

越洋海光缆系统光传输技术现状及其发展趋势

刘芳

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004)

摘要:介绍了海光缆系统光传输技术近期现状,对色散管理、光纤、无缝光放大、信号调制编码格式、高增益 FEC 和高信道速率 WDM 等关键技术进行了论述,并对越洋海光缆系统的发展趋势进行了展望。

关键词:海光缆系统;色散管理;波分复用;前向纠错;调制格式

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2013)05-0023-03

Recent status and trends in optical transmission technologies supporting the transoceanic optical submarine cable systems

LIU Fang

(The 34th Institute of China Electronics and Technology Group Corporation, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper introduces overviews of the transoceanic optical submarine cable systems including their key technologies, such as dispersion managed fiber, Seamless wideband optical amplifier, modulation formats, higher-gain FEC and higher channel bitrate WDM, discusses their technical trend toward the next generation.

Key words: optical submarine cable systems; dispersion managed; WDM; FEC; modulation formats

0 引言

海缆系统有着非常悠久的历史。1850年,英国的 John 和 Jacob Brett 兄弟在多佛海峡成功放置第一条海底电缆。1866年,第一条横贯大西洋的电缆成功地将北美与欧洲相连。世界上最早的越洋海光缆通信系统建于 1987 年底,即第 8 号横跨大西洋电话电缆(TAT8)和 TPC3,其传输速率为 280Mb/s,光波长为 1310nm,中继为电再生中继。其技术取得突破性进展源于两个主要的发明:激光器和光纤。两年后,长距越洋海光缆系统 TAT-9 和 TPC4 的传输速率提升至 560Mb/s,波长为 1550nm^[1]。

1994 年前后,色散位移光纤和掺铒光纤放大器(EDFA)的出现,解决了海底 O-E-O 中继的电子瓶颈,使得海光缆系统 TAT-12/13 和 TPC-5 无需电中继就可实现长距越洋传输。1998 年,出现了负色散非归零色散位移光纤(NZDF)和波分复用(WDM)技术,使得长距越洋海缆系统(中美海缆)可以在一根光纤中同时传送多个波长的光信号,传输速率低于 5Gb/s 时

无需再生中继。1999 年,大 Aeff-NZDF 光纤首次被应用于越洋海缆系统线路中,使得海光缆系统的信道传输速率提升到 10Gb/s。如今,海光缆系统已成为全球宽带网络的基础和连接世界各地的重要电信设施。

1 越洋海光缆系统技术现状

越洋海光缆系统始终追求的是超大容量和超长距离传输,而限制越洋海光缆系统信号传输容量和传输距离的主要因素是光纤中的波长色散和非线性效应导致的光信号质量劣化。针对这些问题,现有的越洋海光缆系统采用了多重技术来确保海缆传输线的色散累积保持在较低的水平,并使信号失真最小化。

1.1 色散管理及光纤技术

越洋海光缆系统为实现大容量和中继长跨距,除了选用极低损耗(0~0.17dB/km)的二氧化硅纤芯光纤外,为了减少信号在长距离传输过程中由于色散和非线性光效应导致的波形失真,还对中继器跨距间光纤的色散值和色散斜率进行局部设计管理,以达到整个系统色散减少的效果。此外,高密级波分复用带来的信道信号谱展宽问题,可以通过使色散斜率最小化来达到整个传输带宽色散特性平坦化。

收稿日期:2013-03-08。

作者简介:刘芳(1973-),女,工程师,从事光通信技术研究和项目管理工作。

目前,跨洋和跨洲际海缆传输系统中中继跨距间的光纤由正色散斜率(+D)光纤和负色散斜率(-D)光纤组成,整个线路的光纤链接被设计成用+D 光纤和 -D 光纤交替补偿色散斜率的配置结构。图 1 为康宁公司的大 A_{eff} 非归零正色散位移光纤和负色散斜率光纤构成的色散斜率交替补偿链接线路。图 1 中,大 A_{eff} +D 光纤被置于跨距的起始位置,即光功率最大位置,信号在注入光纤时有一个较大的 A_{eff} ,光纤的非线性被减至最小。-D 光纤具有较低的 A_{eff} 且被熔接在跨距的尾端,低光纤色散斜率可以改善位于传输带宽边缘信道(边缘信道的色散累积要比中心位置的严重)的特性,使色散补偿最小化。+D 光纤和 -D 光纤之间的色散值、色散斜率、长度比例以及中继跨距长度都存在一定的函数关系,配置的结果将使整个系统的色散及色散斜率接近为零^[1-3]。

