

光传飞控系统交叉通道数据链路设计与分析

王新华 甄子洋 龚华军 杨一栋

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:未来飞机采用光传操纵系统能够提高抗电磁干扰能力、减小体积和重量,多余度技术能够提高光传操纵系统的可靠性,而交叉通道数据链路是冗余计算机之间进行数据交换的重要途径。为此,设计了一种具有多故障容错能力的光传飞控系统交叉通道数据链路。根据系统性能要求,给出并讨论了该链路系统的结构配置和工作流程,分析了其关键组成部件的功能和实现技术,并设计了当光链路发生故障时系统的容错逻辑算法。通过理论分析和数值计算表明,该链路系统能够提高光传飞控系统的安全性和可靠性,并具有良好的实时性和实用性。

关键词:光传操纵;光交叉通道数据链路;可靠性;容错技术

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)04-0526-06

Design and Analysis of Optical Cross-Channel Data Link for Fly-By-Light Control System

Wang Xinhua, Zhen Ziyang, Gong Huajun, Yang Yidong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Flight-by-light for future aircraft can improve the resistance ability of electromagnetic interference, and decrease its size and weight. Redundancy technique can develop the reliability of the flight-by-light system. Cross-channel data link (CCDL) is important for data exchange among redundancy flight control computers. Therefore, an optical cross-channel data link which has fault tolerant capability is designed. Firstly, the structure configuration of the optical CCDL is given and the procedure is discussed. Then the function and the realization technique of the main component parts are analyzed. And finally, the fault-tolerant logical algorithm of OCCDL is designed. According to the theoretical analysis and numerical calculation, the system can effectively improve the reliability and security, and the hardware system has the traits of real-time and practicality.

Key words: fly-by-light; optical cross-channel data link; reliability; fault tolerant technique

现代飞机普遍采用电传操纵系统(Fly-by-wire, FBW)。然而,随着未来飞机的性能要求不断提高,电子设备日趋复杂,导致电缆用量不断增加、线路布局更加复杂、电磁干扰和电磁脉冲比较严重。同时,为减轻飞机重量和提高飞机的机动性和经济性,未来飞机期望采用复合材料代替目前使用的铝合金,但是它的电磁屏蔽作用被削弱。解决上

述问题最根本的途径是把光纤传输技术应用于飞行控制系统,即采用光传操纵系统(Fly-by-light, FBL),所谓光传操纵,是指飞机的飞行控制、发动机控制均以光纤作为信号传输媒介,以光信号代替电信号进行信息传输。光传操纵系统传输容量大,可有效地防止雷击、核爆炸等引起的电磁脉冲干扰,而且能够进一步减小体积和重量,大大改善飞

基金项目: 航空科学基金(200919522023)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(NS2010076, NP2011012)资助项目。

收稿日期: 2010-10-27; **修订日期:** 2010-12-29

通讯作者: 王新华,男,博士研究生,讲师,1977年1月生, E-mail: xhwang@nuaa.edu.cn。

机的操纵品质,提高飞机系统的可靠性。

目前,国外已有研究者开展了应用于军民飞机的FBL 系统及光传余度技术的研究^[1-4]。采用光传操纵系统后,为了进一步提高飞行控制的可靠性,仍然需要采用余度技术设计飞行控制系统,典型的有三余度光传飞控系统^[5]。现有飞控计算机之间的信息交换往往采用交叉通道数据链路(Cross-channel data link,CCDL)结构。光交叉通道数据链路(Optical cross-channel data link,OCCDL)是保证光传余度飞行控制系统正常运转的关键部件。文献[4]中给出了一种光交叉通道数据链路的实现方案,它通过采用光波分复用器实现了单纤双向信息传输和环形网络拓扑结构,其优点是减少了光纤的数量,但同时使得其只具有单链路故障容错能力,在可靠性上不能满足现代飞行控制系统发展的需求。

本课题组于20 世纪末开始一直从事光传飞行控制实现技术的研究,已在光传复用传输和光传动作器等关键技术方面取得了一系列的突破^[6-8]。在以往研究的基础上,为了进一步提高OCCDL 的可靠性和容错能力,在不增加其重量和体积的前提

下,本文设计了一种双余度、高速光交叉通道数据链路信息传输系统。该系统在硬件上采用光开关和波分复用器(Wavelength division multiplexing,WDM)来实现故障检测和多故障工作,同时采用USB 串行传输协议,保证了信息传输的可靠性。

