

基于FC over WDM架构的航电网络研究

黄金, 凌云, 邱昆

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731)

【摘要】面向航空电子应用的FC网络是一种具有确定性和实时性的通信网络。由于WDM具有轻质、高容量、多协议透明传输等多种优点,以波分复用为特征的先进光网络已经成为未来航空机载网络的技术选择目标。针对航空电子网络发展趋势,提出一种基于FC over WDM的航电光纤网络架构。该架构兼容了航电系统对延迟确定性和带宽可扩展性的需求,可实现对现有FC航电光纤网络的平滑升级。通过采用自主研发的FC仿真卡建立地面仿真环境对该架构进行实验仿真,从功能和系统性能两个方面验证了在航电光纤网络中引入WDM和光交换技术的合理性。

关键词 航空电子; 光纤通道; 光通信; 波分复用

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.005

Research of Avionic Network Based on FC over WDM Architecture

HUANG Jin, LING Yun, and QIU Kun

(Key Laboratory of Broadband Fiber Transmission and Communication Networks,
University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract The Avionic oriented Fibre Channel network is a real-time and deterministic communication network. Optical network with wavelength division multiplexing (WDM) transmission technology has been targeted as the technology of choice to realize the desired avionic network of the future due to its lightness, high-capacity and transparency to multi-protocols. Based on the trend towards avionic network, we propose a fiber channel (FC) over WDM architecture on avionic network. The delay deterministic of FC and the bandwidth extensibility of WDM are integrated to satisfy the communication requirements of avionic network, and the existing avionics FC network can be seamlessly upgraded. We establish an FC over WDM ground experimental environment based on independently developed FC emulator, and the experimental results on functional verification and system performance analysis indicate that the adoption of WDM and optical switching in avionics fiber-optic network is feasible.

Key words avionics; fibre channel; optical communication; wavelength division multiplexing

机载网络被认为是飞机的“中枢神经”。没有先进的航空电子系统,就没有先进的作战飞机^[1]。机载光纤通道(fiber channel, FC)网络以其高可靠、低成本、高速率、强实时性、可扩展性好等优点,已经成功用于F-16、F-22、F-35/JSF等机型,成为航电网络设计的主流选择^[2-3]。

由于机载设备和传感数据处理的通信需求,机载网络的单端口带宽要求将达到10 Gb/s,即达到小数据中心的容量^[4]。当前机载FC交换机主要采用电处理和交换。随着交换容量的增长,采用电分组交换的机载FC网络必将会遭遇电子瓶颈。

WDM光网络具有轻质、高容量、多协议透明传

输等优点,以波分复用为特征的光网络已成为未来航空机载网络的技术选择目标。由美国国防部高级计划署(DAPPA)赞助的RONIA项目研究结果表明,在航电系统中引入光网络的必需性^[5]。航空环境下WDM LAN的标准由SAE(society of automotive engineers)的航空系统部(avionics systems division, ASD)制定^[6-7]。将WDM光网络引入机载平台,可充分借鉴现代电信网络中设计与实现结构紧凑、轻质的网络平台所使用的光学技术,并借助以前的组件开发,构建新一代的航电光网络^[8-10]。

FC作为一种航电系统的通信协议,它自身的流控机制可以保证航电系统要求的延迟确定性,而

收稿日期: 2013-11-21; 修稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61101095); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2011J009); 航空科学基金(20111931001)

作者简介: 黄金(1984-),女,博士,主要从事机载光网络方面的研究。

WDM作为一种传输层技术,不会对FC业务产生影响,而且随着波长数目和传输带宽的增加,有助于降低FC数据的发送等待延迟。在航电光纤通道网络中引入波分复用和波长交换技术,在保持原有光纤通道传输方式的基础上,既保证了航电网络的延迟确定性要求,又提高了网络带宽和灵活性。因而,本文提出了一种FC over WDM的航电网络架构,并给出了具体的系统设计方案。

