

28.09 Tbit/s 12000 km 超高容量距离积单模光纤传输系统

蒋林^{1,4}, 易安林¹, 何星辰¹, 蒲正宇¹, 于佑任¹, 潘炜¹, 罗杰², 熊良明², 付成鹏³, 胡强高³, 闫连山^{1,4*}

¹西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756;

²长飞光纤光缆股份有限公司光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

³武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205;

⁴鹏城实验室, 广东 深圳 518000

摘要 近年来网络数据流量呈现爆发式增长, 光纤通信系统作为全球宽带网络的基础, 已承载着 90% 以上的数据流量, 并继续朝着多维、超大容量、超长距离等方向发展。搭建了一套模拟跨洋传输的超高容量距离积单模光纤传输系统实验平台。在发射端, 根据传输信道光信噪比, 采用不同信息熵产生不同传输速率的偏振复用概率整形 16 阶正交幅度调制光信号。光纤传输链路是由国产超低损大有效面积光纤与国产超宽带低噪声 C 波段掺铒光纤放大器组成。整个系统基于 129 个波长信道 (波长范围为 1529.8~1568.2 nm) 进行了传输验证, 得到的传输容量为 28.09 Tbit/s, 传输距离为 12000 km, 总容量距离积达到 337 Pbit·s⁻¹·km。

关键词 光通信; 高速光纤通信; 跨洋传输系统; 波分复用; 偏振复用; 概率整形调制格式

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1706003

28.09 Tbit/s 12000 km Ultra-High Capacity-Distance Product Single-Mode Optical Fiber Transmission System

Jiang Lin^{1,4}, Yi Anlin¹, He Xingchen¹, Pu Zhengyu¹, Yu Youren¹, Pan Wei¹, Luo Jie², Xiong Liangming², Fu Chengpeng³, Hu Qianggao³, Yan Lianshan^{1,4*}

¹Center for Information Photonics & Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

²State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China;

³Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, Hubei, China;

⁴Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract The network data traffic has exhibited an explosive growth trend in the last few years. As the foundation of the global broadband network, optical fiber communication systems have carried more than 90% of the data traffic and developed towards multi-dimension, ultra-large capacity, and ultra-long distance. In this paper, we build an ultra-high capacity-distance product single-mode fiber transmission experimental system to simulate transoceanic transmission. In the transmitter, according to the optical signal-to-noise-ratio of the transmission link, different information entropies are used to generate polarization multiplexing probability shaping 16-order quadrature amplitude modulation signals with different transmission rates. The fiber transmission link is composed of the ultra-low loss large-effective-area fiber and the ultra-wideband low-noise C-band erbium-doped optical fiber amplifier. The experimental system uses 129 wavelength channels (the wavelength range is 1529.8 nm to 1568.2 nm) and realizes the transmission capacity of 28.09 Tbit/s and the transmission distance of 12000 km. Therefore, a capacity-distance product of 337 Pbit·s⁻¹·km is achieved.

Key words optical communications; high speed optical fiber communication; transoceanic transmission system; wavelength division multiplexing; polarization multiplexing; probability shaping modulation format

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-07-20; 录用日期: 2022-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803500)、国家自然科学基金(62005228)、鹏城实验室重大攻关项目

通信作者: *lsyan@home.swjtu.edu.cn

1 引言

近年来,随着人工智能、互联网+、大数据、云计算、第五代移动通信(5G)等多种信息技术的不断涌现,网络数据流量呈现爆发式增长。据思科全新的可视化网络指数(VNI)预测,2022年全球IP流量预计将从2017年的每月122 EB增长到每月396 EB,近5年IP流量约以26%的复合年增长率增长。然而,近10年光纤通信系统的传输容量的年增速已经从20世纪的78%降至现在的20%,远落后于数据流量的年增速需求^[1-2]。此外,光纤传输容量不能无限制地提升,其受限于香农极限定理、光纤非线性 and 光纤可用带宽资源等因素,未来可能会出现信息传输容量危机,因此光纤通信急需突破性的理论和颠覆性的技术,来推动光纤通信系统朝着超大容量和超长距离方向发展。光纤

