

先进光网络支撑技术与研究进展

纪越峰, 王宏祥

(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 对先进光网络支撑技术与研究进展进行了分析, 回顾并介绍了先进光网络、高速光器件、光节点设备、以及光联网等目前的研究进展情况, 并重点分析了自动交换光网络(ASON)中的关键技术, 结合 ASON 的研究、发展和演进过程等, 指出了在今后 ASON 的研究中需要重视的若干问题。

关键词: 先进光网络; 高速光器件; 光节点; 光联网; 自动交换光网络 (ASON)

中图分类号: TN913. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-011-05

Review of Advanced Optical Network and Its Supporting Technologies

JI Yue feng, WANG Hong-xiang

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts & Telecoms, Beijing 100876, China)

Abstract: The latest research advances of advanced optical network and its supporting technologies are reviewed. The current status of advanced optical network including high speed optical devices, optical node equipments, and optical networking technologies are introduced, and some key technologies of automatically switched optical network (ASON) are analyzed. Considering the evolution and development of ASON, some directions and hot spots in the later research are pointed out.

Key words: advanced optical network; high speed optical devices; optical node; optical networking; ASON

1 引言

随着人类社会信息化时代的不断发展, 提出了许多新的通信业务需求. 这些迅速发展的新型业务对通信网的带宽和容量提出了更高的要求, 从而极大地推动了通信技术的发展. 回顾历史, 人们对通信业务的价值重视已经从“时间、距离和带宽”逐步转向即时的网上应用、个性化在线服务以及实时交互操作等更加丰富的网络服务, 而先进的光通信技术以其高速、宽带的明显特征而为世人瞩目. 从 1996 年第一次达到 1Tbit/s 的容量^[1] 到目前已报道的 10.92Tbit/s 系统^[2], 研究人员作出了不懈的努力. 实际上, 即便是目前的超大容量系统也仅仅使用了光纤很小的一部分带宽, 未来光网络朝着 Tbit/s 速率乃至更高的速率发展已成必然. 从整体来看, 支撑先进光网络的关键技术基本上可分为光纤技术、高速光器件技术、光节点技术以及光联网技术四大类, 本文主要对后三种支撑技术以及先进光网络的研究进展进行分析与介绍.

2 高速光器件技术

光器件是光网络的物理基础, 光通信系统的每一次飞跃都与光电子器件的突破密不可分. 先进光网络所涉及的光器件很多, 如光源、探测器、波长选择器件、波长变换器、光开关、光放大器等. 总体来说, 目前光电子器件正在从单个元件向阵列

组件发展、从分立元件向集成组件发展、从固定单波长器件向可调谐多波长组件发展、从单一功能向具有智能性特征发展.

2.1 激光光源与探测器

由于稀土类掺杂光纤激光器具有独特的封闭式腔体结构和丰富的能级结构, 因此与其他气体、固体激光器相比具有一些明显的优点, 如可采用半导体激光泵浦, 具有高效率、低阈值、小型化、易与光纤耦合等. 随着光传输网络向智能化、可重构方向发展, 可调谐激光器已成为激光器技术中的一个重要部分, 它主要包括基于多段取样光栅的 DBR 激光器 (SG-DBR)^[3]、外腔激光器 (ECL)^[4] 和垂直腔面发射激光器 (VCSEL)^[5] 等. 可调谐激光器在光网络中的广泛应用, 仍有待其性能价格比的提高. 但其发展和应用的前景是不容置疑的. 另外, 随着城域网和光接入网的发展, 对于低啁啾和具有强抗外部反射光干扰能力的新型直接调制 LD 激光光源的开发已成为国际光通信领域研究的热点.

目前, 可供 10G/s 光接收机选择的光探测器主要有 PIN 型光电二极管 (PIN-PD) 和雪崩光探测器 (APD)^[6]. 另外, 谐振腔增强型 (RCE) 光电探测器^[7] 由于其具有波长选择、量子效率高和高响应速度等优点, 近几年备受关注.

2.2 光放大器

掺铒光纤放大器 (EDFA)^[8] 是目前最成熟、应用最广泛的光放大器. 目前, EDFA 已经由最初的单通道发展到现在的多

通道、多功能型. 不足之处是工作波长仅限于 1550nm 窗口. 另外 EDFA 还存在增益不平坦性.