1 FC over WDM系统设计

如图1所示,将FC协议数据承载于WDM波长通道上采用全光交换技术(波长交换),避免了传输过程中的拆帧和组帧。同时,由于每个波长信道可以传输不同的数据流,它作为共用网络不仅可以支持FC协议数据,还能够支持音频、视频,乃至模拟信号的通信服务等。FC over WDM 利用了WDM网络的扩展性,无需更改系统中已经铺设的光纤,通过增加光模块可进行波长数目和传输速率的平滑升级;

同时保留了光纤通道在高可靠性和强实时方面的优势,是在不同连接传输层上对光纤通道的一种拓展。

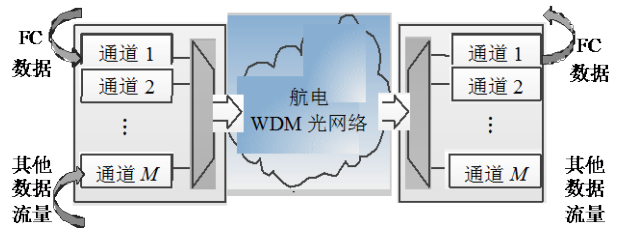


图1 基于FC over WDM的航电网络

由于航电环境有140℃(-40℃~100℃)的温度波动范围^[11],为了避免工作波长漂移,一般要求较大的波长间隔以消除波长间串扰。因而,在航电环境中采用粗波分复用(CWDM)较为合适。同时,由于波长交换器件的成熟度和商用化程度,波长交换在航电系统中具有很大的应用优势^[12]。

FC over WDM系统由N个光网络接入点和1个光交换节点OBN组成,采用粗波分复用技术和波长交换技术,从而实现网络的互连,如图2所示。

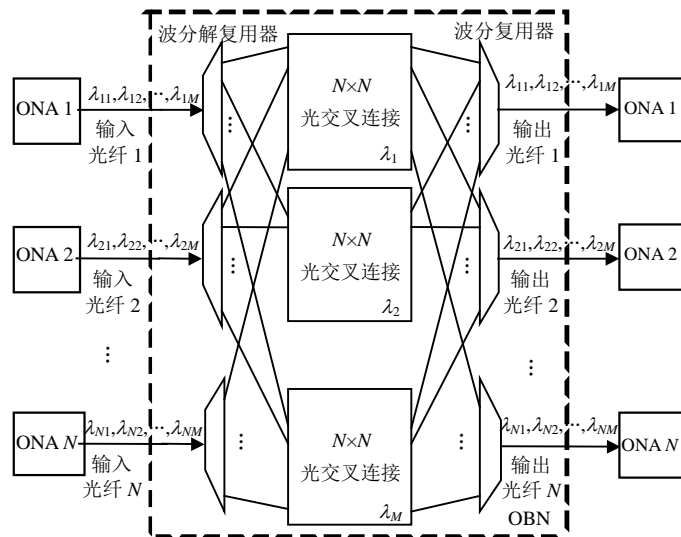


图2 FC over WDM 系统组成结构图

1.1 光交换节点(OBN)的组成

系统中交换节点主要由2×N个波分复用/解复用器、M个光交叉连接器(OXC)和光纤跳线组成,如图2虚线框内所示。

输入光纤经过光解复用器分离出不同的波长通道,分别输入到相应的交换平面;各交换平面通过配置光交叉连接器(OXC),完成波长输入输出端口之间的交叉连接;最后到达同一输出端口的不同波长经过光波分复用器输出到输出光纤中。

