



面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术

罗 鸣,贺志学,胡 荣,刘 武,杨 奇,余少华

(武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室 武汉 430074)

摘 要:随着信息社会对通信需求的急剧增长,运营商对骨干网传输容量进行扩展的需求日益迫切。首先对单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术的背景进行了简单介绍;接着对近年来国内外超大容量单模单纤光传输实验进行了比较;之后详细分析了实现单纤 100 Tbit/s 容量光传输系统的技术路线,并重点介绍了在国内首次实现的 C/L 波段 100.2 Tbit/s 超大容量双偏振 DFT-S 128QAM OFDM 信号传输 80 km G.652 光纤的系统实验;最后,对面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术的研究前景进行了展望。

关键词:单纤 100 Tbit/s 光传输系统;相干光 OFDM;大有效面积光纤;Raman 光放大器

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015272

100 Tbit/s Optical Transmission Technology on Single Mode Fiber

Luo Ming, He Zhixue, Hu Rong, Liu Wu, Yang Qi, Yu Shaohua

(State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid development of the information society, the demand for the transmission capacity of the backbone network is becoming more and more urgent. Firstly, the background of 100 Tbit/s optical transmission technology on single mode fiber (SMF) was introduced. Then some large capacity optical transmission experiments on SMF in recent years were compared. Next, the technical route of 100 Tbit/s optical transmission system on SMF was analyzed, and it was focused on the system experiment of C and L band 100.2 Tbit/s dual polarization DFT-S 128QAM OFDM signal transmission over 80 km G.652 fiber which was first in China. Finally, research foreground of 100 Tbit/s optical transmission technology on SMF was prospected.

Key words: 100 Tbit/s optical transmission system on single mode fiber, coherent optical OFDM, large effective area optical fiber, Raman optical amplifier

收稿日期:2015-08-25;修回日期:2015-10-12

基金项目:湖北省重大科技创新计划基金资助项目(No.2014AAA001),国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No.61307083),国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2010CB328300)

Foundation Items: Major Scientific and Technological Innovation Projects of Hubei Province (No.2014AAA001), The National Natural Science Foundation of China(No.61307083), The National Basic Research Program of China(973 Programm)(No.2010CB328300)

论文引用格式:罗鸣,贺志学,胡荣等. 面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术. 电信科学, 2015272

Luo M, He Z X, Hu R, *et al.* 100 Tbit/s optical transmission technology on single mode fiber. Telecommunications Science, 2015272

1 引言

随着互联网、云计算、移动宽带、数据中心的快速发展,网络传输带宽需求呈现爆炸式增长,推动着超大容量光传输系统的发展。为了提升现有光传输系统的容量,波分复用、数字相干接收及低噪声光放大等关键技术被认为是提升容量的有效解决方案^[1]。自 20 世纪 80 年代末,波分复用技术被引入光纤通信领域之后,单模光纤单纤传输容量成倍增长。仅最近 15 年内,实验室中获得的单模光纤单纤传输容量就从 10 Tbit/s 迅速扩展到超过 100 Tbit/s。在实际商用系统方面,目前已大规模商用的单通道 100 Gbit/s DWDM 传输系统的满配信道数量已经超过 180 波,总容量接近 20 Tbit/s 数量级。随着下一代单通道 400 Gbit/s/1 Tbit/s 光传输技术的发展,商用骨干网单纤传输容量也将很快接近或达到 100 Tbit/s 数量级。通过提升信道速率,并且结合波分复用技术是目前提高光纤传输系统通信容量的主流技术。

另一方面,相比于传统的直接探测方式,数字相干接收技术具有灵敏度高、噪声低、传输质量好的优点。但由于数字相干技术实现较为复杂、对器件要求较高等缺点,过去长期难以真正实用。近 10 年以来,随着窄线宽激光器、集成相干接收器件以及高速数字信号处理芯片的突破,数字相干接收技术被应用到商用高速光纤通信领域,并成为新一代单通道 100 Gbit/s 商用骨干光传输网的主要传输方式。

以数字相干技术为基础,国内外众多研究机构围绕高谱效率和高波特率展开了一系列研究:2011 年,Qian D Y 等人实现了 PMD-1 024QAM-OFDM 光信号高阶调制,获得了目前相干光信号单通道最高谱效率^[2];2012 年 OFC 会议上

