

波分复用光纤通信技术*

张宏斌** 邱 昆 周 东

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 介绍了 WDM 技术的发展情况, 分析了其主要技术优势, 对 WDM 关键技术, 如激光器、波长复用解复用器、掺铒光纤放大器(EDFA)等作了分析和介绍, 同时对 WDM 系统中存在的一些问题进行了讨论。

关键词 光纤通信; 传输速率; 传输容量; 波分复用; 透明性; 四波混频

中图分类号 TN913

在日新月异的信息时代, 电信网、因特网、有线电视网迅速壮大并开始走向融合, 人类活动的诸多方面已与信息网络密不可分, 全球通信业务量迅速增长, 业务种类也日趋多样化, 这对信息传输速率及网络通信容量提出了越来越高的要求^[1,2]。时分复用(TDM)和波分复用(WDM)是两种有效提高通信容量的信道复用技术。TDM 是在电域中对信道进行复用, 通常用在脉冲编码调制(PCM)中, 其实质是将通信线路按时间顺序分别给各路信号使用, 在接受端依次将各路信号分离出来, 达到信道多路复用的目的。时分复用方式在以前通信容量要求不高时是提高传输效率、降低传输成本的有效措施, 但随着传输容量要求的急剧增加, TDM 传输系统的增长速率已大大落后于网络节点的增长率, 而且当传输速率大于10 Gbit/s 时, 已接近硅和镓砷技术的极限, 即便开发出更高速率的 TDM 电子器件和线路, 也会由于其开发和生产成本昂贵而得不偿失, 此时光纤的色度色散(Chromatic dispersion)和极化模式色散(PMD——Polarization Mode Dispersion)现象已相当严重。波分复用是在一频带区域内用若干不同波长的光波分别传送不同信道的信号, 它是在光域内对信道进行复用。在低损耗传输窗口单模光纤具有约25 THz 的带宽, 在此频域区间内采用波分复用技术, 为传输容量的提高提供了理论依据^[3]。

自1991年朗讯公司提供第一个现场应用的 WDM 系统以来, 波分复用解复用器、掺铒光纤放大器(EDFA)、激光器外调制、色散管理等关键技术日趋成熟, ITU-T 主持下的 WDM 技术标准也不断完善。自1995年以来, WDM 以容量大、成本低、透明传输、网络简化等优点而迅速占领市场^[2-6]。目前, 商用的 WDM 系统有: 8×2.5 Gb/s、16×2.5 Gb/s、8×10 Gb/s、16×10 Gb/s 等, NEC 于1996年已进行了 132×20 Gb/s(2.64 Tb/s)传输距离为120 km 的实验。WDM 波长覆盖范围也在从 C 波段向 L 波段延伸。我国 WDM 技术的研究、开发和应用已取得长足的发展, 已在京汉广、宁汉、京沈等12条光缆扩容工程中采用了8×2.5 Gb/s WDM 系统, 上海至南京段还将试验单纤双向8×10 Gb/s WDM 系统, 上述 WDM 工程总长度已达15 000 km^[7]。国际上 WDM 传输实验情况见表1所示。

1 WDM 技术的主要技术优势

WDM 技术的主要技术优势如下:

1) WDM 技术使单根光纤的传输容量比利用单波长传输时的容量呈几倍至几十倍的增长, 使现有光纤的巨大带宽资源得到了很好的开发利用。

2) 在长途干线传输中采用 WDM 技术能节约大量光纤, 使信息传输成本大大降低。增大传输容量有两种可行方案: 敷设更多的光纤; 在已有的光纤上加装 WDM 系统。工程应用中具体采

2000年5月24日收稿

* 四川省青年科技基金、四川省学术和技术带头人培养基金资助项目

** 男 36岁 在站博士后 副教授

输容量有两种可行方案: 敷设更多的光纤; 在已有的光纤上加装 WDM 系统。工程应用中具体采用何种方案要视成本而定。在长途干线传输中, 由于线路距离很长, 增设光纤的费用会非常大, 而收发两端整套 WDM 系统的成本并不因传输距离的长短而变化; 另一方面, 传输距离越长, 中继站数越多, 多根光纤与单根光纤相比, 则需要成倍增加多个 EDFA 放大器, 从而使放大器的总成本增加。因此在长途干线传输中应用 WDM 系统是非常合算的, 但在短距离线路中则应分析比较增设光纤所需的成本和 WDM 系统的成本后, 才能做出合理的选择。