1 OCCDL 结构配置与工作流程

三余度光传飞控系统由于采用交叉通信结构,且每条链路均为单向信息传输,因此若其中一条交叉通道数据链路发生故障,两台飞控计算机之间就无法进行信息交换。针对上述问题,在传统OCCDL 结构的设计基础上,本文设计一种新型的OCCDL 接口模块,本系统采取以下两个措施来提高OCCDL 的容错能力:(1)利用波分复用器(WDM)来实现单纤双向传输;(2)以FPGA 为逻辑控制核心、光开关为容错实现机构,在故障时可重构为环形网络容错拓扑结构。在此基础上,为了实现飞控计算机与OCCDL 系统的故障隔离,采用了双口RAM 作为二者信息交换的媒介。于是,建立如图2 所示的新型OCCDL 系统。本系统的组成部件主要包括:

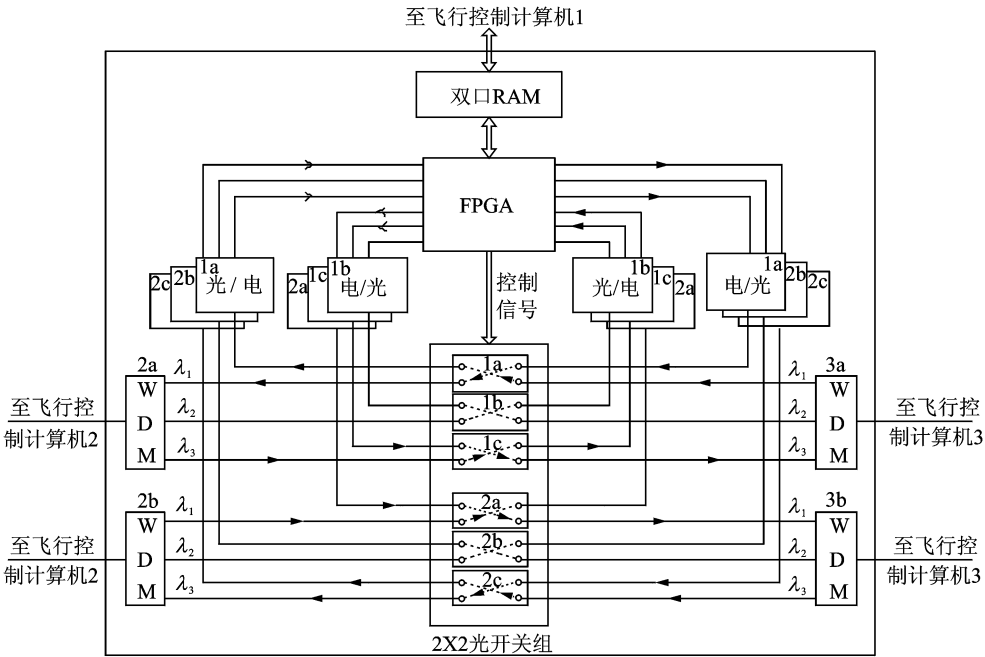


图1 光交叉通道数据链路接口模块

(1)双口RAM:用于存储各飞控计算机余度管理所需的信息,是连接飞控计算机与链路接口模块的桥梁。根据实际系统要求和未来扩展的需要,本系统中选用了64 K×16 bit 的IDT7028 双口RAM 芯片,可高速存储数据,其最快存储时间为15 ns,

可与大多数高速处理器配合使用,而无需插入等待状态。

(2)FPGA 模块:是整个接口电路的核心,负责实现双口RAM 的读写操作、链路故障诊断与容错逻辑计算以及光开关控制等功能。本系统选用了

Altera 公司的军用级 Stratix II 系列 FPGA 模块。

(3)光/电转换电路和电/光转换电路:完成光电信号的相互转换,采用 USB 协议,具有传输速度快、可靠性高、使用灵活等优点。

(4)2×2 光开关:本系统中主要是利用光开关进行故障切换,因此选用了带旁路功能的微电子机械(MEMS)光开关。MEMS 既有机光开关的低损耗、低串扰、低偏振敏感性等优点,又有波导开关的高开关速度、小体积、易于大规模集成等优点^[9]。

