

400 Gbit/s 光模块的技术浅析

匡杨^{1,2}, 胡毅^{1,2}

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着 IEEE 802.3ba 标准的制定完成, 100 Gbit/s 以太网技术已经得到验证并标准化。400 Gbit/s 以太网和 OTN(光传输网)标准成为了下一步人们关注的焦点。文章基于现行 100 Gbit/s 标准, 讨论了双载波偏振复用的 16QAM(正交幅度调制)、阵列相干探测等以太网和 OTN 的 400 Gbit/s 光网络模块相关技术。

关键词: 400 Gbit/s 以太网; 双载波偏振复用 16 正交幅度调制; 阵列相干探测

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2012)01-0041-05

Analysis of 400 Gbit/s optical module technologies

Kuang Yang^{1,2}, Hu Yi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Telecommunication Device Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: With the formulation of IEEE802.3ba standard, 100 Gbit/s Ethernet technologies have been verified and standardized and 400 Gbit/s Ethernet and OTN standards become the next focus of concern. This paper discusses the relevant technologies, such as 2SC-DP-16QAM, coherent-detection array, for 400 Gbit/s Ethernet and OTN optical modules on the basis of the current 100 Gbit/s standard.

Key words: 400 Gbit/s Ethernet; 2SC-DP-16QAM; coherent-detection array

0 引言

随着 IEEE 100 Gbit/s(以下简称 100 G)以太网标准讨论与制定工作的结束, 全球主流厂商正在推动 100 G 的全球部署, 并把目光聚焦到 400 G 甚至 1 Tbit/s 系统上来。同 40 G/100 G 一样, 400 G 的部署应该是渐进的方式。为了更有效地利用现有的 DWDM(密集波分复用)线路资源, 降低投资成本, 运营商希望 400 G 能在现有的网络上部署, 而不是重新设计和建造一个新的网络以适应 400 G 的传输。这意味着 400 G 必须适应 100 G/40 G 或 10 G 的网络设计规划, 以实现 400 G、100 G/40 G 的混合部署。

1 400 G LAN 接口光模块的技术分析

400 G LAN(局域网)接口光模块可能将继续采用 100 G 以太网中独有的并行传输方式。2011 年 2 月, Finisar 在“超越 100 GE”的研讨会上提出了 400 GE 模块标准建议, 主要支持 400 GE-LR16 和 400 GE-SR16 两种应用。其中 400 GE-LR16 采用 16×25 G LAN WDM(1 330、1 310、1 290 和 1 270 nm 4 个波道)来实现, 而 400 GE-SR16 则采用了 16×25 G 多模光纤接口。此外在物理层定义

了 CAUI(附加单元接口)-16、CPPI(并行物理接口)-16 电接口标准。16×25 G 仅仅是 100 GE 的线性扩展, 只要工艺达到要求就没有其他技术难点。相比之下, 光纤并行将有更多的发展空间, 但需要密度更高的光子集成技术的支持才可以使 400 G 商用成为可能^[1]。

此外, Finisar 还提出了 400 G LAN 应用的其他可能方式: 第 1 种是利用已商用化的 40 G 的 EML(电吸收调制激光器)技术组成 10×40 G 架构; 第 2 种是依靠提高 EML 技术, 采用 4 电平幅度调制和 DSP(数字信号处理)进行色散补偿的 8×50 G 的构架; 第 3 种是 4×100 G 的架构, 这种架构必须采用复杂的幅度相位调制, 如 PM-QPSK(偏振复用-正交相移键控), 目前还没有能够商用化的技术演示^[2]。

NTT 的研究报告也指出, 在串行数据传输中, 16×25 G、10×40 G 和 8×50 G 这几种架构都有可能。对于 50 G, 调制方式也有基于 MZ(马赫-曾德)的 DQPSK(差分正交相移键控)调制、或者 OOK(开关键控)调制。每种架构在体积、成本、功耗等方面都各有优缺点。从目前的研究成果来看, DML(直接调制激光器)制作工艺简单, 功耗低, 但是 ER(消光比)很小。EML 制作工艺复杂, 功耗相对

