

# 飞控系统的光传网络的可靠性及实时性

罗佳荣<sup>1</sup> 罗 萱<sup>1</sup> 何 浩<sup>1</sup> 金耀辉<sup>1</sup> 黄浩益<sup>2</sup> 吴建民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

<sup>2</sup>航空电子系统综合技术国防科技重点实验室, 上海 200233

**摘要** 调研了传统光传(FBL)网络的几种拓扑结构, 就可靠性和实时性两方面对它们进行了分析和比较。选择一个包含 256 个节点的 mesh 光交换网络, 它具有冗余拓扑结构能承受 3 处链路故障, 保证了网络的可靠性。以网络中发生链路故障的数目, 及多个故障同时发生时故障的邻近程度来衡量网络故障的严重性。对所有链路故障情形进行仿真, 测试端到端的通信延迟。仿真结果表明, 采用这种网络拓扑结构的光传网络, 即使在发生较为严重的故障的情况下, 端到端通信路由的跳数增加不大, 仍能满足实时通信的要求。

**关键词** 光传网络; 可靠性; 实时性; mesh 网络拓扑结构

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS200828s2.0196

## Reliability and Real-time Assurance of Fly-by-light Network for Flight Control System

Luo Jiarong<sup>1</sup> Luo Xuan<sup>1</sup> He Hao<sup>1</sup> Jin Yaohui<sup>1</sup> Huang Haoyi<sup>2</sup> Wu Jianmin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Network and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China

<sup>2</sup>National Defense Science and Technology Key Laboratory for Avionics System Integration Technology, Shanghai 200233, China

**Abstract** A survey is made on several traditional topologies of fly-by-light(FBL) network. Based on the comparison of their reliability and real-time performance, a mesh optical switching network topology with 256 nodes is chosen. The redundancy topology gives the ability to sustain 3 link faults, which assures the reliability of network. The seriousness of the network failure can be measured by the number of link faults. And when several link faults occur at the same time, it must also be measured by the contiguity degree among the faults. A simulation is taken to test the end-to-end latency under all network failure situations. The simulation results show that even when some serious fault occurs, the number of hops of the end-to-end route increases slightly. So it still meets the real-time communication requirements.

**Key words** fly-by-light network; reliability; real-time performance; mesh network topology

## 1 引 言

随着飞行器性能和功能的增强, 商用和军用飞行任务的复杂程度的加大, 航空电子系统对于数据传输的带宽和通信质量的要求越来越高, 传统的电传操纵系统已难以满足当前的通信要求。与此相比, 光纤传输技术能提供足够的传输带宽, 能在根本上避免电磁干扰, 并且占用空间小、重量轻、工作

温度低, 不会产生电火花, 在满足航空电子系统的性能要求的同时, 又提高了系统的灵活性和安全性。因此, 在过去的 20 年里, 国内外致力于发展光传(Flight-by-light)操纵系统的研究, 并取得了大量的进展和成果<sup>[1~4]</sup>; 而波分复用(WDM)光传网络作为飞行器上的传送平台, 也得到了初步的应用<sup>[5~8]</sup>。

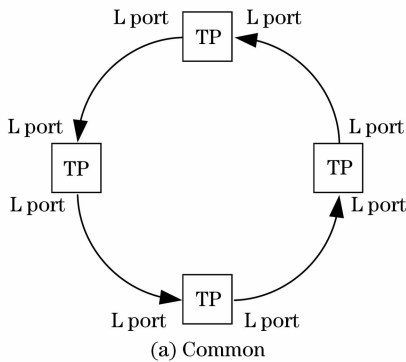
**作者简介:** 罗佳荣(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事光网络控制和管理方面的研究。E-mail: luojiaiw@sjtu.edu.cn

**导师简介:** 金耀辉(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事光网络智能控制、光网络新型应用、交换机调度方面的研究。

E-mail: jinyh@sjtu.edu.cn(通信联系人)

目前，在飞行系统中，WDM 光传网络已经被应用于提供娱乐和其他一些非关键性的功能上；然而，关系到飞行器本身的生存与否时，如在飞行控制和导航系统中，采用的仍然是传统的用铜线铺设的网络。这是因为在发生故障的情况下，WDM 光传网络的可靠性在航空电子系统中仍未得到保证。尤其在军用航空电子系统中，不但需要网络具有高可靠性，同时对通信的实时性要求也较高，这就要求 WDM 网络能够承受一定的故障发生率，并且在发生故障的情况下不会对端到端的通信质量造成太大的影响。目前，对采用 WDM 光传网络的光传操纵系统的可靠性研究主要集中在对网络拓扑的设计上，主要有点到点网络，仲裁环网络和 mesh 交换式网络。