1.2 光网络接入点(ONA)的组成

系统中光网络接入点由计算机、FC网络数据仿

真卡、光收发模块和两个波分复用/解复用器组成,如图3所示。

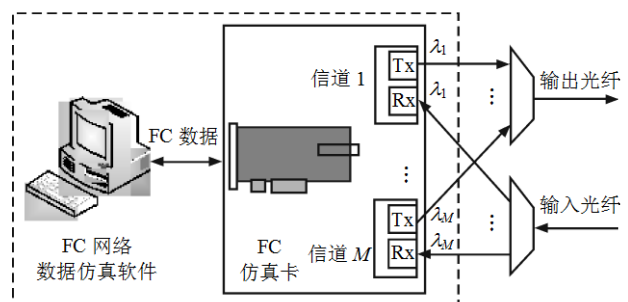


图3 ONA节点示意图

FC网络数据仿真卡作为航电系统的地面仿真模块具备遵从FC协议的数据产生/仿真功能, 可提供与此相关的地面仿真调试环境, 模拟实现系统中各节点间的通信互连, 用于机载网络设计和验证。FC网络数据仿真卡支持 $\lambda_1 \sim \lambda_M$ 共计 M 个波长通道, M 个波长通道的光发射端经过波分复用器耦合到输出光纤; 输入光纤经过波分解复用器分离后输入到对应波长通道光接收端。计算机运行仿真测试软件, 用于产生和接收 M 个波长通道的测试数据。

2 FC over WDM实验平台搭建

根据现有条件, 搭建的测试验证实验平台如图4所示, 4个光网络接入点(ONA), 支持两个波长通道 λ_1 (1 310 nm) 和 λ_2 (1 550 nm); 采用Lynx公司的 $2 \times (4 \times 4)$ 高速光开关构成光交叉连接器(OXC), 并与光波分复用/解复用器组成光交换节点。它支持 λ_1 和 λ_2 两个波长交换平面, 每个平面为 4×4 交换。由一台控制计算机作为光交换节点的控制器, 进行光交叉连接器的配置。采用自主研发的基于PC环境下的FC网络仿真卡, 它满足FC协议标准, 支持FC-AE-ASM协议、2个独立的仿真端口, 并支持2.125 Gb/s的光纤通道链路速率。FC仿真卡通过PC机主板的PCIE接口接入到PC机中, FC网络数据仿真系统软件接收用户应用系统加载的应用数据, 产生FC网络数据, 驱动FC网络数据仿真卡根据FC协议发送和接收FC帧进行通信仿真。

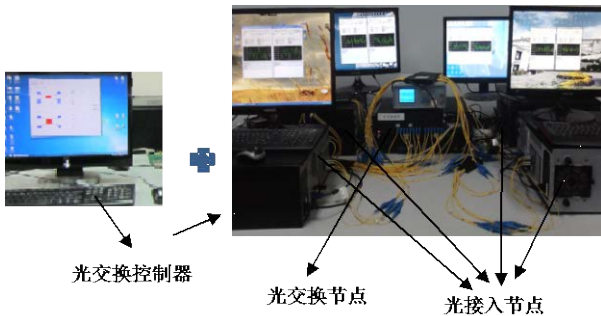


图4 FC over WDM实验验证平台

2.1 功能验证

2.1.1 波长路由

假设ONA 1和ONA 3、ONA 2和ONA 4节点对之间需要在1 310 nm和1 550 nm两个波长平面上进行全双工的通信。光交换节点的控制器配置光开关如下: 1 310 nm波平面(1-3)、(2-4); 1 550 nm波平面(1-3)、(2-4)。系统各节点经过一段时间的通信, ONA节点的发送与接收FC帧数目如表1所示。实验结果显示各波长通道平面上的各通信节点对的发送接收

帧数目一致, 系统无误码或丢帧。

表1 ONA节点发送接收FC帧数目统计表

波长/nm	连接	ONA序号	发送帧数目/帧	接收帧数目/帧
1 310	1-3	1	3 339 297	3 722 650
		3	3 722 650	3 339 297
	2-4	2	3 399 297	3 508 938
		4	3 508 938	3 399 297
1 550	1-3	1	3 527 478	3 450 951
		3	3 450 951	3 527 478
	2-4	2	3 465 972	3 469 075
		4	3 469 075	3 465 972