(5)波分复用器:实现多路光信号的复用传输,从而减轻自身的重量,并实现超大容量传输。由于本系统只需要 3 个波长通道,因此选用了高可靠、低成本的稀疏波分复用器。

图 1 中,当各组成部件均正常工作时,整个接口模块的工作流程为:当 FPGA 探测到飞控计算机 1 更新了双口 RAM 中信息后,将其读入到内部 FIFO 中,并立即进行并串转换,输出到电/光转换电路 1a 和 2a,然后经过光开关 1a 和 2a 输出到波分复用器 2a 和 3b 的 λ_1 通道中,分别送到光传飞控计算机 2 和 3。当飞控计算机 2 或 3 中的信息发生变化时,也会发送数据到飞控计算机 1 的接口模块,当 FPGA 接收到这些数据后,将立即更新双口 RAM 中的相应数据区,并通知飞控计算机 1,读取 RAM 中的信息。

图 1 中,当某组成部件出现故障时,接口模块的故障切换流程如下:波分复用器中的 λ_2 通道作为第一备份通道,在相应波分复用器的 λ_1 通道发生故

障时接入链路;波分复用器中的 λ_3 通道有两个作用:(1)构成环状网络结构,传输整个链路的工作状态信息,同时通过判断是否可以接收上一环网节点的信息来监控本节点与上一节点间的光链路是否存在故障,(2)当 λ_1 通道和 λ_2 通道同时发生故障时,作为第二备份通道接入链路进行数据传输。

由此可见,该光交叉通道数据链路 with 飞控计算机之间是独立工作、故障隔离的。除此之外,它还具有可靠性高、信息传输容量大以及多条链路故障工作等特点。

2 OCCDL 系统功能分析

下面对图 1 描述的 OCCDL 系统的关键部件的工作原理及功能进行分析。

双口 RAM 数据总线和地址总线通过接口电路分别与飞控计算机和 FPGA 的数据总线和地址总线相连接,读写信号和仲裁逻辑与双口 RAM 存储单元对应连接后,分别通过外部电路的地址译码、读写信号和控制电路的相互配合,就可互不干扰地分别通过数据总线对双口 RAM 存储单元进行数据的交换和存取,具体结构框图如图 2 所示。双口 RAM 的存储单元分成四部分,前三个部分用于冗余数据的存储与交换,第四部分用于存储 OCCDL 工作状态等信息,供飞控计算机冗余管理使用。IDT7028 仲裁逻辑标志器实际上是 8 个锁存器,用作两个读写端口之间的标志传送,以表明共享的双口 RAM 是否在使用。

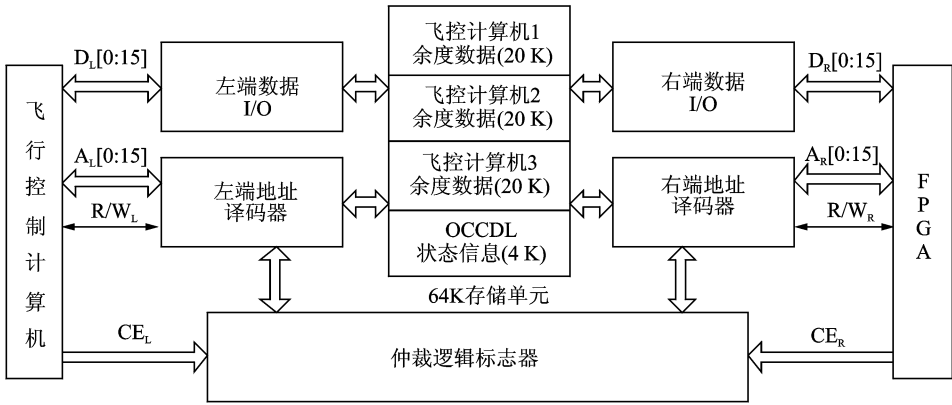


图 2 双口 RAM 的功能结构图

FPGA 模块主要协调整个光交叉通道数据链路的工作,完成故障诊断与容错逻辑算法,与双口 RAM 的数据交换,光开关控制,串并转换、数据传输编码与解码等功能,如图 3 所示。FPGA 模块的工作原理描述如下:首先,由故障诊断模块读取双

口 RAM 中存储的链路工作状态信息,进行故障诊断,然后将诊断结果送入容错逻辑模块,该模块根据故障情况为双口 RAM 读写逻辑模块指定数据输入/输出通道,同时控制相应的光开关,接通相应的传输通道,并将链路故障信息及容错逻辑计算结