较大,但 ER 较大,可以获得很清晰的眼图。此外,基于 InGaAlAs 的量子阱 EAM(电吸收调制器)减小了由于价带偏移造成的在调制过程中的空穴堆积,因此适合用做高速调制。图 1~图 3 分别是 NTT 在 OFC 2011 上展示的用于 400 GE 的 1 300 nm、50 G EML 的光谱,注入电流与出纤功率的关系以及传输 10 和 40 km 后的输出眼图^[3]。

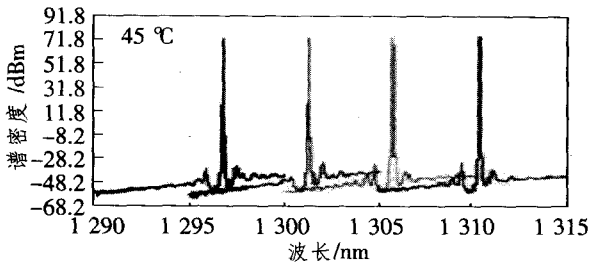


图 1 EML 光谱

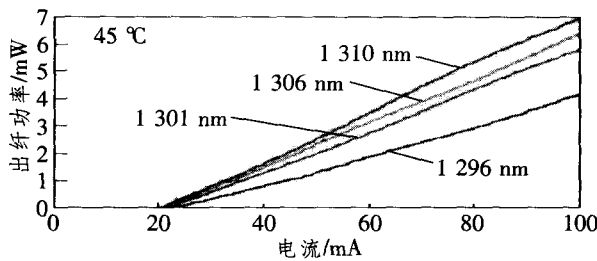


图 2 注入电流与出纤功率的关系

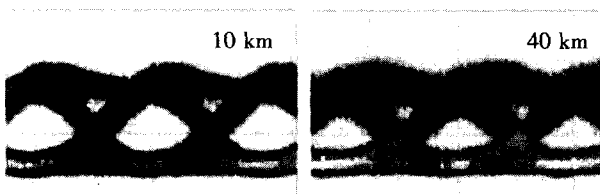


图 3 50 G 的输出眼图

对于 400 GE 系统而言,50 G 的 OOK 调制由于其整个发射端的体积优势,是一种比较好的折中选择。在这种调制方式下,DML 相比而言实现起来更加困难。因此可以预言,EML 和 8×50 G 的 OOK 调制在 400 GE 系统中前景看好^[3]。

2 400 G 长距离传输光模块的技术分析

在 ITU-T/IEEE 的联合研讨会中,Alcatel-Lucent 的报告中提出:OTU5 的接口线速率将达到 449.219 Gbit/s。随着速率的提高,系统对 OSNR(光信噪比)、CD(色度色散)、PMD(偏振模色散)和非线性的要求越来越高。400 G 信号的色散容限只有 0.5 ps/nm,为 100 G 的 1/16。400 G 在 OSNR 上也遇到了挑战,比 100 G 高了 6 dB。尤其采用高于现行的 7% 的 FEC(前向纠错)开销后,可以实现

更远距离的传输。目前讨论得更多的是 25% 的。400 G 在 PMD 方面比 100 G 遇到的挑战更大,400 G PMD 容限只有 0.25 ps,为 100 G 的 1/4^[4]。

2.1 激光器线宽的要求

随着数字相干接收技术的发展,高阶多电平调制格式由于其高频谱效率的特点在 DWDM 系统中越来越引人注目。发射机激光器和接收机本振光的相噪特性决定了系统的误码率性能。表 1 列出了在不同的调制格式下,400 G 和 100 G 对激光器线宽要求的比较^[4]。表中, Δf_{TX} 表示发射机激光器线宽, Δf_{LO} 表示接收机本振光线宽。

表 1 400 G 和 100 G 对激光器线宽要求的比较

子载波数	调制格式	线速率 /Gbit/s	Δf_{TX} (用于相位恢复)	Δf_{LO} (用于 CD 补偿)
100 G	1 DP-QPSK	28	Δf_{TX}	Δf_{LO}
	2 DP-16QAM	28	$0.06\Delta f_{TX}$	$0.25\Delta f_{LO}$
400 G	1 DP-16QAM	56	$0.25\Delta f_{TX}$	$0.25\Delta f_{LO}$
	1 DP-64QAM	37	$0.03\Delta f_{TX}$	$0.49\Delta f_{LO}$
4	DP-QPSK	28	Δf_{TX}	$0.25\Delta f_{LO}$

