

- 29 Kasamatsu T, Yano Y, Ono T. Laser diode pumping of gain-shifted thulium-doped fiber amplifier. *Electron. Lett.*, 2000, **36** (19):1607~1609
- 30 Roy F, Leplingard F, Lorcy L *et al.*. 48% power conversion efficiency in a single-pump gain shifted thulium-doped fiber amplifier. OFC'2001: PD2
- 31 Roy F, Le Sauze A, Baniel P *et al.*. 0.8 $\mu$ m+1.4 $\mu$ m pumping for gain-shifted TDFA with power conversion efficiency exceeding 50%. OAA'2001:PD4
- 32 Kani J, Jinno M. Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fiber amplifier and fiber Raman amplifier. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12):1004~1006
- 33 Akasaka Y, Wong K K Y, Ho M C *et al.*. Novel S-band amplification and wavelength conversion technique using dual nonlinear phenomena. OFC 2001:WDD31
- 34 Bayart D, Baniel P, Bergonzo A *et al.*. Broadband optical fiber amplification over 17.7THz range. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(18): 1569~1571

## 光通信技术的发展现状和趋势

张成云<sup>1</sup>, 何振江<sup>1</sup>, 徐慧梁<sup>1</sup>, 石尔<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>华南师范大学物理电信工程学院, 广州 510631; <sup>2</sup>四川大学化学工程学院, 成都 610065)

**摘要** 简要介绍了光通信的发展现状、最新技术和发展趋势,着重在大容量、长距离、波分复用、光纤技术、光放大这几个光通信的标志性技术方面作了论述,并简要阐述了未来光传输方案。

**关键词** 光纤通信 波分复用 孤子通信 光传输

### Present Status and Development Trends of Optical Communication Technologies

ZHANG Chengyun<sup>1</sup>, HE Zhenjiang<sup>1</sup>, XU Huiliang<sup>1</sup>, SHI Er<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Physics and Telecom Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631;  
<sup>2</sup>College of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract** This paper presents a brief summary on the present status, the state-of-the-art technologies and development trends of optical fiber communication, and the future transmission schemes. Major comments on optical fiber communication on several items are given, including large capacity, long distance, WDM, optical fiber and optical amplifier.

**Key words** optical communication wavelength-division multiplexing soliton communication optical transmission

### 1 引言

1966年,被称为“光通信之父”的英籍华人高锟(Kao CK)博士发表了一篇名为《光频率的介质纤维表面波导》(Dielectric fiber

Surface Wave-guides for Optical Frequencies)的论文后,才使得长距离、大容量光通信得以实现<sup>[1]</sup>。由于光通信的传输损耗低、带宽极大、抗电磁干扰、传输质量好、保密性好等特点而广受人们青睐。计算

机和多媒体通信的要求,无形中也促进了光通信技术的发展。目前,光通信已是通信网的主要传输方式,不同层次的光通信网几乎遍布全球。2003年3月23~28号,国际光纤通信学术会议(OFC'2003)在

收稿日期:2003-10-15;收到修改稿日期:2003-11-10

作者简介:张成云(1979-),男,安徽桐城人,2001年毕业于四川大学,现为华南师范大学物理系硕士研究生,主要从事光电技术及系统的研究。

美国亚特兰大举行,各国报道的最新研究和实验进展表明大容量、长距离、波分复用、光纤技术、光放大等几个方面是目前光通信技术的热点<sup>[2]</sup>。

## 2 向超大容量、超长距离波分复用、光时分复用和两者混合的方向发展

波分复用(Wave length division multiplexing,WDM)技术极大地提高了光纤传输系统的传输容量,在未来跨海光传输系统中有很大的应用前景,这几年波分复用系统发展也确实十分迅猛。目前 1.6Tbit/s WDM 系统已经大量商用,同时全光传输距离也在大幅度扩展,从目前的 600km 左右扩展到 2000km 以上,这项技术需要从四个方面入手:拉曼光纤放大器(RFA)、超强前向纠错技术(FEC)、色散管理技术、脉冲调制技术。日本 NEC 和法国 Alcatel 公司分别在 100km 距离上实现了总容量为 10.9Tbit/s (273×40Gbit/s) 和总容量为 10.2Tbit/s (256×40Gbit/s) 的最新世界记录,其中前者实现了 273 个信道,每信道 40Gbit/s 速率,间隔 50GHz,覆盖 S、C 和 L 波段。而后者实现了 256 个信道,利用锗硅技术实现每信道速率 42.7Gbit/s,其中 FEC 花费 7%,结合采用了交替间插的 75GHz 和 50GHz 信道间隔、残留边带滤波和极化复用技术,有效减少了路际干扰,频谱效率高达 1.28bit/s/Hz,系统工作范围覆盖 C 和 L 波段<sup>[3,4]</sup>。近年来超大容量密集波分复用(DWDM)系统在发掘光纤传输系统的容量方面更是前景诱人,每个波长之间的间隔不到 1nm。总部设在美国的 CIENA 公司,其多波 1600 型产品能够提供 40Gbit/s 系统(16×2.5Gbit/s),在普通的