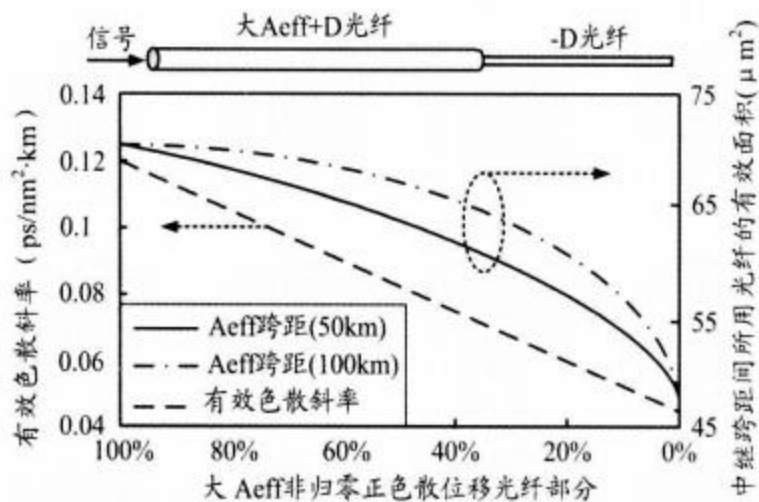


图 1 +D 光纤和 -D 光纤长度比以及有效色散斜率与 A_{eff} 光纤相关长度的关系图

康宁公司的色散管理光纤技术可使大容量海光缆系统传输距离更长(9,000km 以上),目前被大多数先进的越洋海缆系统设计所选择。此外,还有一些复杂的光纤排列组合配置方案也适用于海缆系统。

1.2 光放大技术

光放大是越洋海光缆系统使用的技术之一。EDFA 组态简单且具有增益带宽宽、输出功率大、噪声指数低和可靠性高等特点,在越洋海光缆系统中占有非常重要的技术地位。现有的 EDFA 在大于 36nm 带宽的范围内具有低于 0.1dB 的增益平坦特性,当输出功率大于 +16dBm 时,其噪声指数低于 4.5dB。这些特点使海光缆系统在十年内有巨大进步。

喇曼放大技术是被公认的可用技术,与传统的 EDFA 相比,喇曼技术可增加光谱带宽。但是光谱带宽越宽,增益平坦度管理越复杂。因为喇曼需要多泵浦配置,喇曼效应对信号提供的增益贯穿从泵浦到信号的全过程,泵浦之间存在的能量转换,会导致低波长

的能量转换给长波长。放大器带宽越宽,需要配置的泵浦就越多,泵浦间的交互作用就越大,增益倾斜越严重。另外,线路维修损耗在 3dB 左右时,喇曼的增益变化也会有很大的不同。这些都需要设置多参数来调整,由此增加了系统的复杂性。

系统设计者常常为了追求系统总容量的最大化,只考虑技术实现的可能性而忽略复杂的参数设计带来的成本问题。考虑到市场需求和建设成本,还是需要 EDFA 和喇曼放大器进行合理性选择。目前,EDFA 仍为主流技术。

1.3 信号调制编码格式

陆地系统的调制/解调技术通常使用非归零(NRZ)编码,而海缆系统则广泛使用归零(RZ)编码。在平均功率相同的情况下,相比 NRZ 码,理论上 RZ 码可提高 3dB 的峰值功率。因此,即使 S/N 偏低,使用 RZ 码仍可获得较好的传输质量。传统的海底光缆系统使用的调制编码都是利用光强度信息的开关键控(OOK)编码格式,即归零开关键控(RZ-OOK)编码方式,但最近的海光缆系统更偏向于使用具有高接收灵敏度的归零差分相移键控(RZ-DPSK)调制编码格式,这种格式以光相位的形式加载信息^[4]。