2.2 调制码型与波道间隔特征

为了满足 400 G 在当前 DWDM 系统中传输的要求,全面提升系统容量,对调制码型最重要的要求是:能够满足 SE(频谱效率)和 OSNR 灵敏度的要求,并且有非常强的非线性容忍度。

单模光纤的理论容量为 8 bit/s/Hz,在实际长距离传输的设备和光纤中,上限为 4 bit/s/Hz。在现代光通信系统中,载波调制格式对系统性能影响很大,为了达到与现网的 10 G、40 G 混合部署,实现 80 波 50 GHz 间隔,必须达到高 SE,这可以通过采用单载波高阶调制或者多载波传输来实现。对于 448 G 的传输系统,考虑器件频率漂移和 ROADM(可重构光分插复用器)非理想特性,要求实际中必须采用 45 G 的 32QAM(正交幅度调制)调制或者 28 G 的 PM(偏振复用)-256QAM。电域 OFDM(正交频分复用)也能够取代单载波调制,两者的 DSP 的复杂程度一样,但是 OFDM 由于循环前缀、前导符和训练符号开销等额外信息,通常比相应的单载波格式的 SE 要低。

为了尽量满足 50 GHz 的 DWDM 波道间隔,2010 年的许多理论研究都是采用多电平幅度调制,即 PM-256QAM,一共有 65 536 个星座点,相比 100 G PM-QPSK 而言,密度增加了 8 倍,并且对光噪声和 XPM(交叉相位调制)/SPM(自相位调制)非常敏感,传输距离非常短。从目前报道的单载波

高速 QAM 的演示情况看来,短期内在 448 G 传输中,无论是单载波 PM-256QAM 还是电 OFDM 的 32QAM,都还无法实现商用化。

第 1 种放宽 SE 要求的解决方法:摒弃 50 GHz WDM 间隔的硬性要求,如采用 56 G PM-16QAM 和灵活的 70~80 GHz 的 WDM 间隔,SE 为 6~5 bit/s/Hz,并且需要有足够多的 ROADM 系统支持。数据中心用户偏向于采用这种灵活的解决方案,而拥有大规模、多业务的网状网的电信运营商坚持采用 50 GHz 的间隔标准。为了兼容 50 GHz 的边界条件,可以采用逆复用 448 G 信道成两个 224 G 波长。28 G PM-16QAM 的调制方式可达到 4 bit/s/Hz 净 SE,相比 100 G PM-QPSK,加倍增大了 WDM 每根光纤的容量。另外,为了实现 10 G、

40 G/100 G 到 400 G 的无缝升级部署,对 WSS(波长选择开关)提出了可调带宽的要求。

第 2 种解决方法:用 32QAM 或者更高阶调制的低速光子载波正交复用来代替单载波 448 G 信号。这种方法被称为相干 WDM 或者相干光 OFDM。它与 DWDM 逆复用性质不同,因为它可以获得与特定调制格式下单载波相同的 SE 以及相干接收的 OSNR 容忍度。一个 448 G 的发射机可以用 10 个单独调制的正交光子载波。接收机可以分两组(每 5 个为一组)探测接收。从上述讨论看来,为了获得最高可能的子载波速率,可以在电域上进行处理,保持并行的光路数最小会是一个更实际且更经济的方案。表 2 列出了 OFDM 与单载波在 400 G 系统中的性能比较^[5]。

表 2 OFDM 与单载波在 400 G 系统中的性能比较

	OFDM	单载波
OSNR	相同(相干探测与载波数无关)	相同(相干探测与载波数无关)
线性失真	好(需循环前缀和单抽头频域均衡器)	好(需多抽头时域均衡器)
非线性容忍度	稍差(高 PAPR(峰均比))	好(无 DCF 时传输距离一样,CD 会造成 PAPR 上升)
载波相位和频率偏移	线宽为 100 kHz	线宽为 1 MHz
开销(除开 FEC 和帧头开销)	用于简单均衡的循环前缀,用于信号估计的导频符,用于相噪估计的导频符	非强制要求,但是可以提高稳定性和性能
硬件开销并行化	数模转换器(可选择)+ADC(模数转换器) 不明确	ADC 可能