Raybon G 等人将相干光信号调制的最高波特率提升至 80 Gbaud/s,创造了当时相干光信号最高调制波特率的纪录^[3]。最后,传统商用光纤传输链路中的 EDFA(掺铒光纤放大器)已经不能完全满足迅猛增长的传输容量对光放大器噪声指数的需求,因此低噪声光放大技术成为学术界和业界讨论的热点问题,Raman(拉曼)光放大器、超低噪声 EDFA 等技术均是未来光纤传输链路放大的候选方案。波分复用、数字相干接收及低噪声光放大等关键技术的逐步应用,为实现单纤 100 Tbit/s 容量的光传输系统奠定了坚实的基础。

2 超大容量单纤光传输技术研究现状

本文中所说的单纤光传输技术中的“单纤”,特指一根单芯单模光纤,少模光纤、多芯光纤不在本文的讨论范围之内。截至 2014 年底,国内外容量超过 60 Tbit/s 的单纤光传输系统实验见表 1。

从表 1 可以看出,第一个容量超 60 Tbit/s 的单模光纤传输系统实验是 2010 年在 C/L 波段采用 PDM-36QAM 单载波和相干探测技术完成的,传输距离 320 km,使用了大有效面积光纤结合 EDFA 和拉曼放大器混传的链路,谱效率为 8 bit/(s·Hz)^[4],同年 Sano A 采用 PDM-16QAM 单载波调制方式在 C/L+波段实现了传输容量达 69 Tbit/s 的光传输系统实验,信号用 EDFA 和拉曼放大器混合放大,在大有效面积光纤链路上传输了 240 km,谱效率为 6.4 bit/(s·Hz)^[5]。近几年,高阶调制方式如 64QAM、128QAM、512QAM 和 1 024QAM 也被应用到光传输系统中,通过提升传输谱效率来增大光传输容量^[2,6-8],分别实现了 C/L 波段 101.7 Tbit/s PDM-128QAM-OFDM 信号在标准单模光纤结合拉曼放大器链路上传输 165 km 的系统实验^[6]和 C/L+

表 1 国内外单纤光传输容量超过 60 Tbit/s 的波分复用光传输系统实验统计

传输容量/(Tbit·s ⁻¹)	信道调制格式	频带	传输距离/km	光纤类型	放大方式
64 ^[4]	107G-PDM-36QAM	C/L	320	ULAF(127 μm ²)	EDFA+Raman
69 ^[5]	171.2G-PDM-16QAM	C/L +	240	PSCF(110 μm ²)	EDFA+Raman
101.7 ^[6]	294G-PDM-128QAM-OFDM	C/L	165	SMF(80 μm ²)	all Raman
102.3 ^[7]	548G-PDM-64QAM-SC-FDM	C/L +	240	PSCF(110 μm ²)	all Raman
67.44 ^[11]	183.3G-PDM-16QAM-OFDM	C/L	160	SMF(80 μm ²)	all Raman
100.2 ^[12]	267.27G-PDM-128QAM-DFTS-OFDM	C/L	80	SMF(80 μm ²)	all Raman



波段 102.3 Tbit/s PDM-64QAM 单载波频分复用信号在大有有效面积光纤结合拉曼放大链路上传输 240 km 的系统实验^[7],而该实验是目前单模光纤波分复用光传输系统的最大传输容量。

过去,由于实验设备和技术水平的限制,国内在超大容量单模单纤光传输领域的研究明显落后于国外。近 5 年来,武汉邮电科学研究院(以下简称武邮)作为国内光纤通信研究的主力军在该领域奋起直追,逐渐接近或达到国际领先水平。2011 年,在国内首次实现了 C 波段 30.7 Tbit/s 相干光 PDM-16QAM-OFDM 80 km 标准单模光纤传输实验^[9]。2012 年,采用 DFT-S OFDM 调制技术实现了 168×100 Gbit/s DFT-S 8PSK OFDM 2 240 km 标准单模光纤传输系统实验^[10],其容量距离积属当时国际领先水平。2013 年,采用 PDM-16QAM-OFDM 调制实现了 67.44 Tbit/s 超大容量 160 km 标准单模光纤传输系统实验^[11],达到了当时国内光纤传输的最高水平。2014 年,在国内首次实现了 100.2 Tbit/s 双偏振 DFT-S 128QAM OFDM 信号传输 80 km 标准单模光纤的系统实验^[12],填补了我国在这一领域的空白。

图 1 显示的是目前国际单模光纤波分复用系统传输容量的现状(截至 2014 年底)。可以看出,实现的单纤 100.2 Tbit/s 传输容量已属国际领先水平,与 NTT、NEC 等国外研究机构处于同一水平线,而在国内属于首次实现单