STM-16 结构上能发送 32000 路话音。但使用 16 信道 DWDM 产品配一个 STM-16 接口,可传输 512000 路。国内报道的南宁至柳州 32×10Gbit/s SDH 密集波分复用系统工程通过国家验收,在国内实现了开满 32 波的 DWDM 系统。并且 OFC'2001、OFC'2002 上都报道有大量实验系统采用 DWDM 系统。

提高传输容量的另一种途径是采用光时分复用(OTDM)技术。与 WDM 通过增加单根光纤中传输的信道数来提高其传输容量不同,OTDM 技术是通过提高单信道速率提高传输容量,其实现的单信道最高速率达 640Gbit/s。它的关键技术是解决短脉冲生成技术、时分复用/分离、高速同步抽运技术等,作为技术开发和应用的趋势是研制简易型 OTDM 电路,目前还需要一定时间。但 OTDM 技术能克服 WDM 的放大器级联产生的增益特性不平坦、光纤非线性限制等缺点,并且被认为是一个长远的网络技术,将来的网络将采用全光交换和全光路由选择,OTDM 的一些特点使它在这些方面具有吸引力。从 20 世纪 90 年代开始,西方国家和日本才对 OTDM 进行了研究。在我国,“九五”期间国家“863”计划通信主题将 OTDM 列为重点课题,第一阶段的 8×2.5Gbit/s-100km 的 OTDM 实验已完成。在 2000 年的 ECOC 会议上报道了 NTT 的 1.28Tbit/s 的 OTDM 传输实验,传输距离为 70km,这是至今为止最高的单信道光时分复用传输速率。目前能制作 OTDM 收发装置的只有日本 NTT 公司。

仅靠 OTDM 和 WDM 来提高光通信系统的容量毕竟有限,可以把多个 OTDM 信号进行波分复用,从而大大提高传输容量。偏振复用

(PDM) 技术可以明显减弱相邻信道的相互作用。由于归零(RZ)编码信号在超高速通信系统中占空较小,降低了对色散管理分布的要求,且 RZ 编码方式对光纤的非线性和(偏振模色散 PMD) 的适应能力较强,因此现在的超大容量 WDM/OTDM 通信系统基本上都采用 RZ 编码传输方式。WDM/OTDM 混合传输系统需要解决的关键技术基本上都包括在 OTDM 和 WDM 通信系统的关键技术中。欧共体的 RACE 计划和美国正在执行的 ARPA 计划在发展宽带全光网中都部署了 WDM 和 OTDM 混合传输方式,以提高通信网络的带宽和容量。WDM/OTDM 系统已成为未来高速、大容量光纤通信系统的一种发展趋势,两者的适当结合应该是实现 Tbit/s 以上传输的最佳方式<sup>[4]</sup>。实际上,最近大多数超过 3Tbit/s 的实验都采用了时分复用(TDM、OTDM、ETDM) 和 WDM 相结合的传输方式。

## 3 光孤子通信技术

1834 年,Scott Russell 观察到孤子。1973 年,Hasegawa 和 Tappert 首次从理论上推断无损光纤中能形成光孤子。1980 年,贝尔实验室的 Mollenauer 等人用实验方法在光纤中观察到了孤子脉冲,1981 年,Hasegawa 和 Kodama 提出将光纤中的孤子作为信息载体用于通信,构造一种称为孤子通信的新光纤通信方案。从 1981 年提出光孤子通信至今 20 多年来,光孤子通信技术得到了空前的研究和发展,并已经取得了突破性进展。

光孤子通信是一种非线性全光通信,基本原理是根据光纤折射率的非线性光脉冲压缩与群速度色散(GVD)引起的脉冲展宽相平衡,从而使光信号脉冲在高速率长

距离传输过程中保持波形不变。因此,光孤子通信最适合于波分复用等超高速大容量光通信。虽然光孤子通信技术在实现超高速、长距离光通信中极具吸引力,但也存在有几个严重的问题:光纤自身结构产生的负群速度色散;放大器间距  $L_a$  没有常规的 IM/DD 或 WDM 系统中那么长;掺饵光纤放大器(EDFA)中放大的自发发射(ASE)噪声附加到孤子上,产生能量涨落和戈登-豪斯(Gordon-Haus)抖动<sup>[5]</sup>。基于这些存在的问题,提出了几种解决办法:“孤子控制”技术、定位散射孤子技术、暗孤子技术等。