2.1.2 波长交换

如图5a所示, 光网络接入点1和2、1和1之间分别采用波长 λ_1 和波长 λ_2 进行连接; 经过光交换节点配置, 切换到如图5b所示光网络接入点1和1、1和2之间用波长 λ_1 和波长 λ_2 进行连接。

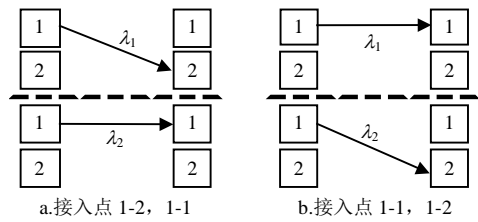
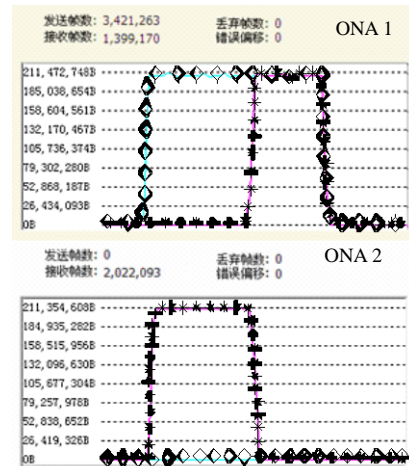


图5 波长通道切换示例

节点通信监测结果如图6所示, 节点1在通信过程中通过波长通道1和2共计发送FC帧数目为3 421 263帧和7 803 089帧。光开关切换前后, 分别在两个波长平面上节点1和节点2接收FC帧的数目之和与对应的发送FC帧数目相等。采用Lynx的光开关切换速度(ns量级)足够快, 因而实验过程中波长通道的切换没有导致帧错误或丢帧, 成功切换波长通道的连接验证了光交换功能。

按照FC协议规定, FC数据帧的有效载荷为2 096/2 148 B, 经过8b/10b编码, SFP光接口实际传输有效速率为212.33 MB/s。如图6所示, 两个波长通道的数据发送接收速率与该数据一致。



a. λ_1

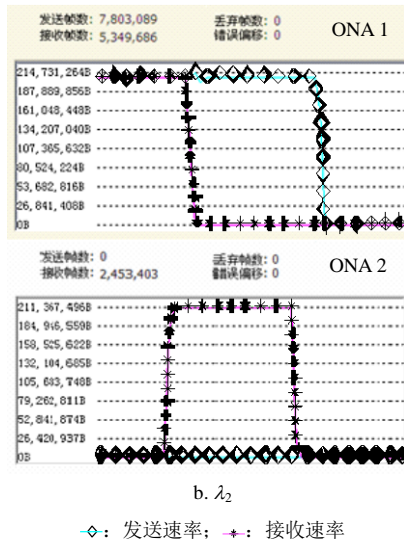


图6 ONA节点FC帧发送接收截图

2.2 系统性能测试

采用两个波长复用后，实验系统容量为17 Gb/s，是复用前的两倍；采用静态路由配置光路，消息端到端的延时等于其传输时间(小于1 μs)。下面就功率预算和串扰分析两方面对系统性能进行研究与测试。

2.2.1 功率预算

在系统中，SFP光模块、MUX/DEMUX、OXC、连接器以及光纤跳线等的引入会带来一定的功率损耗。在光功率预算中最重要的任务是确定链路功率富余度，以用于补偿器件老化、温度波动等引起的额外的损耗，通常系统应有6~8 dB的链路功率余量。通过对实验系统中各个光器件的插入损耗测试，得到光功率预算如表2所示。光功率余量值为：

$$R = P_t - P_r - (L_{mux} + L_{oxc} + L_{dmux} + L_{fiber} + L_{connector}) \quad (1)$$