RZDPSK 调制编码方式的发射机端以相位差分信息的形式重叠发送数据,接收机端应用 1bit 延迟差分出光信号。该光信号被平衡接收机检测到并将相位信息转换为具有两倍振幅的电信号,由此将光信号调制为数据流。与传统的 RZ 调制编码特性相比,RZ-DPSK 调制编码可将接收灵敏度提高 3dB,并且 DPSK 的特点是在每个脉冲中间增加某些特殊的相位以抵消干扰,因此 RZ-DPSK 更能够抵抗自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等非线性效应的影响。图 2 为同一传输线路上分别使用 RZ-DSPK 与 RZ-OOK 编码所获得的仿真 Q 值图^[5]。

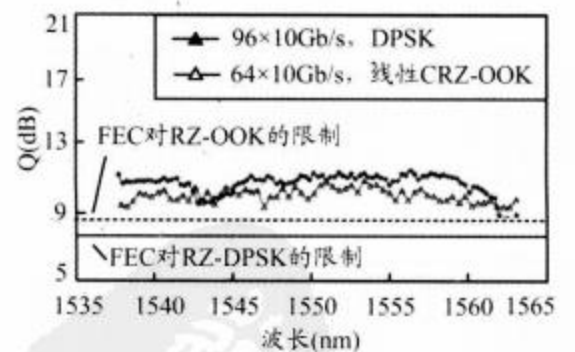


图 2 仿真 Q 值图

由于长距离传输使用了多级海底光中继器,每个海光缆中继器都将改善 3dB 的动态范围,当中继器的跨距相同时,有可能将传输距离扩展 2 倍。因此,RZ-DPSK 编码现在已成为超长距离传输系统必不可少的调制技术。

1.4 前向纠错(FEC)技术

数字传输系统的一个重要参数是 FEC 编码,它可以在接收机端进行误码检测和纠错,使 BER 满足用户的要求(通常小于 10^{-12})。FEC 编码提供一个比纠错前低很多的阈值(称为 FEC 阈值),并要求有一个既与开销有关,又能增加足够冗余信息的预编码信号。用于海光缆系统的 FEC 有各种类型,如某些只占开销 7% 的预编码信号,可纠错 BER 低至 4×10^{-3} ,一些占开销 23% 的预编码信号,可纠错 BER 低至 10^{-2} ,非常接近理论极限。由于 FEC 技术的研究结果,使得数字传输系统的信道速率能较容易的从 2.5Gb/s 向 10Gb/s 过渡^[1]。

在传统的海光缆系统中,基于里德-索洛蒙(Reed-Solomon)码的 FEC 技术被广泛应用,它缓解了对 BER 的限制,使降低信号功率和非线性损伤成为可能。FEC 技术的研究,对 10~40Gb/s 系统传输速率的提升非常有好处。

1.5 WDM 技术

WDM 技术的引入带来了光传输系统容量的巨大提升。由于越洋海光缆系统建设的特殊性,每根海光缆可容纳的光纤数有限,所以需要提高每根光纤的光谱效能,只有提升光纤信道速率和最大限度地增加 WDM 信号的数量,才能进一步提升系统传输容量。增加 WDM 信号数量的关键是在有限的带宽中减少信号波长的相邻间隔^[6,7]。目前,在大多数海光缆系统中,信道(或波长)间的谱线间距减少到 50GHz 或 33GHz,而日本 NEC 正在将其波长间隔为 25GHz 的超高密度 WDM 技术推向海光缆系统^[8]。

然而,信道速率和 WDM 信号数量并不是可以无限提升的,随着传输距离的增加,光纤传播中的光纤非线性累积影响越大,要达到较高的光谱效能就越困难,图 3 为近年来 WDM 传输达到的光谱效能与传输距离的关系图。从图 3 可以看出,对于 10Gb/s 系统而言,一方面要考虑向 40Gb/s 信道速率的提升,另一方面要增加