表1 WDM 传输实验情况

时间/a	公司名称	传输方式	传输速率/ Gbit·s ⁻¹	传输距离/ km	备注
1994	BT(UK)	WDM	20(2×10)	120	
1994	西门子	WDM	80(8×10)	412	
1994	富士通	WDM	160(16×10)	150	
1994	AT&T	WDM	340(17×20)	150	
1995	NTT	WDM	20(2×10)	2 715	使用商用传输线路
1995	NTT	WDM	50(5×10)	905	使用商用传输线路
1995	NTT	WDM	100(10×10)	600	
1996	阿尔卡特	WDM	160(16×10)	531	
1996	AT&T	WDM	100 (20×5)	910	
1996	AT&T	WDM	1 000(50×20)	55	
1996	NTT	WDM	1 100(55×20)	150	
1996	NEC	WDM	2 640(132×20)	120	
1997	MCI(U.S.A)	WDM	40(4×10)	275	商用系统
1997	Ciena	WDM	40(16×2.5)	600	商用系统
1997	NEC	WDM	1 280(64×20)	100	
1997	KDD (Japan)	WDM	533(50×10.66)	1 655	采用增益平坦的 EDFA
1997	KDD (Japan)	WDM	100(40×2.5)	12 000	采用宽带、增益平坦、低噪声、980 nm 泵浦的 EDFA
1998	Alcatel (France)	WDM	320(32×10)	320	采用双级增益平坦的 EDFA
1998	Corning(U.S.A)	DWDM	320(32×10)	450	采用 LEAFTM 和 sub-LSTM 光纤
1999	NTT(Japan)	WDM	250(25×10)	9 288	
1999	KDD (Japan)	WDM	341(32×10.66)	6 054	采用大芯光纤和 DSF 的混和光纤传输
1999	Lucent(U.S.A)	WDM	1 000(25×40)	342	

3) 波分复用具有很好的透明性。由于不同波长信道彼此是独立的, 因而 WDM 技术使不同种类的信号(如数字信号、模拟信号、PDH 信号、SDH 信号等)能在同一光纤上同时传输, 使多媒体信号(如音频、视频、数据、文字、图像等)混合传输得以实现。

4) WDM 系统以波长路由方式代替传统的电子信号路由方式, 以解复用器(如光栅)代替光电转换交换器件, 消除了转发延迟, 大大缓解了传统交换节点上的电子瓶颈问题, 并增加了传输系统的透明性。

5) 可实现单根光纤双向传输。由于许多通信(如打电话)都采用全双工方式, 因此可节省大量

的线路投资。

6) WDM 技术具有良好的扩容性。在现有的光纤线路上通过增加波长信道, 即可引入任意想要的新业务或新容量, 而不必对原系统作大的改动。

7) 随着传输速率的不断提高, 许多光电器件的响应速度已显不足。WDM 技术采用增加波长信道的方法, 在确保足够大的传输容量需求前提下, 又使单个波长信道的传输速率不至于太高, 从而大大降低了对光电器件性能的极高要求。

8) 传输设备简化。WDM 系统采用光放大器代替原来的光/电/光再生器, 简化了设备, 降低了传输成本。WDM 系统的基本配置为集成式收/发机(Rx/Tx)、光分插复用器(OADM)、光交叉连接器(OXC)和光放大器(OA)。

9) WDM 技术为将来开发透明的、自愈能力很强的全光网打下了坚实的基础。

2 WDM 的关键技术

2.1 频率稳定的可调谐激光器

可调谐激光器是实现 WDM 最重要的器件。近年来制成的单频激光器都用多量子阱(MQW)结构、分布反馈(DFB)式或分布布喇格反射(DBR)式结构, 有些能在10 nm 或1 THz 范围内调谐, 提高了调谐速度。由于发射激光器的频率(或波长)随着工作条件(如温度和电流)的变化而发生漂移, 所以应采用有效措施保持各载波频率至少是相对的稳定, 使信道间隔恒定。一种稳频的方法是将激光器的频率锁定在某种原子或分子的谐振频率上。在1.5 μm 波长上, 已经利用氨、氦、乙炔等气体分子实现了对半导体激光器的频率稳定。利用光生伏特效应、锁相环技术等都实现了半导体激光器的频率稳定^[8]。