本文基于可靠性网络的研究，对点到点网络，仲裁环网络和 mesh 交换式网络模型在可靠性、实时性和带宽利用率的这几方面的性能做了综合性的比较。然后对一个能承受 3 条链路故障的 mesh 交换式网络进行了仿真。



## 2 三种光传网络的拓扑结构

目前，基于光传操纵的航电系统，其网络互连方式主要采用的是光纤通道 (FC) 协议<sup>[9, 10]</sup>。光纤通道技术具有传输速度快、延时低、传输距离远和可靠性高等特性，为上层通信协议提供了一种通用的高速率的数据传输通道。光纤通道定义了三种基本的光传网络的拓扑结构，分别是点到点网络、仲裁环网络和交换式网络。

### 2.1 点到点网络

点到点网络的结构非常简单，一对终端设备 (TP) 的端口通过双向链路直接连接。点到点网络给通信的两个设备提供了最大带宽的专用连接，可靠性最高、实时性最好，但由于独享链路，造成带宽资源极大的浪费，在实际系统中较少使用。

### 2.2 仲裁环网络

仲裁环网络是将两个以上的终端设备，通过将它们的端口依次连接起来形成一个环形结构，并通过优先权高低的判定来赋予环路控制权的拓扑结构，见图 1(a)。

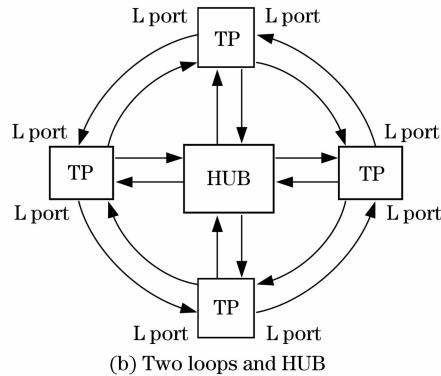


图 1 仲裁环网络

Fig. 1 Arbitrated loop network topology

在仲裁环网络中，由于共享链路，一段时间内只能允许两个接入设备进行通信，系统实时性不高；而且一条链路的故障会造成整个环路的失效，系统的可靠性也较差。为了提高系统的实时性和可靠性，可以通过加上一个逆向环和在环的中心处加入 HUB 形成星型结构，在逻辑上构成一个冗余环的方法来改善原有拓扑，见图 1(b)。一个仲裁环上，最多接入 127 个终端设备，因此这种拓扑结构适合较小型的网络。

### 2.3 交换式网络

交换式网络是以一个交换机或多个交换机组成的 mesh 交换网络作为中心结构，终端设备通过端口接入这个中心结构的星型网络拓扑结构，见图 2。

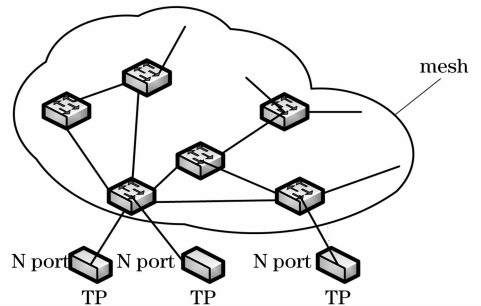


图 2 交换式网络

Fig. 2 Switching network topology

在交换式网络中，链路带宽非共享，终端设备之间通信基本不需要仲裁，多个设备之间可以同时建立连接，实时性较好。通过 mesh 交换网络，终

端设备之间的通信有多条路由可以选择,可靠性也较高。更进一步,可以通过设计 mesh 交换网中节点之间连接的冗余度,加强网络的容错性,进一步保证通信的可靠性。目前,交换式网络最多可连接 1600 万个设备,可实现大规模的互连,有足够的力量接入飞控系统的所有终端设备。

### 3 发生故障下 mesh 交换网络的实时性通信

将 WDM 网络作为光传网络应用于航电系统,进行飞行控制信息等关键性数据的传输,甚至进一步将其应用于军事化的航空领域,要求网络具有高可靠性和容错度。虽然交换式网络需要加入额外的交换设备,成本较其他两种网络高,但是它的功能