过去几年, 人们对半导体光放大器(SOA)进行了大量的研究^[9]. SOA 的优势是: 便于与其他半导体器件单片集成为子系统; 适于批量生产; 可分别或同时工作于 1310nm 和 1550nm 窗口. 如果要进一步提高传输容量, 增大光放大器的带宽则是非常必要的, 目前的方法有: 掺铟氟化物光纤放大器(EDFA)^[10]、增益平移掺铟光纤放大器(GS EDFA)^[11]、掺铊光纤放大器(TDFA)^[12]、增益平移掺铊光纤放大器(GS TDFA)^[13]等. 最近比较引人注目的是光纤喇曼放大器(FRA)^[14]. 将 FRA 与 EDFA 组合起来, 可以得到带宽高于 100nm 的光放大器.

2.3 波长选择器件

光网络中用到的波长选择器件主要有滤波器、波分复用/解复用器等. 可调谐光滤波器^[15]是实现波分光交换的基本器件. 目前, 已研制出多种可调谐光滤波器, 每种滤波器都有自己的优缺点, 应根据实际需要选择满足要求的器件. 波分复用器/解复用器已从最初的分立型发展到现在的波导集成型或混合集成式器件. 目前通常采用多腔介质薄膜(MDTFF)、光纤布拉格光栅(FBG)和阵列波导光栅(AWG)^[16]等技术来制作. 其中 AWG 性能良好, 并且适合大规模集成, 易于批量生产, 但是 AWG 型 DWDM 器件对温度变化较敏感, 目前尚未被大规模商用. 近年来, 一种被称为波长交织器(Interleaver)^[17]的新型波长选择器件极为引人注目. 它的出现给信道间隔 50GHz 以下 DWDM 系统的尽快成熟和商用带来了曙光.

2.4 波长变换器

波长变换器是解决全光网中波长路由竞争的关键器件, 是充分发挥 WDM 带宽资源的必要手段. 理想的波长变换器应具有以下性质: 对比特率和信号形式应具有透明性; 变换速率快; 既能向短波长变换, 又能向长波长变换; 适当的输入功率; 较宽的变换范围; 可以无变化(即相同的输入输出波长); 偏振不敏感; 高信噪比、高消光比; 实现简单等. 波长变换有光/电/光波长变换和全光波长变换(AOWC)两大类型. 具体实现上大体可以分为以下几类: 采用交叉增益调制型(XGM-SOA)^[18]、采用交叉相位调制干涉型(XPM-SOA)^[19]、及利用四波混频效应(FWM-SOA)^[20]的光波长变换器等.

2.5 光开关

光开关是全光网络中实现光交叉互连和交换的核心器件^[21], 其性能的优劣决定了光网络的性能. 按照光开关实现技术的物理机理, 可以分为机械式开关、热光式开关和电光式开关等几种. 利用光分支波导和 SOA 组合构成的门控型光开关^[22]是近年特别引起注意的光开关. 这种光开关通断消光比很大, 同时易于集成, 开关速度快, 但偏振敏感. 未来光网络中的光开关不但要有良好的性能, 而且还必须能够进行大规模的集成, 以适应现代网络的要求.

3 光节点中的关键设备

光网络的节点技术是网络技术的核心. 光节点的引入, 可以实现信号在光域上交换和选择路由, 使得在光域上联网成为可能.

3.1 光复用设备

光复用技术是增大光通信系统的通信容量的一种有效手段. 目前研究开发的光复用技术有波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)^[23]、副载波复用(SCM)^[24]和光码分复用(OC-DM)^[25]等, 它们具有各自的特点和优势, 应用环境也有所不同. 其中密集波分复用(DWDM)技术现已有商业应用. DWDM 的最高实验记录已经达到 10.92Tbit/s^[21], “WDM+EDFA”被认为是挖掘光纤通信容量的最好方法.

3.2 光分插复用设备 OADM

光分插复用(OADM)技术使得在全光网络中灵活地上下信道和实现信道的重分配成为可能^[26, 27], 由 OADM 组成的环路将在全光网中大显身手. OADM 具有以下特点: (1) 避免了解复用和电处理过程; (2) 简化了节点的硬件并减少了相关的管理操作; (3) 网络节点的吞吐量大大增加. 总的说来, 目前的 OADM 实现方案可以分为非重构型和可重构型两种. 相比较而言, 前者缺乏灵活性, 但性能可靠且没有延时, 这一类 OADM 主要应用于城域网, 其基本要求是信道之间隔离度好, 插入损耗低; 后者结构复杂且具有延时, 但可以使网络的波长资源能得到良好的分配, 主要应用于骨干网. 现有 OADM 的具体实现归纳起来主要有如下几种: 耦合单元+滤波单元+合波器、分波器+空间交换单元+合波器、基于声光可调谐滤波器(AOTF)、基于波长光栅路由器(WGR)等.