纤 100 Tbit/s 级超大容量光传输。

3 单纤 100 Tbit/s 容量光传输系统的技术路线

各种研究表明,100 Tbit/s 传输容量被认为是单模光纤传输的极限容量,超过这一容量时单模光纤内的非线性效应和 OSNR(光信噪比)的代价将使无误码传输难以实现。为了实现单纤 100 Tbit/s 容量的光传输系统,必须解决以下 3 个现实问题:如何产生数量庞大的信道光源;如何实现高调制阶数和高谱效率的光信号调制;如何降低光纤传输链路的功率损耗和噪声累积,同时降低链路的非线性损伤。针对这 3 个问题提出实现单纤 100 Tbit/s 容量光传输的技术路线。

3.1 多载波光源产生技术

目前,由于光、电器件带宽的限制,实验室中进行的超大容量单模单纤光传输系统实验都是利用 DWDM(密集波分复用)的方式,将低速调制的光载波在光频域上并行复用来实现传输容量的增加。面向百 Tbit/s 级超大容量的光传输系统的频谱,覆盖了 C 波段和 L 波段的绝大部分,这意味着系统需要提供数百个间隔相等的稳定光源。对比当前主流的超大容量光传输实验,稳定光源的获取都采取以下两种方式。

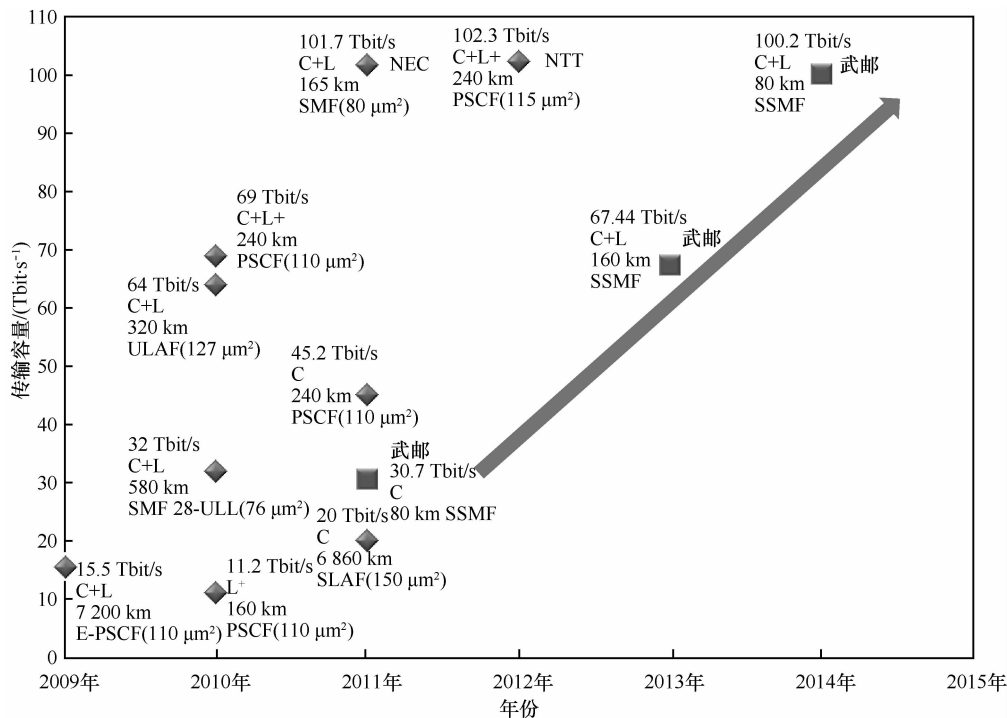


图 1 单模光纤 WDM 系统传输容量现状

- 参考文献[6,7]采用数百个成本较低的DFB(分布反馈激光器)光源构成DWDM信道光源。由于DFB光源成本只有窄线宽光源ECL(外腔激光器)的1/10,因此可以大大降低实验系统成本。但DFB光源的线宽较宽,不适合用于相干光通信,在实际测试每个信道的星座图和BER时,要使用一个波长可调的窄线宽激光器来代替要测试的那一路信道光源。该方法只限于实验室研究使用,实际系统中均需要采用窄线宽激光器作为系统光源,光源数量多,成本高。
- 参考文献[11,12]采用16个独立激光光源,并利用多载波光源产生技术,每个独立光源展宽为25个频率间隔为25GHz的光载波。因此,16个独立光源展宽为数百个光子载波,且每个光子载波的OSNR均大于40dB。由于引入了多载波产生技术,只需要少量激光器就可以产生大量频率间隔固定的载波光源,大大降低了系统成本并提升了系统性能。