通信系统传输容量 C 可根据香农定理^[3-5]进行定义:

$$C = 2MB \log_2(1 + R), \quad (1)$$

式中: M 为波长、模式、纤芯等总的并行信道数; B 为系统带宽; R 为传输系统的品质因数,与信号调制方式和放大等因素相关。目前,研究人员主要通过偏振、波长、空间、时间、先进调制等5种物理维度来实现传输容量的提升。单模光纤传输系统可通过提升信号速率(调制阶数、信号带宽等)、拓展新的传输波段来增加并行信道数,从而达到提升传输容量的目的,但面对未来网络流量爆炸式增长趋势仍然有较大压力。因此,科研人员积极探索采用空分复用技术、通过增加纤芯数和模式数来增加光纤通信系统的传输容量。

表1总结了近年来超高容量距离积(超高容量、超长距离)空分复用光纤传输系统的主要实验结果^[6-16],详细分析了光纤类型(纤芯数量、模式数量)、信道数、

表1 超高容量距离积空分复用光纤传输系统的主要实验结果

Table 1 Main experimental results of ultra-high capacity-distance product space division multiplexing optical fiber transmission system

Condition	Year	Fiber type	Wavelength / nm	Type of amplifier	Modulation format	Capacity / (Tbit·s ⁻¹)	Distance / km	Product / (Pbit·s ⁻¹ ·km)	Country	Ref. No.
Ultra-high capacity (>1000 Tbit·s ⁻¹)	2017	32C-MCF	46	C band EDFA	16-QAM (quadrature amplitude modulation)	1001	205.6	205.8	Japan (NTT)	[6]
	2018	19C-6M-FM-MCF	739	C+L band EDFA	16/64-QAM	10160	11.3	114.808	Japan (KDDI)	[7]
	2019	4C-3M-FM-MCF	368	C+L band EDFA	256-QAM	1200	3.37	4.044	Japan (NICT)	[8]
	2020	38C-3M-FM-MCF	368	C+L band EDFA	64/256-QAM	10660	13	138.58	Japan (NICT)	[9]
	2020	38C-3M-FM-MCF	368	C+L band EDFA	4/16/64-QAM	6200	65	403	Japan (NICT)	[10]
Ultra-long distance (>3000 km)	2016	12C-WC-MCF	90	C band EDFA	8D-APSK	105.1	14350	1508.2	USA (TE)	[11]
	2016	12C-WC-MCF	270	C+L band EDFA	16-APSK	520	8830	4591.6	USA (TE)	[12]
	2019	12C-WC-MCF	152	C band EDFA	8D-QPSK (quadrature phase shift keying)	130.8	12700	1661.16	USA (TE)	[13]
	2021	4C-CC-MCF	552	C+L+S band E/TDFA+ Raman	16QAM	319	3001	957.319	Japan (NICT)	[14]
	2021	4C-CC-MCF	152	C band EDFA	QPSK	50.47	9150	461.8	Japan (KDDI)	[15]
2022	4C-CC-MCF	552	C+L+S band E/TDFA+ Raman	QPSK	184.8	8027	1483.389	Japan (NICT)	[16]	

调制格式、光放大类型、传输容量、传输距离等参数。日本 KDDI 电信公司与日本国家信息与通信研究院的科研人员分别采用 19 芯 6 模多芯少模光纤 (19C-6M-FM-MCF)^[7] 与 38 芯 3 模多芯少模光纤 (38C-3M-FM-MCF)^[9] 实现了单根光纤大于 10 Pbit/s 的通信传输容量, 并且单信道传输速率接近 100 Tbit/s。美国 TE SubCom 公司采用 12 芯弱耦合多芯光纤 (12C-WC-MCF) 与单模掺铒光纤放大器 (EDFA), 实现迄今为止传输距离最长 (传输距离达到 14350 km) 的空分复用光纤传输系统^[11]。尽管空分复用技术展现了较大潜力, 但目前多模多芯光纤的制造成本较高, 尚未大面积铺设, 此外多芯少模光放大器以及其他相关器件尚未有很好的解决方案, 以至于空分复用光纤传输系统距离商用还有很长一段距离, 跨洋传输在未来相当长的一段时间内仍然将以单模光纤为主。