从表2可得到，FC over WDM实验系统中有14 dB的光功率余量，可以确保信号的正确传输。

表2 光链路功率预算表

器件损耗参数/dB	输出/灵敏度/损耗	功率富余度
1 310 nm/1 550 nm SFP TX	1~3 dBm	
1 310 nm/1 550 nm SFP RX	-26.5~-25.5 dBm	
允许损耗典型值[2-(26)]		28
跳线+连接器损耗	<2 dB	26
MUX 插入损耗	<1 dB	25
OXC 插入损耗	<10 dB	15
DEMUX 插入损耗	<1 dB	14(最终光功率余量)

2.2.2 串扰分析

1) OXC串扰测试模型

信道串扰是影响WDM系统性能的最重要的因素之一。机载平台尺寸一般不超过两百米，系统中无需引入光放大器。在此仅需考虑构成OXC节点的

器件带来的线性串扰对系统性能的影响。由于光开关的隔离度和波分复用/解复用器的非理想特性，在光交换节点会产生相应的相干串扰和非相干串扰。目前器件的串扰水平都小到足以将1阶以上的串扰忽略不计^[13]。图7给出了OXC串扰模型。假设系统是满载的，DEMUX/MUX端口数为M，OXC端口数为N，则DEMUX对于波长i的串扰为 $\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} P_j$ ；OXC在输出端口i的串扰为：

$$\left(\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} P_j - L_{oxc} \right) + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} (P_j - L_{dmux})$$

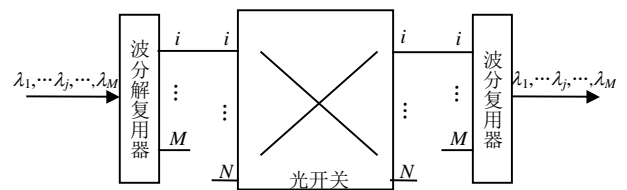


图7 OXC串扰模型

因而，在输出光纤中MUX输出总串扰功率为：

$$P_{crosstalk} = \left(\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} P_j - L_{oxc} - L_{mux} \right) + \left(\sum_{j=1}^N \beta_{ij} (P_j - L_{dmux}) - L_{mux} \right) + \sum_{j=1}^M \alpha_{ij} (P_j - L_{dmux} - L_{oxc}) \quad (2)$$

式中， L_{mux} 和 L_{dmux} 分别为波分复用器和波分解复用器的插入损耗； L_{oxc} 为OXC的插入损耗； P_j 为波长j的输入光功率； $\alpha_{ij} (\alpha_{ii} = 0)$ 为DEMUX/MUX中从波长j到波长i的串扰系数； $\beta_{ij} (\beta_{ii} = 0)$ 为OXC从端口j到端口i的串扰系数。

2) 系统信干比(SIR)模型——干扰门限值的确定

信干比定义为在输入端受到干扰时，输入信号光功率 P_s 和干扰信号光功率 P_i 之比。信干比门限定义为在一定误码率条件下的信干比。只有当信号的信干比大于目标信干比门限 SIR_0 时，即：

$$SIR = P_s / P_i \geq SIR_0 \quad (3)$$

才能保证该波长通道的的误码率小于目标值；否则，会出现误码或丢帧过大，从而导致承载FC协议数据的波长通道失效。因而，确定目标信干比，即确定系统的干扰门限非常必要。

因而，对于FC over WDM系统中的任一波长通道 λ_{mm} ，将式(2)代入式(3)：

$$SIR = \frac{P_s}{P_i} = \frac{P_{nm}}{\left(\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} P_{nj} - L_{oxc} - L_{mux} \right) + \left(\sum_{j=1}^N \beta_{ij} (P_{jm} - L_{dmux}) - L_{mux} \right) + \sum_{j=1}^M \alpha_{ij} (P_{nj} - L_{dmux} - L_{oxc})} \geq SIR_0 \quad (4)$$