2.2 波长复用解复用器

波长复用解复用器是 WDM 系统中的关键部件, 其性能的优劣对系统的传输质量起着决定性作用。波长复用解复用器具有插入损耗小、带内损耗平坦、带外插入损耗变化陡峭、隔离度大、复用信道多、温度稳定性好等特点。波长复用解复用器种类繁多, 目前商用化的主要有耦合器型、介质膜滤波器型、集成光波导型和布拉格光栅型。

2.3 掺铒光纤放大器(EDFA)

目前 WDM 系统采用1.5 μm 波长窗口, 随着通信容量需求的增加和技术的发展, 研究和开发宽谱增益平坦的 EDFA 已成为研究热点。有关文献报道了765 Gb/s \times 2 000 km 系统使用的 EDFA 带宽为60 nm^[9], 但其增益较低, 为11.7 dB。还有文献报道了3 Tb/s 使用碲化 EDFA^[10], 带宽加至70 nm, 增益为13 dB。另外, 有关专家提出的动态 EDFA 具有自动调整增益平坦性的功能^[11], 利用电的反馈回路自动调整增益均衡滤波器(GEF)的特性和放大器的抽引功率, 使输出信号达到需要值。这种动态 EDFA 对 WDM 系统很有用, 可以在光的分插复用器(OADM)等场合应用。

2.4 全光再生技术

对于超长距离全光传输系统, 经过一定的长距离光纤和 EDFA 传输后, 有必要对光信号进行光的再生, 借以减小定时抖动和遏制噪声累积。文献[12]提出了最新研制的一种40 GHz 用 InP 的推挽式 MZ(Mach-zehnder)调制器, 对1.5 μm 波长、40 Gb/s 光信号再生后距离延长至2万公里, 其测试性能良好。丹麦大学利用半导体光放大器构成一种 MZ 干涉仪^[13], 这种干涉仪只能用于数据信号, 但输入功率动态范围约为16 dB, 表明这种技术可以用于很高的数字速率。

3 问题讨论

3.1 光纤的选用

光纤的敷设是一项耗钱费力的工程, 选择何种光纤便显得至关重要。关于 WDM 系统使用的

光纤已在1996年 OFC 会上确认最佳选择是非零色散光纤(NZDF——Non-zero Dispersion Fiber, G.655),即在 WDM 工作波长范围内宜于减少光纤色散,但不能减至零,以此来抑制四波混频效应(FWM)。由于其价格昂贵,在国内还未能得到推广应用,目前在公共网络中主要采用 G.652标准光纤^[14]。

3.2 波长的标准化

复用波长的标准化关系到 WDM 系统的顺利推广和利用。波长标准化包括工作中心频率(波长)的确定以及波长间隔的规范。ITU-T 确定以193.1 THz(1 552.5 nm)为标准频率,每个波长之间的间隔为100 GHz,约0.8 nm。通常信道波长之间为等间距,但有的国家为了减少零色散位移光纤(ZDSF)传输中的四波混频效应,采用了非等间隔的波长信道设计,如 Pirelli 公司的波分复用系统。目前,我国已初步选定8个波长作为光缆干线扩容的首选波长。

3.3 色散管理

在光纤传输系统中存在两种色散现象:色度色散;极化模式色散(PMD)。色度色散通常简称色散,是指一种脉冲中包含不同的波长可能按不同的速率传输,使脉冲在传输过程中宽度加宽。控制系统工作波长范围使其尽量在零色散波长附近,或对色散进行补偿使总色散值减小,这些都是减小光纤色散影响的有效措施。色散也有其值得利用的一面,即利用恰当的色散,可以有效抑制 FWM 效应。

当光纤通道每路传输数字速率足够高时会产生 PMD 色散,即由于光波的极化模式不同导致传输速率各异。PMD 具有随机性,与光纤长度的平方根成正比。要减小 PMD 须从光纤本身着手,例如改进预制棒的制作,严格控制不圆度;优化光纤的折射率差,并采用三包层的光纤等。

3.4 非线性效应影响

在波分复用系统中,当光纤中传输的光波功率足够大时就会产生非线性效应,使信道能量损失或发生严重的非线性串话,严重影响复用系统的光传输性能^[15]。光纤中的非线性效应包括受激喇曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频效应(FWM)等。采用大有效面积光纤,如美国康宁公司生产的 LEAF 光纤,能有效降低光波功率密度,可大大提高非线性效应的功率阈值,对有效抑制上述非线性效应都有好处。采用具有适当色散的光纤,如 G.652标准光纤能有效抑制 FWM 效应。