由于相比单载波极高的灵敏度和优异的 CD/PMD 容忍度,多极化数字相干接收的 CO(相干光)-OFDM 变得越来越有前景而开始受到业界的普遍关注。在对未来基于 OFDM 调制的 400 G 光模块结构的探索中,主要有 3 种架构:基于 FFT(快速傅里叶变换)的 OOFDM(光正交频分复用)、全光 OFDM 和电光 OFDM。

传统的 OOFDM 采用基于 DSP/DAC 的 IFFT(快速傅里叶逆变换)的信号合成和 FFT 的解调,CD 和 PMD 容限可以通过插入的循环前缀或者保护间隔、训练符号获得提升,但是这样会造成 10% 或者 20% 的额外开销,并且会增加线速率。尤其是在需要周期 CD 补偿的传输线路中,基于 DSP 的多载波 OFDM 的传输性能会受到光纤非线性特性的限制。利用硅基 PLC(平面光波导)和 LN(铌酸锂)光波电路的混合集成技术,已经可以制作双载波的

QPSK(正交相移键控)调制器来实现单偏振态 100 G 的调制(25 G)以及双偏振态 111 G 调制(13.9 G)。考虑到发射机的复杂度,不像传统的基于 DSP 的 OFDM,子载波的个数必须比较少(一般为 2~4),因为子载波的数量较少可以有效降低 PAPR。此外,发射端也不需要 DSP 和 DAC。由于少量载波的使用,循环开销会导致额外的开销或者限制补偿能力。因为,我们需要在接收机采用基于 CD/PMD 补偿的线性滤波器。

全光 OFDM,必须插入 GI(保护间隔)用以提高 CD 和 PMD 容忍度,并且需要长的符号周期(很多子载波)用来抵消 GI 造成的开销,因此提出了电光 OFDM 的架构来解决这一问题,电光 OFDM 的架构可以满足更高速率的要求^[6]。表 3 列出了 400 G 系统中各种不同调制码型的性能比较。

表 3 400 G 系统中各种不同调制码型的性能比较

调制格式	波特率	间隔	频谱效率	传输距离	电带宽
SC-DP-256QAM	28 Gbaud/8 b/symbol	50 GHz	高	很短	中
SC-DP-64QAM	37 Gbaud/6 b/symbol	75 GHz	中	短	高
SC-DP-16QAM	56 Gbaud/4 b/symbol	75 GHz	中	中	很高
DC-DP-16QAM	28 Gbaud/4 b/symbol	75 GHz	中	中	高
FC-DP-QPSK	28 Gbaud/2 b/symbol	150 GHz	低	长	中

综上所述,由于采用了较少的子载波,全光 OFDM 有以下两个优点:不需要发射端的 DSP/DAC,具有相对较低的电、光复杂度;由于采用了较少的子载波,从而降低了信号的 PAPR,在有 CD 补偿或者低色散的光纤线路上,具有良好的非线性抑制能力。因此从成本、性能和实现的复杂度等来看,全光 OFDM 调制技术(2SC-DP-16QAM 格式)和灵活的波道间隔更能吸引光模块厂商的注意,它将在 400 G 商用早期扮演重要的角色。

3 400 G 检测技术

3.1 微光学及混合集成技术

由于 400 G 系统采用了更高阶的星座调制,在线路的接收端则需要更大量数字信号的解决方案。为了满足 $>17\text{dB}$ 的 CMRR(共模抑制比),混频失配损耗必须在 $1\% \sim 2\%$ 之间,PD(光探测器)响应度失配必须 $<10\%$ 。平衡接收要求所有的 PD 以及 TIA(跨阻放大器)具有良好的匹配特性,两 PD 之间的歪斜必须小。此外,多通道 PD 之间的歪斜和灵敏度的不平衡会降低接收机的 CMRR。TIA 也需要保持信号的良好线性度以实现 ADC 的纯数字化。

对于相干探测而言,采用分立的自由空间的 90° 混频器和光平衡探测器搭建相干接收系统,这种复杂的配置方法要实现商用化是很难的。从 2009 年的 ECOC 上,U2T 和 HHI 演示了单片集成的 PLC 90° 混频器和两对高速平衡 PD 的接收机,到 2010 年的 ECOC 上,U2T 和 HHI 再度演示了单片集成的两路 PLC 90° 混频器和 8 个高速平衡 PD 的接收机。从近几年 100 G 传输技术的演进和发展趋势看来,400 G 线路接收技术也逐渐走向集成化。