WDM 信号数量(目前可达 192)。对于正在规划的 40Gb/s 系统而言,WDM 数量分别为 64 和 96。

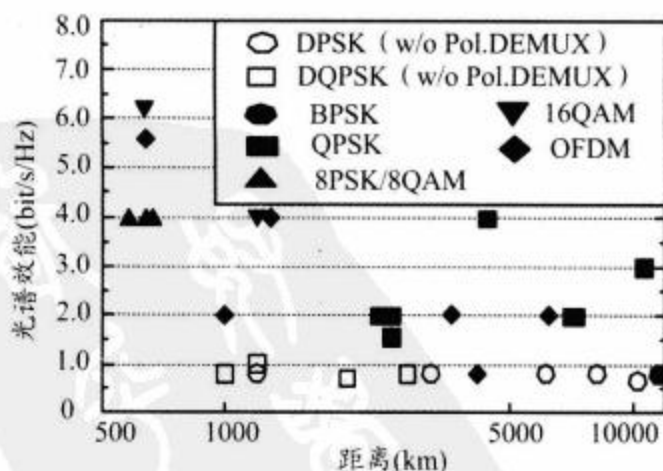


图3 光谱效能与传输距离关系图

2 越洋海光缆系统技术发展趋势

网络配置的灵活性和传输容量的进一步提高是海光缆系统的未来发展趋势。目前,10Gb/s 系统的传输容量已达到 2Tb/s 左右的理论带宽极限值,要超越现有的 10Gb/s 系统,使系统能够在 40Gb/s 信道速率上运行是越洋海光缆技术的发展趋势,如超低损耗和低非线性光纤技术、数字信号处理补偿技术、具有较高灵敏度的非线性容忍的多级调制编码技术、偏振复用技术的研究、具有低噪声指数和高功率效率的无缝宽带光放大器技术和相干接收技术的研究,都对 40Gb/s 系统的商用非常重要,这些研究甚至是为了在 2025 年实现传输距离超过 10,000km、系统容量达到 100Tb/s 的目标而做的准备。

3 结束语

“传输容量与系统长度的乘积每 4 年增长 10 倍”是光通信领域中所谓的摩尔定律,近年来,海光缆系统的传输容量正在依照该项定律增长。而目前流行的高精度视频信号及云存储等大带宽数据业务使得对整个电信网络容量的需求在快速提升,这种需求推动了相关行业的发展,极大地促进了越洋海光缆传输系统的进步。

参考文献:

- [1] CHARLET G,BIGOS,Upgrading WDM Submarine Systems to 40-Gbit/s Channel Bitrate [J].Proc. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006,94(5):935-951.
- [2] TEN S,Advanced Fibers for Submarine Networks [C].San Diego: OFC/NFOEC,2010.
- [3] GOLOVCHENKO E A, RICHARDSON L J,BAKHSHI B, et al.Pushing The Reach of Repeaterless Transmission Systems [J].IEEE Journal of Lightwave Technology, 2008,26(1): 204-208.
- [4] ANDERSON W.T, LIU L,CAI Y, et al. Modeling RZ-DPSK Transmission-Simulations and Measurement for an Installed Submarine System[C]. Anaheim:Proc.OFC/NFOEC,2006.
- [5] MANNA M,Golovchenko E.A,Increasing Maximum Capacity on installed Submarine Cable Systems with RZ-DPSK Transceivers [J].Proc. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2008,16(5):233-234.
- [6] FREUND R, MOLLE L, CASPAR C,et al.Higher Bitrates and Advanced Modulation Formats Facilitate Overlay Upgrades of Installed Submarine Systems[C].Cannes:Proc. ECOC, 2006.
- [7] VELJANOVSKI V, SLEIFFER V,BORNE D V D,et al.125-Gb/s CP-QPSK Field Trial over 4108km of Installed Submarine Cable[C].Los angeles:OSA/OFC/NFOEC,2011.
- [8] MORITA I,SUZUKI M, Innovations for Future Optial Submarine Cable Systems[C].Japan:OECC,2010.