3.5 WDM 组网问题

目前,WDM 系统还处于快速发展阶段,其应用主要基于点到点方式,与 WDM 光网络还有很长一段距离。WDM 光网络的建设有待于波长串扰、波长分配、网络管理以及均衡等问题的良好解决,更有待于一些光交换节点器件(如 OADM、OXC)的开发利用,这些也正是目前全光网领域的研究热点。

4 结束语

随着通信容量需求的飞速增加和通信业务形式多样化,WDM 技术以其优越的性能而倍受青睐,成为当前光传输领域中的开发和应用热点。由于其利用波长复用的方式来增加通信容量,所以,能利用光纤的巨大带宽极大地满足对通信容量的需求,并大大降低对光纤的耗用。同时由于 WDM 系统直接对光波长进行处理而不针对信号的内容,即对信号是透明的,因而非常适宜多媒体综合业务的发展。WDM 系统作为全光网的基础技术,其推广应用必将大大推进全光网的建设和发展。目前 WDM 技术的推广应用还受到很多技术因数的制约,随着一些新技术、新器件的开发利用,WDM 技术必将在光通信网络的建设中发挥出巨大的、不可代替的作用。

参 考 文 献

- 1 Alferness Rod C, Bonenfant Paul A, Newton, Curtis J, *et al*. A practical vision for optical transport networking. Bell Labs Technical Journal, 1999: 3~6
- 2 Green Paul E. Optical networking update. IEEE J Select Areas Commun, 1996, 14(5): 764~779
- 3 Brackett Charles A. Is there an emerging consensus on WDM networking. J Lightwave Tech, 1996, 14(6): 936~941
- 4 胡 明, 李乐氏. 一种预约式波分复用网信道分配方法. 电子科技大学学报, 1998, 27(3): 256~260
- 5 张 涛, 邱 昆, 邱 琪. 一种基于波分复用的 ATM 光交换结构. 电子科技大学学报, 1998, 27(4): 371~374
- 6 唐明光. 从 ECOC'94看光通信的发展. 电子科技大学学报, 1994, 23(增刊): 35~40
- 7 郭贺铨. 中国光纤传送网的发展. 电信科学, 1999, (10): 1~4
- 8 Shizuo Yamaguchi, Masao Suzuki. Simultaneous stabilization of the frequency and power of an AlGaAs semiconductor laser by use of the optogalvanic effect of krypton. IEEE J Quantum Electron. 1983, QE-19(10): 1 514~1 519
- 9 Matthew X Ma, Morten Nissov, Haifeng Li, *et al*. 765 Gb/s over 2 000 km transmission using C-band and L-band erbium doped fiber amplifiers. OFC'99, 1999, 16:1~3
- 10 Kawanishi S, Takara H, Uchiyama K, *et al*. 3 Tbit/s(160 Gbit/s×19ch)OTDM-WDM transmission experiment. OFC'99, 1999, 1:1~3
- 11 Seok Hyun Yun, Bong Wan Lee, Hyang Kyun Kim, *et al*. Dynamic erbium doped fiber amplifier with automatic gain flattening. OFC'99, 1999, 28:1~3
- 12 Leclere O, Brindel P, Rouvillain D, *et al*. 40 Gbit/s polarization-independent, push-pull InP mach-zehnder modulator for all-optical regeneration. OFC'99, 1999, 35:1~3
- 13 Wolfson D, Hansen P B, Kloch A, *et al*. All optical 2R regeneration at 40 Gbit/s in an SOA-based mach-zehnder interferometer. OFC'99, 1999, 36: 1~3
- 14 Leping Wei, Yi Chen, Wong Gerald G. The evolution of China's optical fiber networks. Bell Labs Tech J, 1999: 125~144
- 15 Chraplyvy Andrew R. Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities. J Lightwave Tech, 1990, 8(10): 1 548~1 557

WDM Technology for Optical Fiber Communication

Zhang Hongbin Qiu Kun Zhou Dong

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The development situation of WDM technologies is introduced in this paper. The primary technological characteristics are analyzed, and the key WDM technologies such as laser, wavelength division multiplexer, EDFA etc. are addressed. Some issues in WDM system are also discussed.

Key words optical fiber communication; transmission rate; transport capacity; wavelength division multiplexing; transparency; four-wave mixing