非常强大,而其他两种网络并不能很好地适应航电系统的需要,尤其在高端的应用中网络的可靠性和实时性达不到要求。采用 mesh 交换式网络拓扑结构,通过增加节点间连通的冗余度来达到容错度的要求,能很好地保障可靠性。在航电系统的关键性应用中,要求发生三处故障时仍能工作,因此可采用度为 4 的 mesh 交换式网络将设备互连。选择一个具有 256 个交换节点的全连通 mesh 交换式 DWDM 网络,每条链路上具有 1 Tb/s 的传输能力,每个节点都有 4 条链路与其他节点相连,终端设备通过汇聚点(AG)或直接与 mesh 网中的交换节点相连。Mesh 交换式网络节点的逻辑连接阵列可以采用  $4 \times 64$  或  $16 \times 16$  的结构,如图 3(a), (b)所示。

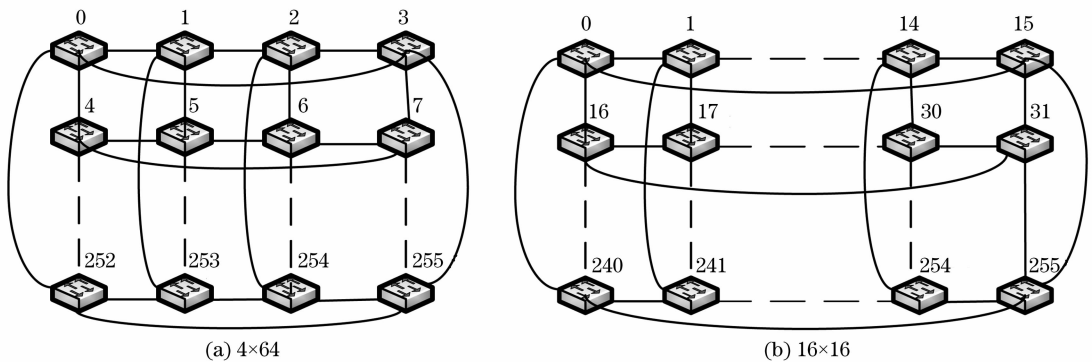


图 3 256 节点 mesh 交换式网络

Fig. 3 Mesh switching network topology with 256 nodes

假设网络中的故障都是由于链路断裂造成的。一旦发生故障,节点的连通度降低,原有的一些通信路径因为要绕过故障点进行重路由,会使经过的跳数增多,给终端设备之间的实时通信造成一定的影响。为了考察这种影响的严重程度,模拟网络中未发生故障,随机发生 1 处故障,随机发生 2 处故障,随机发生 3 处故障这三种情况,对图 3(a), (b)所示的两种逻辑拓扑结构进行仿真测试,比较终端通信设备之间的通信路径的跳数变化,得到的结果如图 4(a), (b), (c), (d)所示

由图 4 可见,即使是在发生 3 处故障的情况下,网路仍可保持全连通,并且通信路径的跳数增长不大,因此实时通信的影响不大。进一步进行分

析,当网络中发生 3 处故障时,如果 3 条断裂的链路在网络中是分散的,则对终端设备的通信路径跳数影响不大;但如果故障发生区域比较集中,甚至是与同一个节点的相连几条链路同时发生断裂,则会造成小范围内的节点的连通度大大下降,经过该节点重路由时可供选择的链路数太少,可能使重路由的跳数急剧上升,给终端设备之间的实时通信造成较大的影响。考察这些故障的发生情况,模拟 3 条断裂链路分散在网络中,3 条断裂链路中 2 条在同一节点上,3 条断裂链路都在同一节点上,比较终端通信设备之间的通信路径的跳数变化,同样对图 3(a), (b)所示的两种逻辑拓扑结构进行仿真测试,结果如图 5(a), (b), (c), (d)所示。