表 2 总结了近年来超高容量距离积单模光纤传输系统的主要实验结果^[17-24], 分别从波长信道数、光放大

器波段与类型、先进调制格式、传输容量、传输距离和容量距离积等方面对超高容量距离积单模光纤传输系统进行详细分析。2018 年, 美国 TE SubCom 公司研究人员结合 150 μm^2 大有效面积光纤与 C+L 波段 EDFA 放大器, 实现单根单模光纤最高容量距离积纪录, 即 881 Pbit·s⁻¹·km (传输容量为 51.5 Tbit/s、传输距离为 17017 km)^[19]。2021 年, 中国信息通信科技集团有限公司联合国内多家单位实现了 16 Tbit/s (80×200 Gbit/s) 10000 km 标准单模光纤传输实验^[21], 总容量距离积达到 160 Pbit·s⁻¹·km。2022 年, 西南交通大学团队结合国产超低损大有效面积光纤以及超宽带低噪声 EDFA, 实现传输容量为 28.2 Tbit/s、传输距离为 8191 km 的单模光纤传输系统实验, 总容量距离积达到 231 Pbit·s⁻¹·km^[22]。由于受光纤非线性效应、有效传输波段窗口等方面的影响, 单根单模光纤传输容量限制在 100 Tbit/s 左右。近年来, 研究人员通过拓展传输信道到 S 波段^[23-24] 进一步提升系统容量。

表 2 超高容量距离积单模光纤传输系统的主要实验结果

Table 2 Main experimental results of ultra-high capacity-distance product single-mode optical fiber transmission system

Year	Wavelength / nm	Type of amplifier	Modulation format	Capacity / (Tbit·s ⁻¹)	Distance / km	Product / (Pbit·s ⁻¹ ·km)	Country	Ref. No.
2017	332	C+L band EDFA	Opt32QAM	50.962	11185	570	USA (NEC)	[17]
2017	179	C+L band EDFA	PS-64QAM	65	6600	429	France (Bell Lab)	[18]
2018	295	C+L band EDFA	PS-40APSK	51.5	17107	881	USA (TE)	[19]
2020	306	C+L band Raman/EDFA	GS-64QAM	74.38	6300	468.6	UK (UCL)	[20]
2021	80	C band Raman	16QAM	16	10000	160	China (CICT)	[21]
2022	129	C band EDFA	PS-16QAM	28.2	8191	231	China (SWJTU)	[22]
2022	552	C+L+S band E/TDFA/Raman	QPSK	43.5	10072	438.132	Japan (NICT)	[23]
2022	129	C band EDFA	PS-16QAM	28.09	12000	337	China (SWJTU)	This work

本文主要聚焦超高容量距离积单模光纤传输系统, 通过采用不同熵的概率整形 16QAM 调制格式信号, 结合国产超低损大有效面积光纤 (损耗为 0.155 dB/km, 有效面积为 150 μm^2) 与国产超宽带低噪声 C 波段 EDFA 放大器 (1527.2~1568.4 nm, 增益带宽约为 41 nm, 噪声指数 ≤ 5 dB), 实现传输容量为 28.09 Tbit/s (129 个波分复用传输信道)、传输距离为 12000 km 的单模光纤传输, 总容量距离积提升至 337 Pbit·s⁻¹·km。