果通过数据总线存储到双口RAM 工作状态信息区;其次,飞控计算机对本通道的余度数据进行更新后,需要 OCCDL 将更新后的数据立刻发送到其他通道,这就要求FPGA 不断查询相应的标志锁存器,当其状态发生变化时($\frac{1}{\text{空闲}} \rightarrow \frac{0}{\text{读/写操作}} \rightarrow \frac{1}{\text{空闲}}$),FPGA 获取双口RAM 的控制权,并将余度数据发送到容错逻辑指定的FIFO 中,通过相应的链路(波分复用器2b 和3a 的 λ_3 通道)传输到环网的下一个节点,进行编码和并串转换后,输出到相应的电/光转换电路。

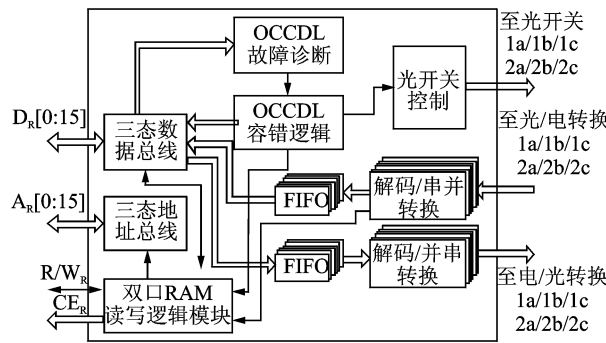


图3 FPGA 模块的功能结构图

光/电和电/光转换电路采用基于USB 协议,其数据传输速率可达到3 Mb/s,可以满足飞控系统余度数据实时传输的需要^[8]。光开关一般有两种工作状态:正常和旁路,如图4 所示。当发生故障需要重新建立光链路或切除本通道时,通过控制电路转换到旁路工作状态,此时光信号可直接通过WDM 传到下一节点计算机。

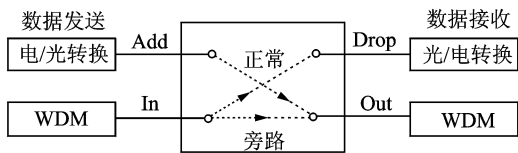


图4 光开关容错切换逻辑

波分复用器实现单根光纤双向数据交叉传输,波分复用器的 λ_1 通道是交叉数据传输的正常工作通道, λ_2 通道是第一备份通道, λ_3 通道既是故障检测与链路工作状态信息的传输通道,又可在 λ_1 通道和 λ_2 通道同时发生故障时,作为交叉数据传输的第二备用通道。光开关和波分复用器相互配合,共同组成了OCCDL 的容错结构。

通过以上分析可知,飞控计算机只对双口RAM 进行读写,不负责OCCDL 的管理,光交叉通

道数据链路的工作是独立的,不占用飞控计算机的处理时间。另外,采用仲裁逻辑标志器和查询工作方式后,一方面保证了数据不会发生丢帧现象,另一方面也保证了系统的实时性。

3 OCCDL 系统光链路故障容错逻辑

故障诊断与容错逻辑设计的目的就是最大限度地提高完成任务的可靠性和飞行安全性,并在产生故障后,有效利用系统可用资源,使系统性能降低最小,并为故障瞬态提供保护。OCCDL 系统的故障诊断与容错逻辑采用了可编程硬件FPGA 来实现,因此其计算速度快,可靠性高。

光链路是指连接两台飞控计算机的光纤链路。光链路故障是OCCDL 系统最常见的故障之一,因此,本文着重研究光链路故障的容错逻辑问题。

当一条光链路或波分复用器发生故障时,如假设波分复用器3a 发生故障,则只需将波分复用器3a 的 λ_1 通道用波分复用器3b 的 λ_2 通道来代替即可。从而在飞控计算机1(节点1)和飞控计算机3(节点3)之间形成一条双向通信光链路。

当两条光链路或非成对的两个波分复用器发生故障时,分两种情况来讨论,如图5(a)所示。图5(a)中第(1)种情况同一条光链路发生故障时相似,即用另一条光链路双向信息传输来代替故障链路。图5(a)中第(2)种情况,在节点1 和节点3 之间没有直接通路,因此需要通过将节点2 上备用通道的光开关打到旁路状态来形成节点1 和节点3 之间的直接光链路。