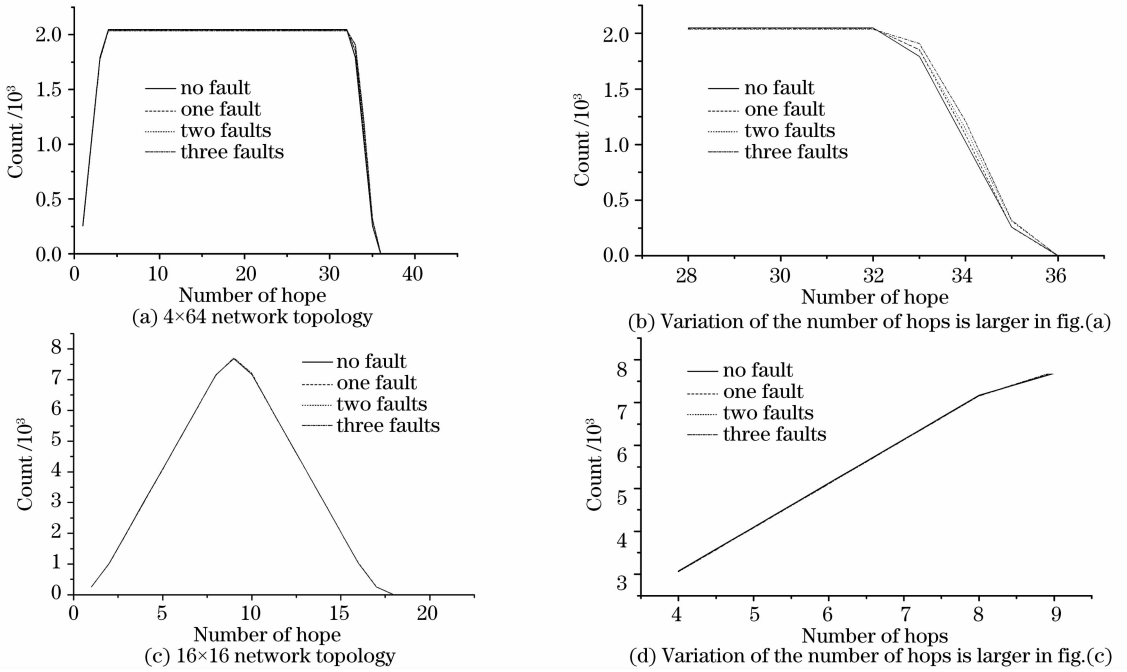


图 4 256 节点 mesh 交换网络出现错误对通信路径跳数的影响

Fig. 4 Faults occurred in switching network topology with 256 nodes effect on the number of hops

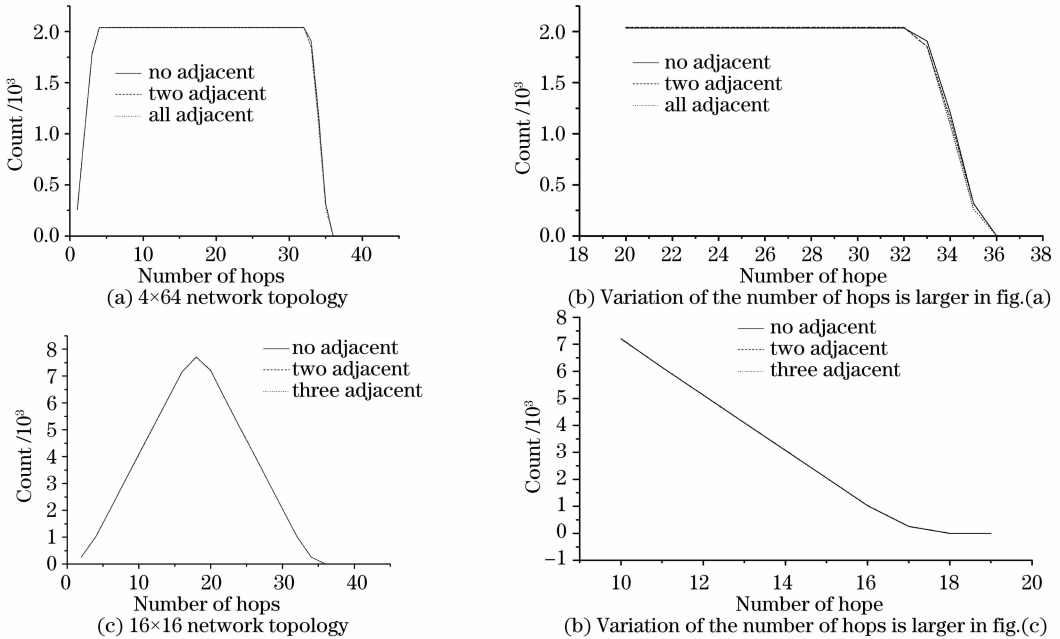


图 5 6256 节点 mesh 交换网络出现 3 处错误的邻接情况对通信路径跳数的影响

Fig. 5 Adjacent at three faults occurred in switching network topology with 256 nodes effect on the number of hops

从图 5 可见，错误的邻接程度不同时，通信路径跳数的增长确实有一些差异，但总的相差不大。一般来说，当 3 处错误发生在同一个节点上时，跳数的增长略大。

采用图 3(a), (b) 所示两种网络拓扑结构，对上述的每种情形分别进行 100 次仿真。取 100 次试验结果的平均值，得到各种情况下网络中每两点间通信路径的跳数之和的变化，如表 1 所示。

