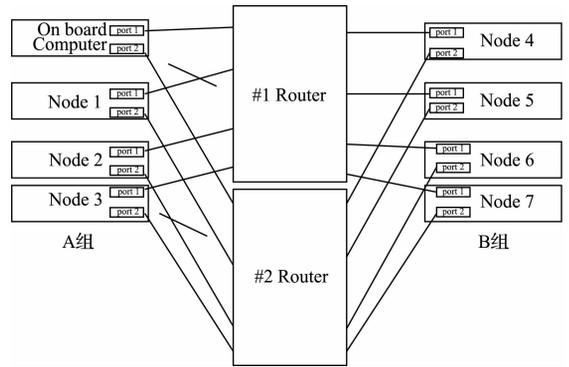


图5 A组设备1接口出现故障

这时通过互换两组设备所使用的接口即可解决问题:互换的结果是,A组设备由#2路由得到有效时间码,使用接口2通信;B组设备由#1路由得到有效时间码,使用接口1通信。

运作机制如下:

星载计算机读取路由器的状态寄存器,得知故障发生的位置。这时通过互换两组设备所使用的网络将解决问题。且此时仍能保证两个SpaceWire路由器共同工作。

星载计算机得知故障位置后通过向#1路由发送命令包从而改写其时间码使能寄存器的第31位,将#1路由由“模式0”转为“模式1”,转换模式之后#1路由将T6是‘0’的时间码视为有效并将其发送,星载计算机向#1路由发送T6是‘0’的时间码。#1路由器将通过接口1向B组设备发送有效时间码。

即转换之后,B组设备由#1路由得到有效时间码,使用接口1进行通信;

星载计算机得知故障位置后通过向#2路由发送命令包从而改写其时间码使能寄存器的第31位,将#2路由由“模式1”转为“模式0”,转换模式之后#2路由将T6是‘1’的时间码视为有效并将其发送,星载计算机向#2路由发送T6是‘1’的时间码。#2路由器将通过接口2向A组设备发送有效时间码。

即转换后,A组设备由#2路由得到有效时间码,使用接口2进行通信。

星载计算机修改路由器工作模式:SpaceWire标准中星载计算机等节点通过向路由器发送命令包的形式写入和

修改路由器的内部寄存器(时间码使能寄存器便是其中之一),因此转换工作模式只需要修改时间码使能寄存器的第 31 位即可达成转换工作模式的目的。

2)当 B 组中一些设备的接口 2 或与接口 2 相连的链路出现故障,且 B 组设备的接口 1 与 A 组设备的接口 2 通信正常。

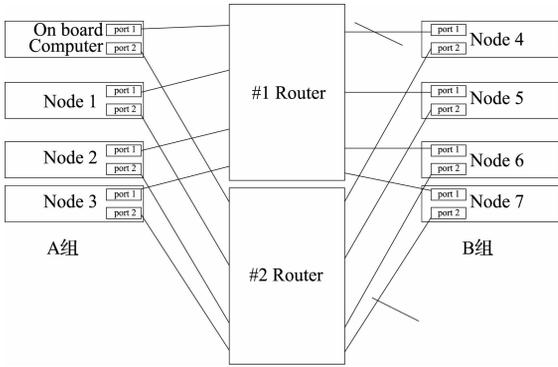


图 6 B 组设备 2 端口出现故障

出现这种情况时,系统的运作方式与情况 1)完全相同。

3)路由器故障、两组设备多处链路出现故障、星载计算机与路由器链路出现故障,导致某个组内所有设备没有相同的接口可以正常工作。

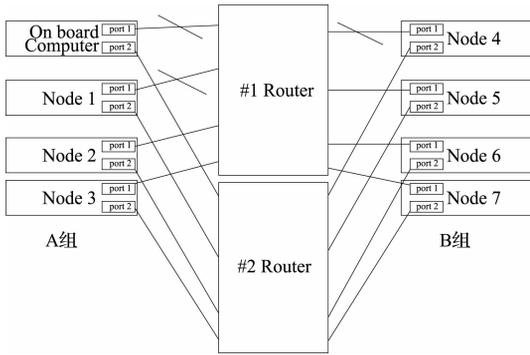


图 7 单路由工作

此时只能进行双网融合,将两个路由器的负担交由一个路由器承担,即保证通信的进行,两组设备用同一子网,单个 SpaceWire 路由器的工作负荷加大。

星载计算机等节点设备读取链路中各设备的状态寄存器将得知链路故障发生的位置,此时系统不能支持双路由器工作,启用双网融合。星载计算机选择一条正常工作的链路,发送时间码。