当3 条光链路或非成对的3 个波分复用器发生故障时,也分2 种情况讨论,如图5(b)所示。图5(b)中第(1)种情况同一条光链路发生故障或两条光链路发生第(1)种故障时相似。图5(b)第(2)种情况与两条光链路发生第(2)种故障时相似,在节点1 和节点3 之间也没有直接通路,不同的是,此时节点1 与节点2 之间的备用通道已经在使用,因此需要通过将节点2 上的光开关在正常工作状态和旁路状态之间协调切换来形成节点1 和节点3 之间的直接光链路。即当需要节点1 和节点2 之间交叉通信时,光开关工作在正常工作状态,而当需要节点1 和节点3 之间交叉通信时,光开关工作在旁路。

当4 条光链路或非成对的4 个波分复用器发生故障时,要分3 种情况来讨论,如图5(c)所示。图5(c)中第(1)种情况同3 条光链路发生第(2)种故障时相似。图5(c)中第(2)种情况与第(1)种情况不同

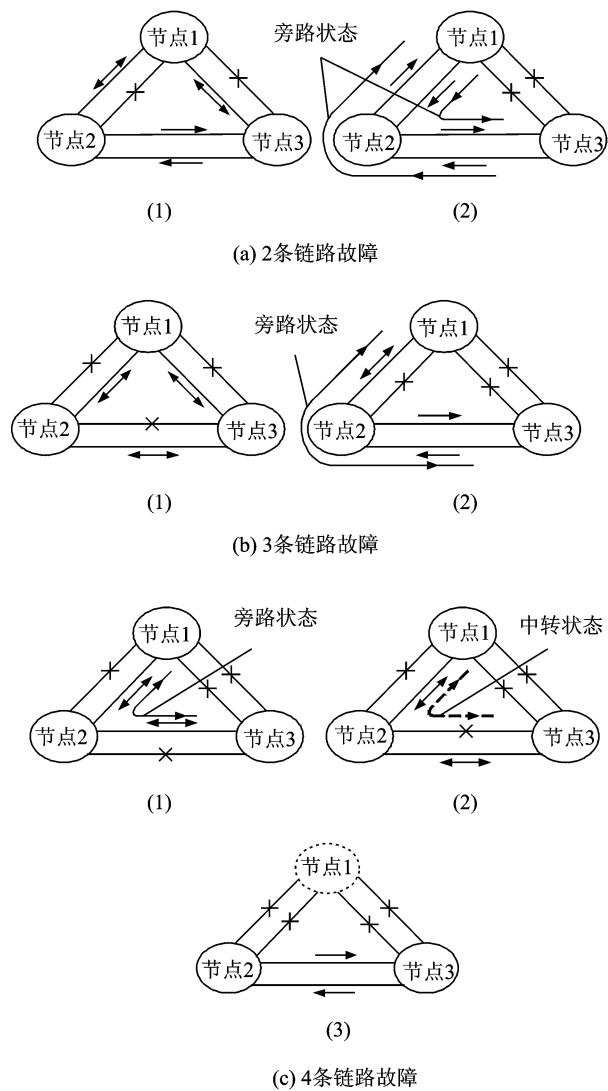


图5 光链路(或波分复用器)故障逻辑

在于节点1和节点3之间没有光开关通路,无法形成直接光链路。此时需要节点2将其接收到的节点1和节点3的数据交叉发送给节点3和节点1,即节点1和节点3之间的数据传输需要通过节点2来中转。图5(c)中第(3)种情况下,节点2和节点3之间可正常交换数据,而二者与节点1没有可用通路,此时光交叉通道数据链路故障已影响到了整个系统的正常工作。

由此可见,当发生4条光链路故障(图5(c)中第(3)种情况除外)时,通过光交叉通道数据链路的故障容错逻辑切换后不会影响到整个系统的工作。

为了保障本系统的实时性,在设计时采取了以下措施:

- (1)采用超高速的FPGA器件,以满足系统在逻辑与数值计算方面的实时性要求;
- (2)采用了基于USB协议的光电转换电路,其

传输速率达到了3 Mb/s,可满足信息传输的实时性要求;

(3)采用了MEMS光开关器件,其开关延迟时间小于5 ms,保证了故障切换的实时性;