因此,利用少量激光器来产生大量频率间隔固定的载波光源,从而减少激光器的数量,节省成本并提高系统性能的多载波光源生成技术,是百Tbit/s级超大容量光传输系统的关键技术,是系统构建的第一个环节,是系统中不可缺少的重要部分。多载波光源产生技术的好坏直接决定百Tbit/s级超大容量光传输系统的系统性能。

3.2 新型光调制和复用技术

要实现百Tbit/s级超大容量单模单纤光传输系统,其最大的技术瓶颈就是如何有效提高系统谱效率,新型的调制技术和有效的复用技术被认为是提升谱效率的关键。对调制格式而言,从理论上讲只要提高调制阶数,就可以提高系统谱效率,从而提升系统的传输容量。但在实际系统中,调制阶数的提高要求接收端具有更高的光信噪比。单纯地通过提高调制阶数来提升系统传输容量会受到一定的限制,需要在探求新型光调制技术的同时构建信号传输损伤机制,通过预调制处理及数字信号补偿的方式实现系统容量的提升。

提升谱效率的另一种途径就是如何有效地减少通道间的保护间隔,更大限度地利用有限的频谱资源,光OFDM(正交频分复用)技术及单载波奈奎斯特调制复用技术均可以有效地减少系统通道间的保护间隔,有效提升系统谱效率,是实现百Tbit/s级超大容量光传输系统首选的调制复用技术。近年来,单载波奈奎斯特调制复用技术逐

渐成为研究热点,其原理是在信号发射端用电域或者光域滤波的方式,利用奈奎斯特滤波器对频谱进行整形,整形后的子波带频谱接近一个矩形,其频谱带宽等于光子载波信号传输波特率,能够极大地减小带外的能量泄露,从而减小子波带之间的串扰^[3]。但单载波奈奎斯特滤波调制,无论是电域整形还是光域滤波,都会增加一定的成本,频带间隔过小会导致其频带间干扰引起系统性能下降,谱效率提升遭遇瓶颈。

相干光OFDM是一种多载波调制方式,首先将输入信号经过串并转换后变为频域上的并行数据,然后通过傅立叶反变换(IFFT),将其变为时域信号再进行传输,在接收端,信号通过傅立叶变换(FFT)后转换到频域上再进行信号的解调。相干光OFDM在频域上呈现的是矩形频谱,这使其能够更好地适用于多级光学滤波系统,OFDM的谱效率从原理上来说比传统单载波系统高一倍,在实际应用中也优于其40%以上;另一方面,相干光OFDM由于引入了循环前缀,因此拥有较强的抵抗色度色散和偏振模色散的能力;此外,OFDM信号还具有DSP运算复杂度低、接收端要求的信号采样率低等优良特性^[4]。然而其高峰均比易导致非线性效应、过多的循环前缀及导频信息限制其谱效率的进一步提升。

针对传统的OFDM信号峰均功率比较高导致非线性容忍度较差的缺点,DFT-S(离散傅立叶变换扩展)OFDM调制应运而生。它与传统OFDM调制的不同点在于,发送端数据映射之后,将数据分为 N 个子带,先经过一个离散傅立叶变换,将这 N 个子带在频域上进行扩展。扩展之后的结果再进行反向快速傅立叶变换,将信号从频域转向时域。在这一过程中,发送端的DFT-S OFDM信号峰均功率比相较于传统OFDM信号低约5dB。参考文献[15,16]均证明,在OFDM光纤传输系统中,DFT-S技术可以有效地降低发送端的峰均功率比,从而提高光信号的最佳入纤功率,改善超大容量光传输系统性能。

3.3 光纤链路及放大方式

商用的单模光纤传输系统主要利用G.652标准单模光纤作为传输介质,使用EDFA光放大器进行衰减补偿。当传输容量达到100Tbit/s级别时,由于系统通道数的急剧增加,入纤功率大幅提高;同时,传输信号的调制阶数达到或超过64QAM,使得接收端性能对传输链路损伤极为敏感,因此要实现100Tbit/s级别的长距离传输,需要更为先进的光纤链路和放大方式。



目前,100 Tbit/s 级单模光纤传输链路主要通过以下3种手段提高传输距离。

(1) 大有效面积光纤链路

标准单模光纤的有效面积为 $70\sim 80\ \mu\text{m}^2$, 而大有效面积光纤的有效面积一般超过 $110\ \mu\text{m}^2$ 。更大的有效面积可以显著降低光纤的非线性效应, 提高信号的入纤功率, 增加接收端光信号的 OSNR。大有效面积光纤的优良性能表现, 使它成为近年的研究热点, 也使其成为 100 Tbit/s 容量单模光纤传输链路的备选方案。