即可保证信号不受干扰信号的影响(在假设每个波长通道光发射机输出光功率相同的情况下, 结合实验设备参数, 计算出后面的输入光功率要求)。

SIR门限值由ONA中的光接收机性能决定, 其测试方法如图8所示, 将发送端2作为干扰信号干扰发送端1, 调节发送端2对应的光可调衰减器使得干扰信号由弱变强, 直至FC仿真卡接收端1出现 10^{-12} 的误码。记录当前A点的信号光功率 P_s 和B点干扰信号光功率 P_i 。

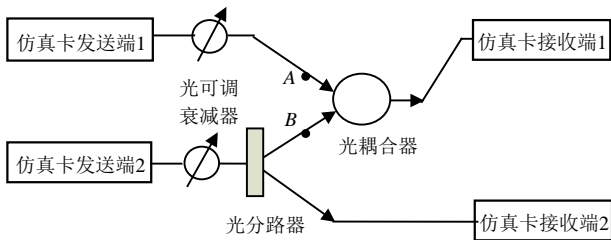


图8 信干比测试原理图

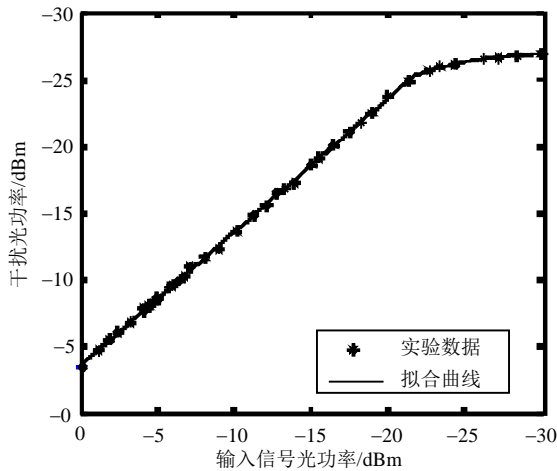


图9 信干比曲线图

采用该方法对实验系统中的Finisar公司FTRJ-1419/1519系列型号光接收模块进行测试, 得到的40组数据对 (P_s, P_i) 进行数据拟合得信干比曲线如图9所示。由于接收端1的光探测器灵敏度约为 -26 dBm, 光耦合器的插入损耗为 5 dB, 因此, 当A点输入信号光功率小于 -21 dBm时, 接收端1的信号光功率已经低于其光探测器的灵敏度, 导致信号被接收机噪声淹没, 无论怎样降低(干扰信号的光功率), 都无法正确恢复发送端1的光信号; 当A点输入信号光功率大于 -21 dBm时, 由图9可得信干比门限为 3.5 dB。

3) 串扰实验测试

在搭建的平台中, 各SFP模块的发射端输出光功率约为 2 dBm, 接收灵敏度约为 -26 dBm。器件隔离度参数为: $1\ 310$ nm波长平面光开关平均隔离度约为 30 dB, 而 $1\ 550$ nm光开关的平均隔离度优于 50 dB; 波分复用/解复用器的隔离度约为 40 dB。

测试得到: 在 $1\ 310$ nm波长平面, 只要保证发射端输出光功率大于 -7.12 dBm, 即可保证信号不受干扰的影响。与结合表2和式(4)得到的理论值 -7.5 dBm基本一致; 在 $1\ 550$ nm波长平面, 由于光开关和复用器的隔离度高, 只要保证发射端输出光功率大于 -12 dBm使得接收光功率大于接收端灵敏度, 即可保证信号的正常传输。

3 结论

在已有的WDM光交换技术和航电光纤通道技术研究的基础上, 进行以WDM光交换技术为特征的、新型航电网络技术研究。通过设计并搭建FC over WDM实验平台, 从功能和系统性能两个方面验证了在航电光纤网络中引入WDM和光交换技术的合理性。实验研究结果为实现从目前单波长通道的机载光纤通道网络向传输容量增加、多波长光交换技术代替传统的电交换的基于WDM的新一代航电光网络提供了理论依据和重要指导。