2 实验系统

本文搭建了一套模拟跨洋传输的超高容量距离积

单模光纤传输系统实验平台, 具体实验框图如图 1 所示。在发射端, 测试信道采用线宽小于 10 kHz 的可调谐激光器作为光源 (Keysight, 81608A)。将两路伪随机比特序列 PRBS_a、PRBS_b 和幅度概率 P_A 输入到恒定成分分布匹配器 (CCDM)^[25] 中, CCDM 将独立伯努利 (1/2) 分布的输入比特转换为 I (同相)、Q (正交) 两路概率整形符号序列, 最终将 I、Q 两路合起来得到概率整形 16QAM (PS-16QAM)。通过一个 IQ 调制器 (EOSPACE, 带宽 > 30 GHz) 将模拟 PS-16QAM 电信号调制在光上, 产生 32 GBaud 不同信息熵 (H 为 2.6、3.0、3.2、3.5) 的 PS-16QAM 光信号, 再经偏振复用 (PDM) 模拟器最终得到 166 Gbit/s、192 Gbit/s、

204.8 Gbit/s、224 Gbit/s PDM-PS-16QAM 光信号。将测试信道与 128 路 C 波段 (C-band) 激光信号 (波长间隔为 37.5 GHz) 经过波分复用器合成, 通过 C 波段 (1527.2 nm 到 1568.4 nm, 增益带宽约为 41 nm) EDFA 进行放大, 并注入到光纤链路中进行传输。光纤链路采用 Loop 环路系统, 环路开关由两个声光调制器 (AOM) 控制, 通过设置 AOM 的通断时间控制波分复用信号在环路中的传输圈数, 实现目标传输距离。由于 AOM 开关以及耦合器存在插入损耗, 因此波分复用信号进入光纤环路后需要通过一个 C 波段 EDFA 进行放大, 并结合衰减器控制光纤环路发射功率。C 波段波分复用信号依次经过 10 段 75 km 超低损耗有效面积单模光纤 (损耗为 0.155 dB/km, 有效

面积为 $150 \mu\text{m}^2$)、C 波段波长选择开关 (WSS) 和环路同步偏振控制器 (LSPC)。其中, 每跨段 75 km 光纤的损耗由对应 C 波段 EDFA 进行补偿。WSS 用于滤除带外放大器自发辐射噪声 (ASE), 并对增益谱进行整形。LSPC 用于模拟实际光纤链路对信号偏振态的扰动。通过设置环路 (转 16 圈) 可实现 12000 km 的光信号传输。在接收端, 通过采用可调谐带通滤波器 (OBPF) 滤出传输 12000 km 的测试信道, 再经 C 波段 EDFA 放大后注入到相干接收机进行光电转换。转换后的电信号经模拟带宽为 33 GHz、采样率为 80 GSa/s 的实时示波器 (Keysight, DSOZ634A) 采样得到数字信号, 通过离线数字信号处理 (DSP) 模块进行损伤均衡与信号解调。