(2) Raman 光放大器补偿链路损耗

Raman 光放大器的工作原理是基于石英光纤中的受激拉曼散射效应, 在形式上表现为处于泵浦光的拉曼增益带宽内的弱信号与强泵浦光波同时在光纤中传输, 从而使弱信号光得到放大。相比于 EDFA 放大器, Raman 光放大器具有全波段放大、超低噪指数、抑制非线性效应等显著优势, 因而是单纤 100 Tbit/s 级光传输链路的首选放大方式, 表 1 中所列的超大容量光传输实验均使用了 Raman 光放大器。

(3) 缩短链路跨距

常规商用光纤链路的跨距一般为 $80\sim 100\ \text{km}$, 而单纤 100 Tbit/s 级光传输链路跨距一般为 $40\sim 50\ \text{km}$ 。更小的跨距意味着更小的链路损耗和更小的累积噪声, 对提升接收

端的 OSNR 有积极意义。

上述方法已经在国际上一些超大容量单模光纤传输实验中得到了应用。参考文献[6]采用 55 km 跨距的标准单模光纤结合 Raman 光放大器, 实现了 101.7 Tbit/s 双偏振 OFDM 128QAM 信号传输 165 km, 在世界上首次实现了 100 Tbit/s 容量级别光信号的单模光纤传输; 参考文献[7]采用 80 km 跨距的大有效面积光纤结合 Raman 光放大器, 实现了 102.3 Tbit/s 双偏振单载波频分复用 64QAM 调制信号传输 240 km。

4 国内首次单纤 100 Tbit/s 容量的光传输系统实验介绍

在 67.44 Tbit/s 超大容量光传输实验研究的基础上, 通过研究高阶调制格式带来的系统性能恶化等问题, 采用双偏振 DFT-S 128QAM OFDM 高阶调制结合全链路拉曼放大, 实现 C/L 波段 100.2 Tbit/s (净荷速率) 超大容量超密集波分复用相干光 OFDM 信号传输 80 km G.652 光纤的系统实验, 实验系统装置如图 2 所示。

系统的详细配置如下。

在发射端, C/L 波段各 8 个光源, 共 16 个光源, 分别分为 8 路奇数路和 8 路偶数路, 8 路奇数路光源和 8 路偶数路光分别经过 4×1 保偏耦合器耦合后, 利用保偏 EDFA 放