图 1 是 80Gb/s-500km 孤子传输系统的实验装置。孤子源是主动锁膜 10GHz 掺饵光纤环型激光器,它能发射出 2.7~3.0ps 的孤子脉冲。一个平面光波回路(planarlight-wave circuit)用作稳定的光复用器以获得 80Gb/s 的脉冲序列。它由级联 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)组成,它的不同臂长分别对应不同的时间差:12.5ps、25ps、50ps。很容易从发送的 80Gb/s 信号中获得一个 10GHz 的时钟信号,10GHz 孤子单元是用幅度略有差异的孤子相互叠加而成的,这种技术也可用于减少孤子之间的相互作用。孤子传输光纤是采用色散位移光纤,当波长为 1.552 $\mu$ m 时,它的平均色散为 -0.19ps/km/nm<sup>[6]</sup>。

当单信道速率达到 40Gb/s 以上时,光孤子通信的优势将得到充分显示,因此光孤子通信,尤其是色散管理光孤子通信被认为是下一代超高速、超长距离越洋光纤通信和大容量城域网建设中的优选方案。

#### 4 未来光传输方案

光孤子技术用于远距离光传

输,采用归零(RZ)比特编码沿光纤生成光孤子脉冲序列。光孤子-波分复用系统(Soliton/RZ-WDM)与 NRZ-WDM 都用于超大容量、超长距离光传输中。图 2 说明了在综合考虑了 OTDM 和 WDM 后,RZ 编码方式在未来的光传输中有很大的应用空间。基于孤子的 WDM 系统相对于 NRZ 系统在传输大容量信号方面更有潜力,光孤子-波分复用系统在跨越海洋的大容量光传输中有相当的吸引力。在光孤子-波分复用传输系统中,主要的限制来自于孤子间相互作用引起的定时抖动和信道间的四波混频。在准零色散系统中,孤子间相互作用引起的频率漂移并不转换为定时抖动,所以运用周期性色散补偿技术,基于孤子的 RZ 传输系统很适合于高比特率的光孤子-波分复用系统<sup>[6]</sup>。

#### 5 光纤技术的新进展

下一代电信网需要支持更大容量、更长距离和更宽频谱范围的传输,目前这一代 G.652 光纤的性能已难以满足这一要求,因而开发敷设下一代光纤已成为必然。在干线网上光纤必须能有效支持未来超高速、超大容量和超长距离的传输,为此 ITU 开发了一种 G.655.A 光纤,并获得大量应用。朗讯(Lucent)推出了新型的全波光纤,它消除了常规光纤在 1385nm 附近由 OH 根离子造成的损耗峰<sup>[7]</sup>。康宁(Corning)和朗讯还分别推出了 LEAF 和 RS-True wave 光纤,它们都是非零色散位移光纤(NZDSF)<sup>[8]</sup>。然而,随着速率提高到 40Gbit/s 以及超长传输距离的实施,特别是复用波长数的继续增加,G.655.A 光纤参数的继续优化成为必要,为此,