3.3 光交叉连接设备 OXC

OXC 主要由光交叉连接矩阵、输入接口、输出接口、管理控制单元等模块组成^[28, 29]. 其中, 光交叉连接矩阵是 OXC 的核心, 要求无阻塞、低延迟、宽带和高可靠, 并且要具有单向、双向和广播形式的连接功能. 实现 OXC 的基本结构与主要方法包括两大类: 其一是基于空间交换的 OXC 结构, 如: 基于空间光开关矩阵和波分复用/解复用器对的 OXC 结构等; 其二是基于波长交换的 OXC 结构, 如: 基于阵列波导光栅复用器的多级波长交换 OXC 结构等. 评价 OXC 结构时应考虑以下主要性能指标: 是只支持波长通道, 还是可以支持虚波长通道; 阻塞特性; 链路模块性; 波长模块性; 广播发送能力; 以及经济性等.

3.4 全光(分组)交换设备

全光交换可分成光路光交换和分组(突发)光交换二种类型. 前者可利用 OADM、OXC 等设备来实现, 而后者对光部件的性能要求更高(尤其是速度方面). 由于目前光逻辑器件的功能还较简单, 因此现有的分组光交换单元还要由电信号来控制, 即所谓的电控光交换. 随着光器件技术的发展, 光交换技术的最终发展趋势将是光控光交换. 目前, 光交换系统关键技术主要包括: 光分组交换(OFS)^[30]、光突发交换(OBS)^[31]、光标记分组交换(OMPLS)^[32]、光波长标签交换 MPLmS、光子时隙路由(PSR)^[33]等.

4 光联网技术

传统光传送网对带宽的指配基本上是静态的, 不能满足飞速发展的客户层需求. 其缺陷主要体现在: 动态性不够、带宽利用率不高、网络的可扩展性差. 随着互联网技术的发展,

数据业务量迅猛增长,对当前的核心光传输网络带来了巨大冲击。在这种背景下,一种面向智能化的光传送网—自动交换光网络(ASON)应运而生,其核心就是要实现对网络资源实时、动态地按需配置,优化对波长资源的高效使用,提供多样化的服务和快速高效的网络生存性。当 ITU-T 在 2000 年 3 月正式提出 ASON 这一概念后,立刻吸引了国际学术界和工业界的广泛关注和极大的研究热情^[34]。我国在国家 863 计划和国家自然科学基金中均设立了相关项目对其展开深入的研究。

4.1 自动交换光网络的构架

所谓自动交换光网络(ASON)是指一种在信令控制下完成光网络连接自动配置功能的网络^[35],它在传统的传输网络中增加了一个控制平面,通过对诸如通用多协议标记交换(GMPLS)等相关协议的集成和应用,可以在光网络中实现资源发现、路径选择、动态资源分配与故障恢复等智能化功能。可以说,ASON 是智能光网络的具体代表,或者说 ASON 是一种标准化的智能光网络。ASON 结构中涉及三个部分(即传送平面、控制平面和管理平面),其中控制平面是 ASON 中最具特色的部分。

4.2 ASON 的关键技术

为了实现自动交换光网络,涉及到许多关键技术,下面结合笔者所在项目组的研究工作和相关成果,对 ASON 的核心技术进行分析和介绍。

(1) 自动发现技术

自动发现是获得网络资源、选路、资源管理的基础,基于网络规模的扩大,手工配置很是繁复且易于出错,自动发现就显得尤为重要。ASON 中的自动发现^[36]技术主要包括层邻接发现(LAD)、物理介质邻接发现(PMAD)技术。PMAD 过程用于决定节点和端口标识;LAD 通过业务发现,相邻网元能够了解每个网元提供的“服务”和确定可选的接口。业务发现的另一个重要功能是得到接口限制的详细信息。

(2) 光网络路由技术

作为智能化的网络技术,ASON 需要光网络设备能够自动获取并跟踪网络拓扑结构的变化,实现动态的路由功能^[37,38]。为了提供更好的灵活性和可扩展性,ASON 采用了层次化的路由结构,大的运营商网络可以基于地理、管理范围、技术等因素进行网络分割,形成更多的子网或者子控制域,从而形成分层多域的路由体系结构。在控制域或子网内部,可以基于 IP 路由协议来实现路由功能,但传统的 IP 路由协议没有考虑光网络链路的波长资源与光通道的专有模拟参数(如:损耗、色度色散、偏振模色散等),有必要根据上述特点改进路由与拓扑发现算法。