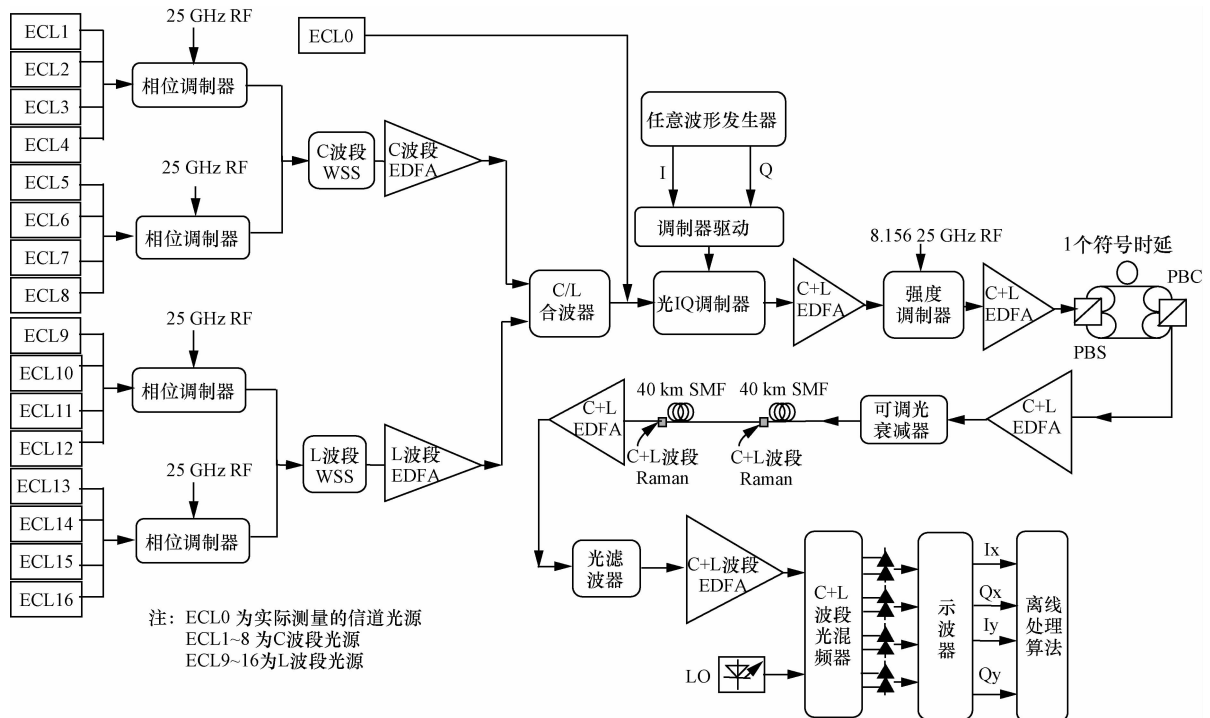


图2 100 Tbit/s 相干光 OFDM 80 km SSMF 传输系统实验框架

大至 23 dBm 后,进入相位调制器生成多载波光,相位调制器分别被频率为 25 GHz、强度约为 1.5 W 的正弦波信号调制,调制后每个光源生成了 23 个以上的光子载波,每个光子载波间隔为 25 GHz,生成多载波经过 WSS 整形合波后,根据光器件的波长范围,共产生 C 波段 190 路、L 波段 185 路,共计 375 路频率间隔为 25 GHz 的光传输信道,经过 C/L 合波器后进入 IQ 调制器。另有一个单独的波长可调的 ECL 激光器输入 IQ 调制器,该光源是测试每一路信道误码率和星座图的种子光源,用来替代多载波产生的光载波。

传输信号由 MATLAB 编程产生, $2^{31}-1$ 的伪随机码经过映射为 DFT-S 128QAM OFDM 基带信号,该基带信号包含 168 个带有有效载荷的子载波,另有 4 个子载波作为导频用以估计相位,2 个子载波用来抵消相干光接收时本振光源对信号的影响,总子载波数为 256 个,1/32 的码元时间作为循环前缀,采用泰克公司的任意波形发生器将编程的 DFT-S 128QAM OFDM 基带信号生成电信号,通过 IQ 调制器将该电信号同时调制到所有光子载波上,经 EDFA 放大至 22 dBm,进入强度调制器,该调制器被频率为 8.156 25 GHz、强度为 10 mW 的正弦波信号调制后,生成的子载波信道调制光被扩展为 3 路频率间隔为 8.156 25 GHz 的子信道,每路子载波信道的传输信号带宽为 24.468 75 GHz,其略小于子载波信道间隔(25 GHz),目的是为相邻的信道留出保护间隔。

生成的 DFT-S 128QAM OFDM 信号经过一个偏振分束器,该偏振分束器的一路相比另外一路延迟了一个 OFDM 帧时间长度(22 ns),用以仿真偏振复用状态,由此产生了每路信道。每个 8.156 25 GHz 间隔子信道的传输速率为 $12 \times 7 \times 2 \times 168 / (256 + 8) = 106.9$ Gbit/s,每路 25 GHz 间隔的光子载波信道速率为 3×106.9 Gbit/s = 320.7 Gbit/s,每路信道的谱效率为 12.828 bit/(s·Hz)。由此,该系统的 375 路信道的总传输速率为 120.262 5 Tbit/s,由于系统使用第三代 FEC 纠错编码,解码门限为 0.02,编码冗余为 20%,因此系统净传输速率为 $120.262\ 5 / (1 + 0.2) = 100.218\ 7$ Tbit/s,净谱效率为 10.69 bit/(s·Hz)。信号经过两段由 Raman 放大器放大的 40 km 标准单模光纤(SMF)传输后,到达接收端,经过接收端 EDFA 放大和光滤波器滤波后,得到任意路的光子载波信号,调整相干接收端的本振光源的波长,利用相干接收将任意路的光子载波信号解调,通过平衡接收机的光电转换输入进入实时示波器进行数据采集,信号由实时

示波器模数转换后,通过计算机离线处理后得到恢复,离线处理一般都经过信号同步、循环前缀去除、串并变换、FFT、信道估计、相位估计等步骤来恢复解调出最终数据,恢复的 128QAM 星座图及整形后的 375 个光子载波光谱如图 3 所示。