表 1 256 节点 mesh 交换网发生不同错误时通信的总跳数和增长率

Table 1 The number of hops and growth rate when faults are occurred in switching network topology with 256 nodes

Faults	4×64 network		16×16 network	
	Number of hops	Growth rate/%	Number of hops	Growth rate/%
No fault	1114112	0	524288	0
One fault	1116076	0.176	524400	0.021
Two fault	1118167	0.364	524515	0.043
Three faults (no adjacent)	1120191	0.546	524630	0.065
Three faults (two adjacent)	1118310	0.377	524791	0.096
Three faults (all adjacent)	1116598	0.223	524988	0.134

从表 1 可见, 随着发生的错误情形一步步严重, 整个网络通信的总跳数也呈增长趋势, 但从增长率来看都并不大。因此, 当发生错误时, 平均每一条通信路径因为重路由而带来的额外延时很短, 能保证通信的实时性。同时可见, 交换网络的拓扑结构的差异也会给通信的实时性造成影响, 采用 16×16 拓扑结构, 网络未发生错误时延时及发生各种错误时延时的增长率都比 4×64 的网络小, 前者网络通信的实时性比后者好。

## 4 结 论

对面向飞控系统的光传网络的可靠性和实时性进行了研究。比较三种网络拓扑结构的性能, 得出 mesh 交换网络是最为符合要求的拓扑结构。通过设计 mesh 网络节点的冗余度, 提出了一个包含 256 节点, 每个节点的连通度都为 4 的 mesh 交换网络, 保证了网络的可靠性。针对模拟网络中发生 1 处, 2 处, 邻接度不同的 3 处错误的情形, 对 256mesh 交换网 4×64 和 16×16 的两种拓扑结构进行了仿真。仿真结果表明, 错误对网络实时性影响不大, 且采用后一种网络拓扑的实时性要优于前者。

## 参 考 文 献

1 Sui Yuhang. An overview on fly-by-light (FBL) [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(6): 35~38  
 随予行. 光传操纵系统综述[J]. 光电子技术与信息, 2002, **15**(6): 35~38

2 Li Kun, Wang Shoping. Development of fly-by-light control system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(12): 1068~1072  
 李 昆, 王少萍. 光传操纵系统的发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, **29**(12): 1068~1072  
 3 Huang Haoyi, Huang Dongshan, Xu Xiaofei. An application of fibre channel technology to avionics system [J]. *Avionics Technology*, 2005, **36**(3): 9~14  
 黄浩益, 黄栋杉, 徐晓飞. 光纤通道技术在航电系统中的应用[J]. 航空电子技术, 2005, **36**(3): 9~14  
 4 Zhang Yidong, Yang Yidong, Zhang Shukun. Research on ultrahigh-speed real-time fly-by-light system [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2006, **36**(5): 1~4  
 张益东, 杨一栋, 张树坤. 超高速实时光传操纵系统研究[J]. 航空计算技术, 2006, **36**(5): 1~4  
 5 John Mazurowski, Michael Hackert, Sarry Habiby *et al.*. Progress in the devlopment of a mil/aero WDM backbone standard [C]. *IEEE Avionics Fiber-Optics & Photonics Conference*, 2005, 1~2  
 6 Sarry F. Habiby. Advances in WDM LAN standards development for aerospace applications[C]. *IEEE Avionics Fiber-Optics & Photonics Conference*, 2006, 20~21  
 7 Brent K. Whitlock, Henrik N. Poulsen, Dwight H. Richards *et al.*. Physical-layer modeling and simulation of WDM fiber optic network architectures for aerospace platforms [C]. *IEEE Avionics Fiber-Optics & Photonics Conference*, 2006, 26~27  
 8 Henrik N. Poulsen, Dwight H. Richards, Anil Ramapanicker *et al.*. Network layer modeling of WDM fiber optic network architectures for aerospace platforms[C]. *IEEE Avionics Fiber-Optics & Photonics Conference*, 2007, 60~61  
 9 Xu Yajun, Zhang Xiaolin, Xiong Huagang. Study on reliability of FC fabric in avionic [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(2): 402~406  
 徐亚军, 张晓林, 熊华钢. 航空电子系统 FC 交换式网络的可靠性研究[J]. 航空学报, 2007, **28**(2): 402~406  
 10 Zeng Wei, Xu Mingwei, Wu Jianping. Survey of network topology models[J]. *Application Research of Computers*, 2005, **22**(7): 1~4  
 曾 伟, 徐明伟, 吴建平. 网络拓扑模型述评[J]. 计算机应用研究, 2005, **22**(7): 1~4