(3) 光网络协议与管理技术

ASON 的管理^[39]不仅可以提供光传送网及网元设备的管理功能,而且能够实现网络操作系统与网元之间更加高效的通信功能。另外可在光网传送功能结构基础上,构建 ASON 信息模型,将光路径和光链路连接应用于网络管理,将光路径终端和光连接终端应用于网元管理,建立用于执行交叉连接、实施保护单元的管理目标以及处理告警记录和发送事件报告的管理

目标等。光网的管理既可以采取集中方式,也可以采取分布方式。分布式管理方案通常比集中式管理方案更为健壮,但也更加复杂。

(4) 光网络保护恢复与网络生存性

由于数据业务的快速增长,以及光纤传输容量的增加,任何网络故障或网络的瞬时失效都将引起业务量的严重损失,所以对光网络的快速保护恢复^[40,41]能力和高效的网络生存性也提出了更高的要求。在业务层和传送层都具有各自的保护恢复机制,当底层网络发生故障时,采用何种约定才能有效协调各层的保护恢复机制,使网络可以对故障进行迅速有效的反应已成为一个重要的问题。一般来说,网状网生存性有两种基本的模式:路径保护/恢复和链路保护/恢复。在传统的 IP 网络中,生存性通过重路由来实现。在 IP 域中引入 MPLS 提供了在 IP 网络中快速重路由的可能。实际上,传统 IP 重路由的观点也在 MPLS 路径恢复中体现出来。MPLS 主要有两级生存性机制:全局保护/恢复和本地保护/恢复。总体来说,本地机制更简单,且提供更快的保护倒换或恢复,而全局机制提供更好的资源利用率和更高的恢复率。

(5) ASON 中的信令技术

对于 ASON 来说,比较适合的信令方式^[42]是共路信令。在 ASON 中,可以利用一个单独的波长作为监视通道,传送信令消息。目前信令的传送要依靠具有可靠、安全、通用和良好的服务质量与可扩展性的信令网络来完成。ITU-T 只是定义了 ASON 及其控制平面的框架结构,而对于信令协议的选取和实现并没有明确说明。IETF 提出的 RSVP-TE 和 CR-LDP,是目前考虑用以实现 ASON 控制平面信令机制的两种协议。

(6) 业务的接入与适配

对于今后的长期应用来说,为了实现在光纤上直接传输 IP 数据,最关键的问题之一是需要规范出一种新的最佳的 IP 对光路的适配接口^[44,45]。目前主要使用以下两种帧格式:SDH/SONET 帧格式(或其简化)和千兆比以太网帧格式。以上两类帧格式各有优缺点,都只是一段时间内的过渡方案,最终将采用一种最适合于 IP 对光路的帧结构,同时也要充分考虑到对现有网络的影响。

4.3 ASON 演进中的若干问题思考

在 ASON 的研究、发展和演进过程中,由于引入了控制平面、完成从静态配置到动态配置、从电域到光域、从电交换到光交换等一系列转变,将会出现一些新问题,需要引起重视。概括起来,主要有以下几种:IP 与光层融合的重叠模型结构和对等模型结构共存和互连问题、ASON 分层路由技术中拓扑抽象与连接恢复问题、光节点交换结构问题、ASON 网络的可扩展性问题、控制层面可靠性问题、传输损伤对光网构建的影响问题、网络安全性问题、标准化问题等等。另外,在 ASON 演进与建设过程中还要注意以下问题,如:多种网络兼容问题、网络边缘处业务与智能带宽的配合问题、多层网络生存性的协调问题、波长资源分配的公平性问题、服务策略问题、网络维护能力问题等。这些问题解决的好坏将直接影响到未来光网络对 ASON 作用和潜力的充分发挥。