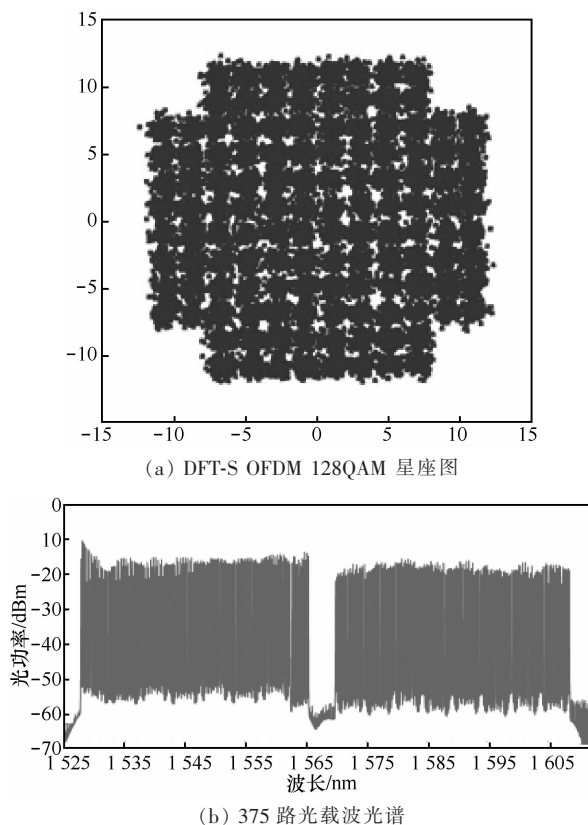


图 3 128QAM 星座图及关键点的光谱

其整形后的 375 个子载波经过 DFT-S 128QAM OFDM 信号调制后的光谱如图 4 所示。

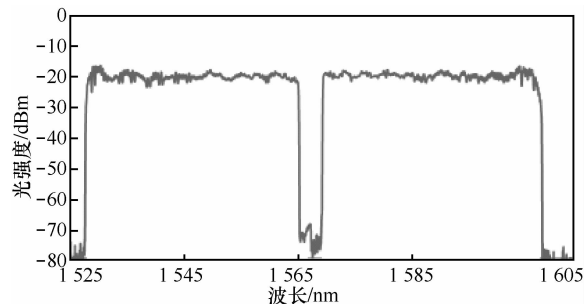


图 4 加载 DFT-S 128QAM OFDM 调制信号后的光谱

经过 80 km 传输后,系统接收端的光谱和各子信道的原始误码率情况如图 5 所示。结果显示,每个子信道的原始误码率均低于 0.02,低于第三代 FEC 纠错编码解码门

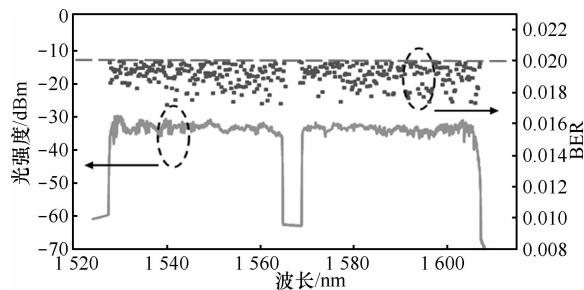


图5 100 Tbit/s 信号经过 80 km 传输后光谱及各子信道传输误码情况

限,经过纠错解码后即可无误码接收。

5 结束语

本文对目前国内外单模单纤超大容量光传输系统实验进行了比较分析,全面介绍了面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术,比较了近年来国内外在超大容量单模光纤传输领域的一些实验进展;重点阐述了 100 Tbit/s 容量单模光纤传输系统的技术特点和技术路线,并详细介绍了武汉邮电科学研究院实现的 100.2 Tbit/s 双偏振 DFT-S 128QAM OFDM 信号 80 km 标准单模光纤光传输系统实验的系统方案与实验结果。100 Tbit/s 级单模单纤光传输实验代表了光纤传输领域的世界最高水平,也是未来商用光纤传输系统发展的必然趋势,围绕其实现的关键技术如多载波光产生技术、新型调制及复用技术、非线性损伤的算法补偿、新型光纤链路研究以及光纤通信波段的扩展等,还面临诸多挑战,因此面向单纤 100 Tbit/s 容量的光传输技术将是未来业界的持续研究热点。

参考文献

- 1 Winzer P J. Modulation and multiplexing in optical communication systems. IEEE LEOS Newsletter, 2009, 23 (1): 4~10
- 2 Huang M F, Qian D Y, Ip E. 50.53-Gbit/s PDM-1024QAM-OFDM transmission using pilot-based phase noise mitigation. Proceedings of Opto Electronics and Communications Conference (OECC), Torino, Italy, 2011: 752~753
- 3 Raybon G. 8×320-Gbit/s transmission over 5 600 km using all-ETDM 80-Gbaud polarization multiplexed QPSK transmitter and coherent receiver. Proceedings of OFC/NFOEC 2012, Los Angeles, USA, 2012
- 4 Zhou X. 64-Tbit/s (640×107-Gbit/s) PDM-36QAM transmission over 320 km using both pre- and post-transmission digital equalization. Proceedings of Optical Fiber Communication, Collocated National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, USA, 2010