当网络中只有 #1 路由器正常工作时(#1 路由原本使用模式 0),星载计算机等节点设备读取链路中各设备的状态寄存器得知故障发生的位置并进行双网融合,此时所有节点设备视 T6 为‘1’的时间码为有效;

当网络中只有 #2 路由器正常工作时(#2 路由原本使用模式 1),星载计算机等节点设备通过读取链路中各设备

的状态寄存器得知链路故障发生的位置,并进行双网融合,此时所有节点设备视 T6 为‘0’的时间码为有效。

4)当 A 组设备的接口 2 或 B 组设备的接口 1 出现故障。

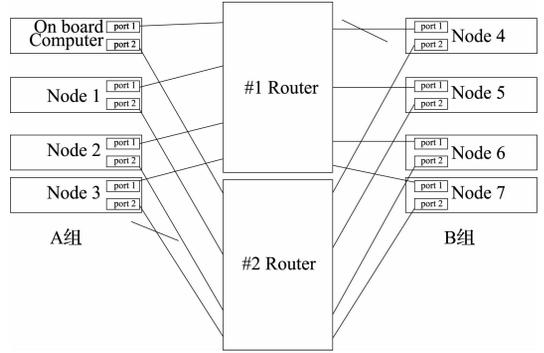


图 8 故障出现在非使用接口

此时不影响通信的进行,系统无须做出任何改变。

5 路由器工作模式切换的功能验证

由上一节可知,所设计的 SpaceWire 路由器备份功能实际上是:当命令包改写路由器的时间码使能寄存器的数值时,路由器识别有效时间码的类型也发生改变。

也就是说,路由器的备份功能就是路由器的模式切换功能。

时间码使能寄存器的第 31 位是‘1’时,SpaceWire 路由器处于“模式 1”,将 T6 是‘0’的时间码视为有效,将 T6 是‘1’的时间码视为无效;时间码使能寄存器的第 31 位是‘0’时,SpaceWire 路由器处于“模式 0”,将 T6 是 1 的时间码视为有效,将 T6 是‘0’的时间码视为无效。

将 Dundee 提供的脚本经过改写后,用于测试路由器的功能。

测试系统结构如下:

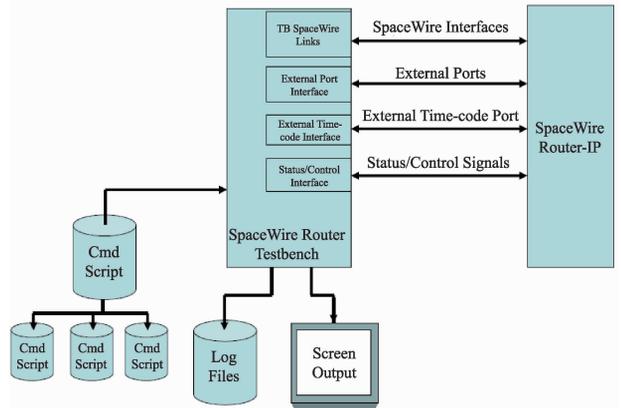


图 9 测试系统机构示意图

向路由器发送数据包,并发送读命令检查,检查寄存器

所存内容是否与预期结果一致,若与预期结果不一致则会报错。

脚本中的数值均为16进制:

有效值是'0'且T6是'1'的时间码,转换为16进制是"40";

有效值是'1'且T6是'1'的时间码,转换为16进制是"41";

有效值是'2'且T6是'1'的时间码,转换为16进制是"42"。

1)路由器收到内容是"FFFFFFFF"的命令包,将时间码使能寄存器的第31位设置为'1',此时路由器处于'1'模式将T6是'0'的时间码视为有效:

T6是'1'的时间码视为有效:

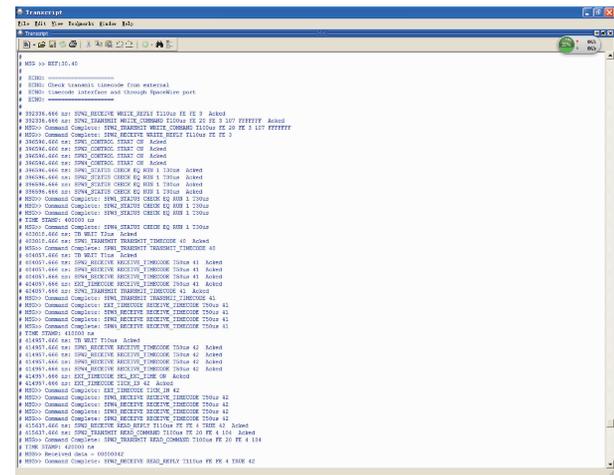


图12 路由模式转换测试记录之三

4)路由器收到内容是"FFFFFFFF"的命令包,将时间码使能寄存器的第31位设置为'0',此时路由器处于'0'模式将T6是'0'的时间码视为无效:

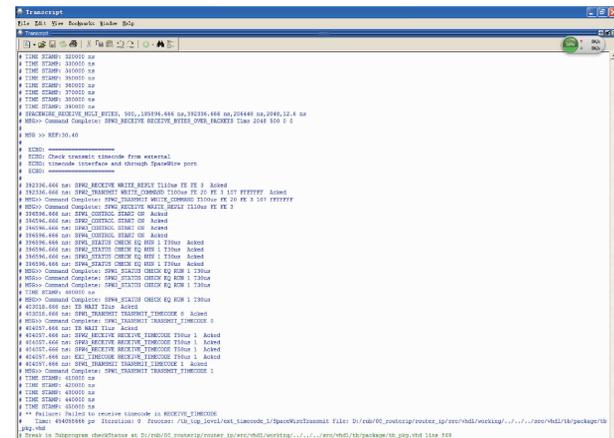


图13 路由模式转换测试记录之四

图10 路由模式转换测试记录之一

2)路由器收到内容是"FFFFFFFF"的命令包,将时间码使能寄存器的第31位设置为'1',此时路由器处于'1'模式将T6是'1'的时间码视为无效:

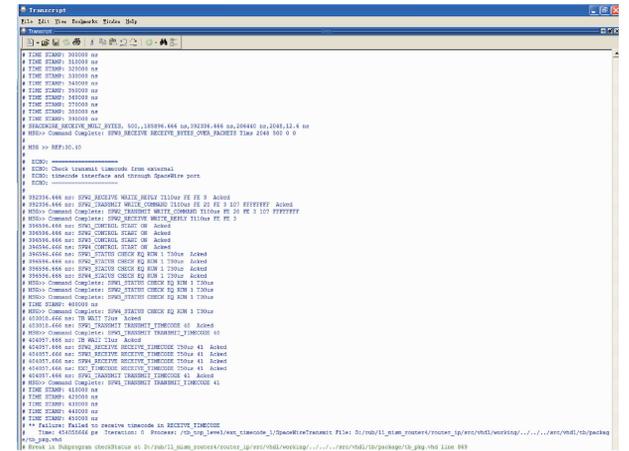


图11 路由模式转换测试记录之二

3)路由器收到内容是"FFFFFFFF"的命令包,将时间码使能寄存器的第31位设置为'0',此时路由器处于'0'模式将

6 可靠性分析对比

对于图3的这个单板双路由由备份结构来说有两种运作方式:第一种方式即为本文所述的“热备份”;第二种运作方式是“冷备份”。

利用图3这一结构所实现的“冷备份”如下所述:正常工作条件下只有#1路由器工作,而#2路由器处于待机;当链路中有一条链路或一个端口出现异常时即启动#2路由而关闭#1路由,即“双保险”。

显然本小节所述的“冷备份”路由器的可靠性高于不使用备份结构的路由器,那么下面将讨论和比较本文中所述的“热备份”路由器与“冷备份”路由器这两种方案的可靠性。

1)只有一条链路出现故障,二者均能正常工作。

2)与#1路由相连的链路中的两条出现故障,二者均能正常工作。

3)与#1路由相连的链路中有一条出现故障,与#2路由相连的链路中有一条出现故障:

“冷备份”不能正常工作;对于“热备份”来说,在这种情况下,

1)A组设备与#1路由相连的链路出现故障,B组设备与#2路由相连的链路出现故障,则通过交换两组设备所用的工作链路仍能保证系统正常工作;

2)与星载计算机相连的链路出现故障则导致系统瘫痪。

小结:在这种情况下,“冷备份”一定不能正常工作,“热备份”仍可能正常工作。

4)与#1路由相连的链路中有三条出现故障,二者均能正常工作。

5)与#1路由相连的链路中有两条链路出现故障,与#2路由相连的链路中有一条出现故障:

“冷备份”一定不能正常工作;对于“热备份”来说,类似于情况3):

1)A组设备与#1路由相连的链路中有两条链路出现故障,B组设备与#2路由相连的设备中有一条链路出现故障,则通过交换两组设备所用的工作链路仍能保证系统正常工作;

2)与星载计算机相连的链路出现故障则导致系统瘫痪。

小结:在这种情况下“冷备份”不能正常工作,热备份仍能正常工作。

综上所述得出结论:依次类推,在其它多条链路出现故障时,“冷备份”一定不能正常工作,而热备份仍有几率维持系统通信,所以文中所述的“热备份”路由器比“冷备份”路由器的可靠性高。

7 结 论

本文在利用IP核实现8端口SpaceWire路由器的基础上,提出路由备份机制和相应的单板双路由结构,对原本的SpaceWire-D标准做出了补充和改进:仅仅利用在原标准中不做任何使用的时间码保留位中的一位,同时结合SpaceWire路由器的模式切换,以实现SpaceWire路由器的热备份。

虽然完全占用时间码保留位也能实现路由器的备份,但考虑到SpaceWire标准仍有待补充,完全占用保留位会对接下来标准的发展造成阻碍。因此本文只占用时间码保留位中的一位与路由器模式切换相结合实现的热备份,既没有完全占用保留位,又实现了SpaceWire路由器的热备份。

最后通过可靠性分析比得出结论:单板双路由结构的热备份方案提高了SpaceWire路由器的可靠性。

参考文献

- [1] 陈川. 基于SpaceWire总线技术的网络由演化算法研究[D]. 北京:首都师范大学,2012.
- [2] PAXSON V, MAHDAVI J, ADAMS A, et al. An architecture for large scale Internet measurement[J]. Communications Magazine, IEEE, 1998, 36(8): 48-54.
- [3] PARKES S M, ARMBRUSTER P. SpaceWire: a spacecraft onboard network for real-time communications[C]//Real Time Conference, 2005. 14th IEEE-NPSS. IEEE, 2005: 6-10.
- [4] PARKES S. SpaceWire User's Guide[J]. STAR-Dundee Limited, 2012.
- [5] 陈熙之, 基于SpaceWire标准的星上总线网络设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [6] 梅洪. 基于SpaceWire的实时分布式中断系统设计[J]. 航天控制,2011(02):93-96.
- [7] 曹昆. 基于FPGA的SpaceWire路由器设计与分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [8] 乔立岩, 陈利彬, 彭喜元. 基于IP核的SpaceWire-PCI通信卡设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10): 918-923.
- [9] 毛春静, 关永, Daid J. 星载SpaceWire路由器的研空与设计[J]. 电子与信息学报, 2010(08):1904-1909.
- [10] PARKES S, FERRER A, MILLS S, et al. SpaceWire-D: Deterministic Data Delivery with SpaceWire[C]//International SpaceWire Conference, St Petersburg, Russia. 2010.
- [11] STANDARD E E. ST-50-53C, SpaceWire—CCSDS Packet Transfer Protocol[J]. 2010.
- [12] 方哲, 郁滨, 岳云天. 串行传输线同步信号辐射发射模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2373-2380.
- [13] 张清鹏, 万健如. 电磁兼容系统中的接地研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 27-29.

作者简介

庄洪毅, 硕士研究生, 北京航空航天大学光学工程专业, 主要研究方向为数字系统设计。

E-mail: 296569129@qq.com

伊小素, 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院副教授, 主要研究方向为光纤传感器(包括声压、速率传感), 光电子器件, 光纤陀螺空间应用技术。

张昊, 硕士研究生, 北京航空航天大学光学工程专业, 主要研究方向为高速数据总线技术及其FPGA实现。