5 结语

随着网络朝着简捷化、高效化发展,未来的信息网络将向两层网络发展:上层是接入各种业务的业务数据层,下层是承载数据业务的光物理层。作为底层的光物理层将充分利用密集波分复用设备、光交换机和业务交换设备来为上层业务层的边缘网络用户提供可进行流量控制的网络接口,而边缘网络的业务层能够将各种各样的业务通过一种统一协议与核心网络进行连接,业务网靠光网络来获得连接各节点和网元时所需的分配带宽。为了实现这种网络构架与功能,需要研究并实现面向业务应用、高速宽带传送与网络融合的新一代先进智能化光网络,重点包括:下一代网络(NGN)中的智能化光网络(ASON)与互联互通,新型的光互联网体系结构,面向业务的融光交换、光信息处理和光存储为一体的光节点结构,高性价比的光接入模块与光纤到家庭(FTH)新技术,光电集成器件和光集成光器件,突发式光收发模块,光纤无线(ROF)光传输系统,高速可调谐波长光波技术,适应城域网和接入网需要的低价位和低能耗激光光源,纳米光电子技术、光子晶体应用技术,光网络的可管理性、应用的便捷性及与其他网络的融合性等。近年来新兴起的 10Gbit/s 光纤以太网技术和其它光纤接入技术利用光纤的巨大带宽资源优势,为满足市场对带宽的巨大需求提供了新的可能。总之,先进光网络将以其优良的性能为未来宽带信息网络提供坚实的物理传送平台,并发挥越来越重要的作用。

参考文献:

[1] H Onaka, H Miyata et al. 1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μ m zero dispersion single mode fiber[A]. Proceeding of OFC' 96 [C]. San Jose, CA: OFC, 1996, paper PD19- 1.

[2] Kiyoshi Fukuchi et al. 10.92 Tb/s (273/ 40 Gb/s) triple band ultra dense WDM optical repeated transmission experiment[A]. OFC 2001 [C]. Anaheim, California, USA: 2001, paper PD24.

[3] L A Johansson, Y A Akulova, et al. Sampled grating DBR laser integrated with SOA and tandem electroabsorption modulator for chirp control[J]. Electronics Letters, 2004, 40(1): 70- 71.

[4] Takuya Tanaka, Yoshinori Hibino et al. 100 GHz spacing 8 channel light source integrated with external cavity lasers on planar lightwave circuit platform[J]. J. Lightwave Technol, 2004, 22(2): 567- 573.

[5] Lukas Chrostowski, Chih-Hao Chang et al. Injection locked 1.55 μ m tunable VCSEL for uncooled WDM transmitter applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(3): 888- 810.

[6] Joe C Campbell, Stephane Demiguel. High speed waveguide photodetectors[A]. OFC 2004 [C]. Los Angeles, California, USA, paper TuM1.

[7] Yasser M El-Batavy et al. Analysis, Optimization, and SPICE modeling of resonant cavity enhanced p-i-n photodetector[J]. J. Lightwave Technol, 2003, 21(9): 2031- 2043.

[8] Bor-Hun Choi, Hyo-Hoon Park et al. New Pump wavelength of 1540 nm band for long wavelength band erbium doped fiber amplifier (L-Band EDFA)[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(10): 1272- 1280.

[9] A E Kelly. High performance semiconductor optical amplifiers[A]. OFC 2004[C]. Los Angeles, California, USA, T1S1.

[10] Paul F Wysocki. Silica base broadband fiber amplifiers[A]. OFC 98 [C]. Los Angeles, California, USA, 1998. 97- 99.

[11] M Karasec. Design of gain shifted erbium doped fibre amplifiers for WDM applications[J]. IEE Proc Optoelectron, 1999, 146(3): 143- 148.

[12] E R M Taylor, L N Ng et al. Thulium doped telluride fiber amplifier [J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 2004, 16(3): 777- 779.

[13] S Aozasa, H Masuda et al. Gain shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70% [J]. Electronics Letters, 2002, 38(8): 361- 363.

[14] R H Stolen. Raman amplifiers: fundamentals[A]. OFC 2004[C]. Los Angeles, California, USA, 2004, paper WJ1.

[15] Lawrence Domash, Ming Wu et al. Tunable and switchable multiple cavity thin film filters[J]. J. Lightwave Technol, 2004, 22(1): 126- 135.

[16] Hisato Uetsuka. AWG technologies for dense WDM applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(2): 393- 402.

[17] S Cao, J Chen et al. Interleaver Technology: Comparisons and applications requirements[J]. J. of Lightwave Technol, 2004, 22(1): 281- 289.

[18] Daniel Pastor et al. Experimental characterization of XGM-SOA Based wavelength converted SCM systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(1): 114- 116.

[19] Wei Wang, Henrik N Poulsen et al. Regenerative 80 Gb/s fiber XPM wavelength converter using a hybrid raman/EDFA gain enhanced configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(10): 1416- 1418.