(4)采用了双口RAM器件,使得OCCDL在工作时不占用飞控计算机的周期,从而保证了整个系统的独立性和实时性。

4 OCCDL 可靠性数值计算分析

为了分析OCCDL系统的可靠性,首先给出如下定义:

(1)任务:在OCCDL互连中,定义任务为系统中任意两个节点之间的单向信息传输过程。任务 t 用二元组 $[S,D]$ 表示,其中 S 为代表任务的源节点, D 为代表任务的目的节点。对于一般光交叉通道数据链路两节点间单向数据传输路径只有一条。而本文设计的光交叉数据传输双环冗余结构,两个节点间的信息传输路径为4条,如图6所示。用 $t_{S,D}$ 表示从源节点 S 到目的节点 D 传输信息的任务。

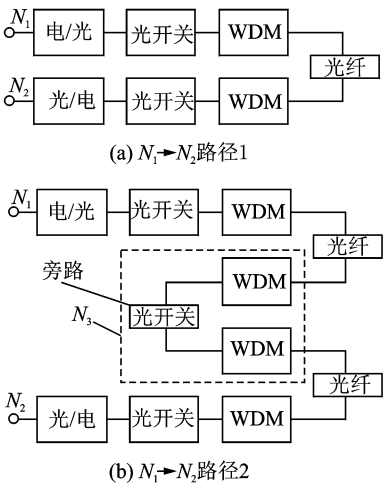


图6 OCCDL 信息传输路径(单环)

(2)任务集:互联系统中所有任务组成了系统的任务集,系统中的任务数为 m ,则系统的任务集表示为

$$\Gamma = \{t_{S,D}^i | i = 1, 2, \dots, m\}$$
 (1)

(3)任务路径集:任务 $t_{S,D}$ 的路径由完成从源节点 S 到目的节点 D 传输信息的任务所需的链路单元组成,用 $r_{S,D}$ 表示。链路定义为两个节点之间的通信线路。由图6可知任意两个节点间单向信息传输任务的路径为4条,所以,任务 $t_{S,D}$ 的路径集 $R_{S,D}$ 为

$$R_{S,D} = \{r_{S,D}^j | j = 1, 2, 3, 4\}$$
 (2)

式中:任务 $t_{S,D}$ 的第 j 条路径 $r_{S,D}^j$ 由链路单元集组成,以 $L_{r_{S,D}}^j$ 来表示,即

$$L_{r_{S,D}}^j = \{l_{r_{S,D}}^j \mid l_{r_{S,D}}^j \in r_{S,D}^j\} \quad (3)$$

任务 $t_{S,D}$ 的链路单元集表示为

$$L_{t_{S,D}} = L_{r_{S,D}}^1 \cup L_{r_{S,D}}^2 \cup L_{r_{S,D}}^3 \cup L_{r_{S,D}}^4 \quad (4)$$

对于 OCCDL 系统,假设系统中的链路单元都只有正常工作和失效两种状态,且节链路单元的失效相互统计独立,失效概率可以不同。设单个主要光电部件的故障概率为^[10]:单根光链路(光纤)的故障概率 $\lambda_{\text{fib}}=0.01$,单个波分复用器的故障概率 $\lambda_{\text{wdm}}=0.01$,单个光连接器的故障概率 $\lambda_{\text{con}}=0.01$,单个光开关的故障概率 $\lambda_{\text{osw}}=0.05$,单个光电转换模块的故障概率 $\lambda_{\text{oe}}=\lambda_{\text{eo}}=0.05$ 。

设 p_{link} 表示链路单元可靠性的概率度量,即可靠度。任务 $t_{S,D}$ 的完成由4条路径,并且相互之间没有交集,每个任务链路单元的可靠度分别为

$$\begin{aligned} p_{\text{link}}^1 &= p_{\text{link}}^3 = (1 - \lambda_{\text{oe}}) \cdot (1 - \lambda_{\text{osw}})^2 \cdot (1 - \lambda_{\text{con}})^2 \cdot \\ &\quad (1 - \lambda_{\text{wdm}})^2 \cdot (1 - \lambda_{\text{fib}}) \cdot (1 - \lambda_{\text{eo}}) = 0.774 \ 6 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p_{\text{link}}^2 &= p_{\text{link}}^4 = (1 - \lambda_{\text{oe}}) \cdot (1 - \lambda_{\text{sw}})^3 \cdot (1 - \lambda_{\text{con}})^4 \cdot \\ &\quad (1 - \lambda_{\text{wdm}})^4 \cdot (1 - \lambda_{\text{fib}})^2 \cdot (1 - \lambda_{\text{eo}}) = 0.699 \ 8 \end{aligned} \quad (6)$$