集成的接收机多采用单片集成和自由空间光学器件,没有一种方法能够得到满意的性能、可靠性以及低成本。对此,NTT 采用了硅基 PLC 技术将 PBS(偏振分束器)和 90° 光混频器集成为单片 DPOH(双极化光混频器)。另外采用一个新的多通道准直仪使 DPOH 和 PD 之间的耦合损耗更低,并且抑制温度变化引起的耦合偏差。此外,NTT 还研制出一种芯片级紧凑型高速光电转换器结构,并运用这些技术制作出了集成相干接收机。微光学准直技术使得基于 PLC 混合集成器件的 PD 灵敏度匹配以及温度性能得到极大改善。

由于微电子是硅基平面工艺,光电子器件是立体工艺的。相比混合集成,PIC(光子集成电路)可

以显著减小光模块的体积,节约封装成本,并且平板连接可以使光程匹配和平衡变得容易,进而有效地控制偏差,是未来的主流技术。目前 Bell 实验室已经对单片硅集成相干探测技术有所研究,但是还有很多技术难关有待突破。在 400 G 早期,硅基 PLC 与自由空间光学器件混合集成还会是比较成熟的商用方案。

3.2 分带探测技术

数字相干接收技术在高速传输领域被普遍认为是一种很有前景的技术,因为它可以提高系统的 OSNR 灵敏度,补偿 CD 和 PMD 线路传输损伤。由于电速率的“瓶颈”,ADC 的采样率很长一段时间内将被限制在 100 GS/s 以内。为了有效地解决在 400 G 甚至 T bit/s 信道传输中的这一问题,采用多载波调制格式是一种有效的方法。

采用波长无关探测,接收机硬件复杂度可通过探测多个载波分带来降低,不仅可以不受 ADC 采样率瓶颈的约束,而且可减轻 DSP 的负荷。图 4 所示为光收发合一模块的结构框图。

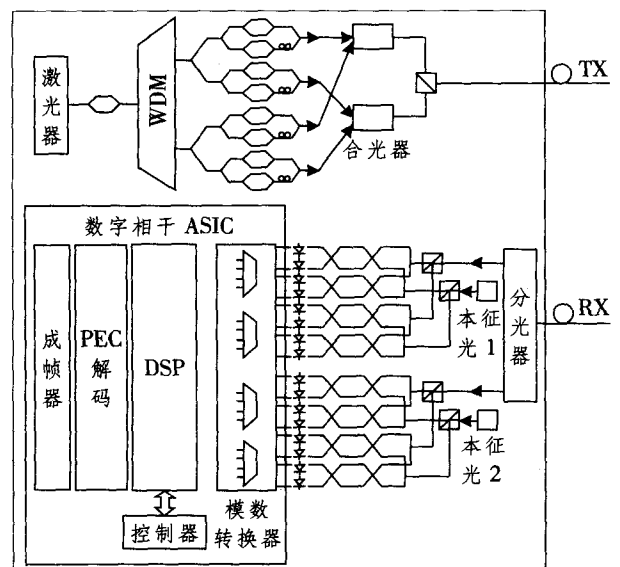


图4 400 G的2SC-DP-16QAM收发合一结构框图

3.3 处理能力与功耗

目前在 100 G 系统中,大部分光器件已达到可以商用的程度,但是在相干接收技术中,关键的 ADC 和 DSP 芯片量产商用的最大问题就是处理能力和功耗。尽管在 2010 年,Alcatel-Lucent 已经在 112 G 的长距离系统采用了 70M+ 门的 56 GS/s 的 ADC/DSP^[7],但预测在 400 G 系统中将面临同样的瓶颈。

现在更小工艺尺寸的 CMOS(互补金属氧化物半导体)技术可以达到低功耗、高速高密度的结合,

但是它是更高的噪声和更多的失配为代价的。最常用的解决方案是增加晶体管的尺寸(门长度或者宽度),但是在这里不太现实,会引入额外的带宽减小和带来更大的功耗。然而小尺寸的晶体管意味着不仅在信号链路上,而且在时钟链路上,S/H(采样保持)和 ADC 电路都存在着失配。可以通过单片校准来减少失配引入的误差。此外,采用全新的采样/解复用架构和实时的简单的幅度、时序校准,可以在不需要极短沟道晶体管的情况下满足光模块对线性度、噪声以及带宽的需求,并且 ADC 的功耗 $< 0.5 \text{ W}^{[7]}$ 。