[20] Dar-Zu Hsu et al. High Efficiency Wide Band SOA Based wavelength converters by using dual pumped four wave mixing and an assist beam [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 16(8): 1903- 1905.

[21] Xiaohua Ma, G S Kuo Optical switching technology comparison: optical MEMS vs. other technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(11): S16- S23.

[22] Ammar Sharaiha et al. Comprehensive analysis of two cascaded semiconductor optical amplifiers for all optical switching operation[J]. J. Lightwave Technol, 2004, 22(3): 850- 858.

[23] J P Turkiewicz et al. Clock recovery and demultiplexing performance of 160 Gb/s OTDM field experiments[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 16(6): 1555- 1557.

[24] W H Chen, Winston I Way. Multichannel single sideband SCM/DWDM transmission systems[J]. J. Lightwave Technol, 2004, 22(7): 1679- 1693.

[25] Hideyuki Sotobayashi et al. Highly spectral efficient optical code division multiplexing transmission system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(2): 250- 258.

[26] Pingsheng Tang, Ohannes Eknoyan et al. Rapidly tunable optical Add-Drop multiplexer (OADM) using a static strain induced grating in LiNbO₃[J]. J. Lightwave Technol, 2004, 21(1): 236- 245.

[27] Michael Vasilyev et al. Broadcast and Select OADM in 80 10.7 Gb/s Ultralonghaul Network[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003,

- 15(2): 332– 334.
- [28] Ahmed Mokhtar et al. OXC Port Dimensioning Strategies in Optical Networks—A Nodal Perspective [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(5): 283– 285.
- [29] JirNan Kuo, Gwo Bin Lee et al. A high-speed low-voltage double-switch optical crossconnect using stress induced bending micromirrors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2042– 2044.
- [30] Dimitrios Klonidis et al. Fast and widely tunable optical packet switching scheme based on tunable laser and dual pump four wave mixing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(5): 1412– 1414.
- [31] Yang Chen et al. Optical burst switching: a new area in optical networking research [J]. IEEE Network, 2004, 18(3): 16– 23.
- [32] Henrik Christiansen et al. Modeling GMPLS and optical MPLS networks [A]. ICT 2003 [C]. papete, French polynesia, 2003, 1: 288– 294.
- [33] Viktoria Elek et al. Photonic slot routing: a cost effective approach to designing all optical access and metro networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(11): 164– 172.
- [34] Carlo Cavazzoni et al. The IP/MPLS over ASON/GMPLS test bed of the IST project LION [J]. J. Lightwave Technol, 2003, 21(11): 2791– 2803.
- [35] ITU-T recommendation G. 8080: Architecture for Automatically Switched Optical Network (ASON). November, 2001 [S].
- [36] Sudipta Sengupta et al. From network design to dynamic provisioning and restoration in optical cross connect mesh networks: an architectural and algorithmic overview [J]. IEEE Network, 2001, 15(4): 46– 54.
- [37] ITU-T recommendation G. 7715: Architecture and requirements routing in the Automatically Switched Optical Network (ASON). June 2002 [S].
- [38] OIF 2002.087: Intra Carrier Network Routing Using GMPLS IGP-TE. January 25, 2002 [S].
- [39] ITU-T G. 7713 Y. 1704: Distributed call and connection management. December 2001 [S].
- [40] Q Zheng, G Mohan. Protection approaches for dynamic traffic in IP/MPLS over WDM networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(5): S24– S29.
- [41] Chadi Assi et al. On the merit of IP/MPLS protection/restoration in IP over WDM networks [A]. IEEE GLOBECOM' 01 [C]. San Antonio, Texas, USA. vol. 1: 65– 69.
- [42] Martin Nathansen et al. Emulation of routing and signaling processes in automatically switched optical networks [A]. OFC 2002 [C]. Anaheim, California, USA, 2002: 776– 777.
- [43] Dirceu Cavendish et al. New transport services for next generation SONET/SDH systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(5): 80– 87.
- [44] Mike Scholten et al. Data transport applications using GFP [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(5): 96– 103.

作者简介:



纪越峰 男, 1960 年出生于上海市, 现为北京邮电大学电信工程学院副院长, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光波技术与宽带信息网。
E mail: jyf@bupt.edu.cn



王宏祥 男, 1973 年 7 月出生于河南临颖, 现为北京邮电大学电信工程学院电磁场与微波技术专业博士研究生, 主要研究方向为光波技术与宽带信息网。