- 5 Sano A, Masuda H, Kobayashi T, *et al.* 69.1-Tbit/s (432×171-Gbit/s) C- and extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection. Proceedings of OFC/NFOEC2010, Anaheim, California, CA, USA, 2010
- 6 Qian D. High capacity/spectral efficiency 101.7-Tbit/s WDM transmission using PDM-128QAM-OFDM over 165-km SSMF within C- and L-bands. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10):1540~1548
- 7 Sano A, Kobayashi T, Yamanaka S, *et al.* 102.3-Tbit/s (224×548-Gbit/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone. Proceedings of OFC/NFOEC2012, Los Angeles, CA, USA, 2012
- 8 Okamoto S, Toyoda K, Omiya T, *et al.* 512 QAM (54 Gbit/s) coherent optical transmission over 150 km with an optical bandwidth of 4.1 GHz. Proceedings of EOEC 2010, Torino, Italy, 2010
- 9 贺志学, 罗鸣, 李超等. 30.7 Tbit/s 相干光 PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF 传输. 光通信研究, 2012(6):1~3
He Z X, Luo M, Li C, *et al.* 30.7 Tbit/s coherent light PDM 16QAM OFDM 80 km SSMF transmissions. Study on Optical Communications, 2012(6):1~3
- 10 Yang Q, Xiao X, Li C, *et al.* 168×103 Gbit/s 25-GHz-spaced C-band transmission over 2 240 km SSMF with improved nonlinearity using DFT-S OFDM-8PSK modulation. Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou, China, 2012: 7~10
- 11 Li C, Luo M, Xiao X, *et al.* 63-Tbit/s (368×183.3-Gbit/s) C- and L-band all-Raman transmission over 160-km SSMF using OFDM-16QAM modulation. Chinese Optics Letters, 2013, 12(4)
- 12 Luo M, Li C, Yang Q, *et al.* 100.3-Tbit/s(375×267.27-Gbit/s) C- and L-band transmission over 80-km SSMF using DFT-S OFDM 128-QAM. Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference 2014 (ACP'2014), Shanghai, China, 2014:11~14
- 13 杨奇, 张晓吟. 基于 OFDM 调制和 Nyquist 滤波的超宽通道大容量光传输. 光通信研究, 2012(6):6~9
Yang Q, Zhang X Y. Ultra-wideband high-capacity optical transmission based on OFDM modulation and Nyquist filtering. Study on Optical Communications, 2012(6):6~9
- 14 Nazarathy M, Weidenfeld R, Noe R, *et al.* Recent advances in coherent optical OFDM high-speed transmission. Proceedings of IEEE IPGC 2008, Singapore, 2008
- 15 Yang Q, He Z, Yang Z, *et al.* Coherent optical DFT-spread OFDM transmission using orthogonal band multiplexing. Opt Express, 2012, 20(3):2379~2385
- 16 Li C, Yang Q, Jiang T, *et al.* Investigation of coherent optical multiband DFT-S OFDM in long haul transmission. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(19):1704~1707

[作者简介]



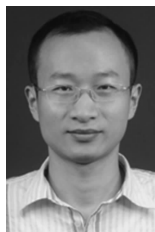
罗鸣,男,武汉邮电科学研究院工程师,主要研究方向为光纤通信技术、相干光 OFDM 关键技术等。



贺志学,男,武汉邮电科学研究院工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室光系统研究室副主任,主要研究方向为高速长距离光传输技术等。



胡荣,男,博士,武汉邮电科学研究院高级工程师,主要研究方向为光纤通信技术、相干光 OFDM 关键技术、光接入网等。



刘武,男,博士,武汉邮电科学研究院高级工程师,主要研究方向为光纤通信技术、相干光 OFDM 关键技术、先进调制格式算法等。



杨奇,男,博士,武汉邮电科学研究院高级工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室副主任,国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目子课题负责人,主要研究方向为高速光通信技术、相干光 OFDM 系统等。



余少华,男,武汉邮电科学研究院总工程师、教授级高级工程师、博士生导师,光纤通信技术和网络国家重点实验室主任,国家重点基础研究发展计划(“973”计划)首席科学家,国家高技术研究发展计划(“863”计划)网络与通信主题专家,中国通信学会会士,中国通信学会光通信委员会主任,主要研究方向为通信网络和光纤通信技术。