由于其低成本、高集成度以及低功耗,Si CMOS 工艺目前已经开始在一些应用中取代 III-V 族元素的器件。在已经商用部署的光传输系统产品中的信号处理单片 ASIC(专用集成电路)芯片中已经采用了现有的 90 或 65 nm 的 CMOS 工艺,并且能满足长距离光网络系统的性能与功耗要求。在未来采用 40 nm 或者更小尺寸的工艺设计中,将使其能在短距离和更高速的 400 G 系统中实现商用。

4 结束语

400 G 长距离传输使光通信又进入一个崭新的时代,光通信正从单载波调制相干探测向偏振复用的多载波多电平相位调制和阵列相干探测转变。光子集成和电子集成、ADC/DSP 技术将是 400 G 光通信模块以及系统商用化的关键。随着以太网标准化的迫切需求,光并行化的要求将对光子集成技术

产生巨大的推动作用。在未来 2~3 年内,400 G 电光 OFDM 相关的技术会逐渐成熟,虽然这些器件在成本和功耗方面离商用还有一定的距离,但是随着这些技术逐渐走向成熟以及相关标准的讨论和制定,400 G 系统商用的序幕也即将拉开。

参考文献:

- [1] Ambrosia J D. 100 Gigabit ethernet and beyond [J]. IEEE Commun Mag, 2010, 48(3): 6-13.
- [2] Cole Chris. Technology Alternatives for 400GbE and Beyond Optical Interfaces [A]. Workshop on Beyond 100GbE [C]. Santa Clara, CA USA; Ethernet summit, 2011. 2-18.
- [3] Takeshi Fujisawa. 1.3 μm , 50 Gbit/s EADFB Lasers for 400GbE [A]. Proc OFC 2011 [C]. Los Angeles, USA; OSA, 2011. OWD4.
- [4] Heismann Fred. New Technology Trends in DWDM Transmission Beyond 100 Gb/s [R]. McCarthy, CA USA; JDSU, 2010.
- [5] Winzer P J. Beyond 100G ethernet [J]. IEEE Commun Mag, 2010, 48(7): 26-30.
- [6] Sano A. No-Guard-Interval Coherent Optical OFDM for 100Gb/s Long-Haul WDM Transmission [J]. J Lightwave Tech, 2010, 27(16): 3705-3713.
- [7] Chandrasekhar S, Liu Xiang. Enabling Components for Future High-Speed Coherent Communication Systems [A]. Proc OFC 2011 [C]. Los Angeles, USA; OSA, 2011. OMU5.

(上接第 31 页)

如果传输节点 C 和 D 之间的链路出现故障,则主节点 A 会解除副端口的阻塞状态,此时,链路被切换至传输节点 C、B、主节点 A 和传输节点 E 构成的链路,并且由于该链路上传输节点在 EAPS 环上的各端口都已经存储有 VLAN10 的注册信息,因此,数据报文可以立即在该链路上传输,从而恢复流量。改进的 VLAN 学习方案已经在作者负责研发的以太网交换机上得到了应用。

3 结束语

VLAN 技术是以太网交换机最基本和最重要的技术之一,已得到广泛应用,但在网络中特别是接入网中 VLAN 的管理工作量很大且易出错,因此要对 VLAN 动态学习技术进行研究并使之实用化。

本文对现有的 VLAN 动态学习方式 VTP 和 GVRP 做了简要介绍,并分析了两种协议的不足之处,在此基础上提出了 VLAN 自动学习的改进的方案,该方案在实际的以太网交换机设备中得到了实现,具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] 孙克勇,张亮. 城域以太网中动态 VLAN 注册机制研究 [J]. 中国新通信, 2006, (9): 23-27.
- [2] 茹海波. VLAN 的核心技术 VTP [J]. 电信快报, 2001, (6): 26-29.
- [3] IEEE Std 802.1D-1998, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, "Media Access Control (MAC) Bridges" [S].
- [4] 孙克勇. 以太网交换机中 GVRP 协议研究及实现 [D]. 南京: 南京邮电大学通信与信息工程学院, 2007.