进一步可得任务 $t_{S,D}$ 的可靠度为

$$\begin{aligned} R_{t_{S,D}} &= \Pr\{r_{S,D}^1 \cup r_{S,D}^2 \cup r_{S,D}^3 \cup r_{S,D}^4\} = \\ &\quad \Pr\{r_{S,D}^1\} + \Pr\{r_{S,D}^2\} + \Pr\{r_{S,D}^3\} + \\ &\quad \Pr\{r_{S,D}^4\} - \Pr\{r_{S,D}^1 \cap r_{S,D}^2 \cap r_{S,D}^3 \cap r_{S,D}^4\} = \\ &\quad \Pr\{L_{S,D}^1\} + \Pr\{L_{S,D}^2\} + \Pr\{L_{S,D}^3\} + \\ &\quad \Pr\{L_{S,D}^4\} - \Pr\{L_{S,D}^1 \cap L_{S,D}^2 \cap L_{S,D}^3 \cap L_{S,D}^4\} = \\ &\quad 1 - (1 - p_{\text{link}}^1)^2 \cdot (1 - p_{\text{link}}^2)^2 = 0.995 \ 4 \end{aligned} \quad (7)$$

对于传统光交叉通道数据链路^[4],其任务 $t_{S,D}$ 的可靠度为

$$\begin{aligned} R'_{t_{S,D}} &= (1 - \lambda_{\text{oe}}) \cdot (1 - \lambda_{\text{con}})^2 \cdot (1 - \lambda_{\text{fib}}) \cdot \\ &\quad (1 - \lambda_{\text{eo}}) = 0.875 \ 7 \end{aligned} \quad (8)$$

由此可见,采用了光开关和波分复用器后,使得信息传输的可用路径由1条增加到4条,从而提高了信息传输任务的可靠度。

5 结 论

本文设计了一种用于余度数据传输的光交叉通道数据链路,其特点可描述为:

(1)采用了FPGA作为OCCDL接口的控制模块,提高了逻辑运算速度和可靠性;

(2)采用了双口RAM作为OCCDL与飞控计算机的接口,其具有数据交换速度快,实时性强,且不占用飞控计算机的处理时间;

(3)采用了光开关和波分复用器作为故障容错逻辑的执行部件,即不会增加整个系统的重量。通过分析计算可知信息传输任务的可靠度得到了极大提高;

(4)采用了基于USB协议的光电转换技术,大大提高了OCCDL的数据传输速率,减小了误码率。

由此可见,该光交叉通道数据链路可以满足未来航空技术发展的需要。

参考文献:

- [1] Corrigan J, Shaw B, Jones J. Demonstration results of fly-by-light flight control system architectures for tactical military aircraft[J]. SPIE, 1996(2840): 77-88.
- [2] Todd J R. A review of the fly-by-light optical aileron trim flight demonstration system[C]//Proceedings of 17th Digital Avionics Systems Conference. New York: AIAA/IEEE/SAE, 1998: D33/1-D33/3.
- [3] Tispsuwanpom V, Sangrayub A, Suesut E, et al. Development of PLC fiber-optic network for redundant system[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Tribology (ICIT). New York: IEEE, 2002: 303-306.
- [4] Goossen E R, Nelson L A, Woods J W. Fault tolerant optical cross-channel data link; US, 5396357[P]. 1995-03.
- [5] 齐劲松,王伟,吴成富,等. 三余度飞控计算机交叉数据链系统设计[J]. 测控技术, 2007, 26(5): 73-75.
- [6] 杨一栋,刘晓里. 光传飞行控制[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [7] 黄智锋,杨一栋,王新华. 波分复用光传飞行控制系统研究[J]. 航空兵器, 2005(2): 7-11.
- [8] 杨柳,杨一栋,王新华. 基于USB的波分复用光传飞行控制系统的开发[J]. 光通信技术, 2006(9): 34-36.
- [9] 陈希明,梁斌. 全光网络中的光开关技术及应用[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2007, 19(6): 702-705.
- [10] 陈坚. 光网络可靠性及其相关技术研究[D]. 南京:东南大学电子科学与工程学院,2004.