参 考 文 献

- [1] 韩双利, 赵尚宏, 底翔. 新型战机综合航电系统及其高速光互连技术[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(3): 50-55. HAN Shuang-li, ZHAO Shang-hong, DI Xiang. Integrated avionics in new fighter airplane and its high speed interconnection technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(3): 50-55.
- [2] TR-INCITS. FC-AE(Fibre channel avionics environment) Rev2.6[S].[S.1.]: TR-INCITS, 2002.
- [3] MIKE G. High-speed 1 760 and FC-AE-1553 pave upgrade path for 1 553[J]. Journal of Military Electronics & Computing, 2009, 11(6): 18-28.
- [4] COLLIER C P. Next generation spacecraft interconnect standard (NGSIS)[C]//Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). San Diego, USA: IEEE, 2011: 63-64.
- [5] HABIBY S F, HACKERT M J. RONIA Results: WDM-based optical networks in aircraft applications[C]// Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). San Diego, USA: IEEE, 2008: 71-72.

- [6] HABIBY S F, VAIDYANATHAN R. WDM optical backbone networks in aircraft applications: Networking challenges and standards progress[C]//Military Communications Conference (MILCOM 2009). Boston, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [7] HABIBY S F, MAZUROWSKI J S. SAE standards for WDM LAN: Optical network architecture, access, control and physical layer standards[C]//Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). Cocoa Beach, USA: IEEE, 2012:1-2.
- [8] SUEN J F. Affordable avionic networks with gigabit ethernet assessing the suitability of commercial components for airborne use[C]//Proceedings of IEEE Southeast Con 2013. Jacksonville, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [9] BARTON J S, MAŠANOVIĆ M L, JOHANSSON L A. Tunable transceiver technologies for avionics applications [C]//Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). Cocoa Beach, USA: IEEE, 2012: 36-37.
- [10] CHARLTONI D W, PROUDLEY G, WHITE H J, et al. An avionic gigabit Ethernet network[C]//Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). San Diego, USA: IEEE, 2013: 17-18.
- [11] CHAND N, ETESON B. Optical LAN for avionics platforms[C]// Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP). San Antonio, USA: IEEE, 2009: 42-43.
- [12] 寇明延, 赵然. 现代航空通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- KOU Ming-yan, ZHAO Ran. Modern aeronautical communications technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [13] 陈丹, 何对燕, 侯睿. 多波长光交叉连接节点的优化设计[J]. 光通信研究, 2002(3): 5-10.
- CHEN Dan, HE Dui-yan, HOU Rui. Optimized Design of Multiwavelength optical cross-connect[J]. Study on Optical Communication, 2002(3): 5-10.

编辑 张俊

(上接第816页)

- [4] IORDACHE M D, BIOUCAS-DIAS J M, PLAZA A. Collaborative hierarchical sparse unmixing of hyperspectral data[C]//IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012: 7488-7491.
- [5] IORDACHE M D, BIOUCAS-DIAS J, PLAZA A. Collaborative sparse regression for hyperspectral unmixing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 341-354.
- [6] KESHAVA N. Distance metrics and band selection in hyperspectral processing with applications to material identification and spectral libraries[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7): 1552-1565.
- [7] CHEN De-rong, SUN Bo, TAO Peng, et al. Spatial neighboring clustering method for hyperspectral imagery based on kernel spectral angle cosine[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1992-1995.
- [8] CASTRODAD A, ZHENG Ming-xing, GREER J, et al. Discriminative sparse representations in hyperspectral imagery[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Hong Kong, China: IEEE Press, 2010.
- [9] CHEN Yi, NASRABADI N M, TRAN T D. Hyperspectral image classification using dictionary based sparse representation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3973-3985.
- [10] ECKSTEIN J, BERTSEKAS D. On the Douglas-Rachford splitting method and the proximal point algorithm for maximal monotone operators[J]. Mathematical Programming, 1992, 55(1-3): 293-318.
- [11] HEINZ D C, CHANG C I. Fully constrained least squares linear mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 529-545.

编辑 张俊