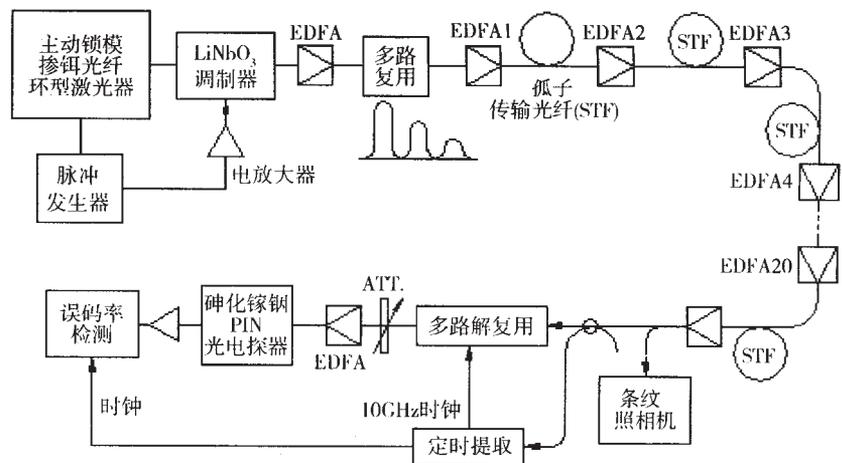


图 1 500km 的 80Gb/s 孤子传输系统

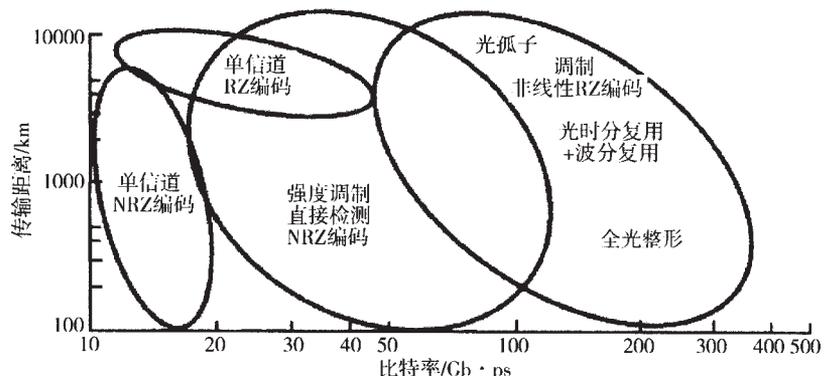


图 2 RZ 编码方式在追求传输距离/比特率的未来传输方案中的应用前景

ITU-T 开发了一种 G.655.B/C 光纤(后者的极化模色散更严格),其参数较 G.655.A 光纤更符合实际要求,大多数光纤厂家在下一代光纤设计中也都在朝这一方向努力,已有一系列光纤产品问世,其中特锐 Ultra 光纤是典型代表。OFC'2003 报告中使用的光纤几乎都是非零色散位移光纤,且充分利用 1500nm 波长的 C 和 L 波段,长途光纤线路都应选择具备足够宽的波段以适合加装 DWDM 和充分发挥其作用<sup>[2]</sup>。

## 6 光放大器

目前正在使用的光放大器有掺铒光纤放大器(EDFA)和拉曼光纤放大器(RFA),拉曼光纤放大器的工作原理是基于石英光纤中的受激拉曼散射(SRS)效应,与 EDFA 相比,有着明显的不同:理论上只要有合适的抽运源,就可以对光纤窗口内任一波长的信号进行放大;可以用传输光纤本身作增益介

质,并具有很宽的增益谱和较低的等效噪声系数;可以通过调整各个抽运的功率来动态调整信号增益平坦度<sup>[7]</sup>。光纤通信系统之所以优先使用波长 1550nm 窗口的 C 和 L 段,主要原因之一是 1550nm 波段已经制成掺铒光纤放大器,并能提供可靠应用。但 OFC'2002 会上报道沿光纤线路分布的拉曼放大正受到关注,也有实际应用。会上报道的关于 1550nm 波段应用的 8 个长距离系统中,有 5 个系统全使用拉曼放大,仅两个系统全部使用 EDFA,1 个系统是 RFA 和 EDFA 联合运用。而 OFC'2003 报道中可看出,光放大较多利用全拉曼,少数是 RFA 和 EDFA 联合运用,仅个别的仍全用 EDFA。这种趋势也给人们提出了问题:拉曼沿光纤线路分布放大技术如何适当使用抽运激光器以获取最好的拉曼放大<sup>[2]</sup>。国内有拉曼光纤放大器在工程上的首次应用,并取得了在 2.5Gb/s 系统 200km G.652 光纤上的工程

应用结果<sup>[7]</sup>。

## 7 结束语

虽然目前全球主要主干线路都采取光通信,然而接入用户的“最后一公里”线路由于其性价比较低,所以现阶段还没全部实现光纤通信,但实现全光通信一直是人们追求的目标。从目前的情况来看,未来光纤通信的主要发展方向是:主干传输向高速率、大容量的 OTN 光传送网发展,最终实现全光网,不断降低接入网成本、最终实现光纤到家。为追求这一目标,大容量、超高速的跨洲海底光纤快速发展,而我国大部分光通信器件仍依赖进口。光纤通信的发展涉及的范围、技术、影响力已远远超越其本身。势必对电信网、全球信息化、信息化产生深远的影响,可以肯定的是,它的发展结果将在很大程度上决定电信网和信息产业的未来格局,对 21 世纪的社会经济发展产生影响。

## 参 考 文 献

- 1 解金山,陈宝珍. 光纤数字通信技术(修订版). 北京:电子工业出版社,2002
- 2 张 煦. OFC-2003 关于光纤传输系统的报道. 光通信技术,2003, 27:6~7
- 3 韦乐平. 光通信技术的发展趋势. 电信工程技术与标准化,2003, (07):2~8
- 4 刘俭辉,丁永奎,贾东方等. Tbit/s 超大容量光纤通信系统的研究进展. 光学技术,2003, 29(4):408~410
- 5 Kazunori Suzuki, Masataka Nakazawa. Recent progress in optical soliton communication. *Opt. Fiber Technol.*,1995,(1):289~291
- 6 Shigeyuki Akiba, Shu Yamamoto. WDM undersea cable network technology for 100Gb/s and beyond. *Opt. Fiber Technol.*,1998, (4):21~25
- 7 于林生,董 胜,唐斯宁等. 拉曼光纤放大器在国内的首次工程应用. 光通信研究,2003, (3):29
- 8 尹军祖,徐海明. 波分复用技术的快速发展. 公安大学学报(自然科学版),2002, (1):73