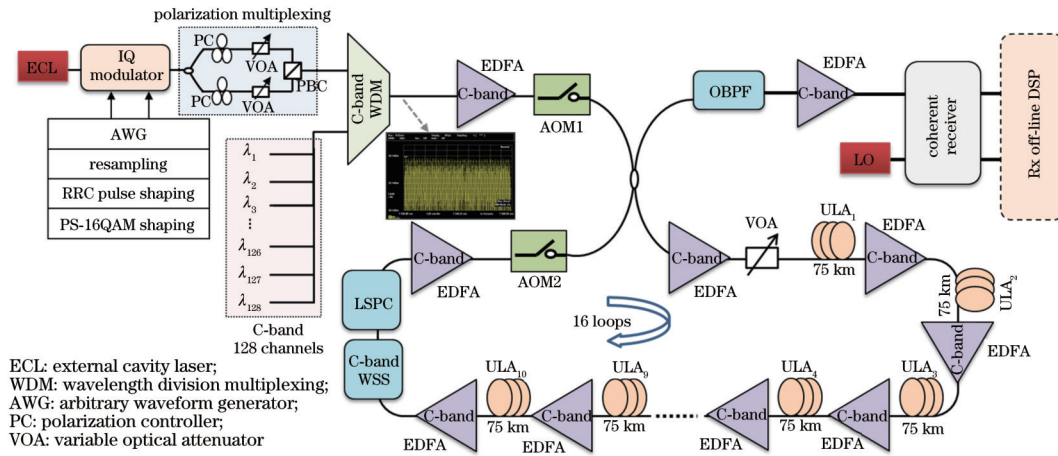


图 1 跨洋光纤传输环路实验系统框图

Fig. 1 Experimental setup of transoceanic optical fiber loop transmission system

3 核心处理算法

测试信号经过超长距离光纤传输后, 将受到光纤链路各种线性 (色散、偏振模色散等) 以及非线性 (自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼效应等) 损伤效应影响, 接收端需要通过数字信号处理算法对链路损伤进行均衡, 实现测试信号解调。图 2 所示为接收端数字信号处理模块, 主要包括重采样与归一化、低通滤波器、色散 (CD) 估计算法、数字后向传输 (DBP) 算法、时钟恢复算法、CMA 均衡算法、MMA 均衡算法、频率偏移恢复算法、BPS 算法、DD-LMS 算法、解码器。

法、频率偏移恢复算法、盲相位搜索 (BPS) 算法、最小均方误差 (DD-LMS) 算法以及信号解调。其中, CMA 算法通常用作时域均衡, 用来补偿传输信号的残余色散以及偏振模色散效应, 对 QPSK 等恒定幅度值的调制格式信号实现很好的偏振解复用。但对于呈现多级幅度值的 m -QAM ($m > 4$) 信号, CMA 算法仅执行初步偏振解复用, 进一步采用 MMA 算法实现最终的偏振解复用操作。图 2 中 E_x 、 E_y 为接收端数字信号。数字信号处理模块中, 大多数算法都是采用通用算法, 这里不再赘述, 下面简要介绍其中两种较为关键的算法。

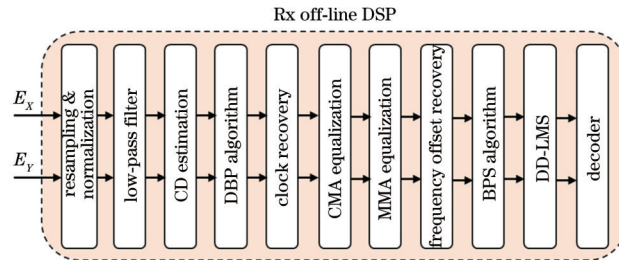


图 2 接收端数字信号处理模块

Fig. 2 Digital signal processing module in receiver

3.1 精准色散估计算法

光纤材料折射率随波长变化, 光信号不同频率成

分传播速度不同, 导致接收端出现相对时延, 进而造成信号脉冲展宽现象, 即色散效应。超高容量距离积单

模光纤传输系统共传输 129 个波长信号,覆盖接近 40 nm 的传输带宽,每个波长信道在光纤链路中所经历的色散都不一样。由于传输系统是由多跨段光纤组成,因此很难精准预知链路色散斜率。为了实现精准的链路色散补偿,本文采用了一种自适应色散估计算法对测试信道进行快速精准的色散监测^[26]。如图 3 所示,该算法由粗色散估计模块 (first-stage) 与精细色散估计模块 (second-stage) 两级组成。首先,接收到的数字信号 $E_m[n]$ 进入第一级粗色散估计模块中,通过功

率信号自相关波形 $P(n)$ 峰值 (V_{peak}) 位置,推算出传输链路累积色散值。该模块估计出来的累积色散值对符号速率比较敏感,在实际应用中误差较大。为了进一步提升累积色散估计精度,以第一级色散估计值 δ_{estc} 为中心,色散监测分辨率 δ_{res} (约 200 ps/nm) 为范围,建立色散区间表 $[\delta_{estc} - \delta_{res}, \delta_{estc} + \delta_{res}]$ 。通过较小色散步长 (约 50 ps/nm) 扫描色散区间,通过监测 Godard's 标准误差 V_{error} 获得精准累积色散估计值。

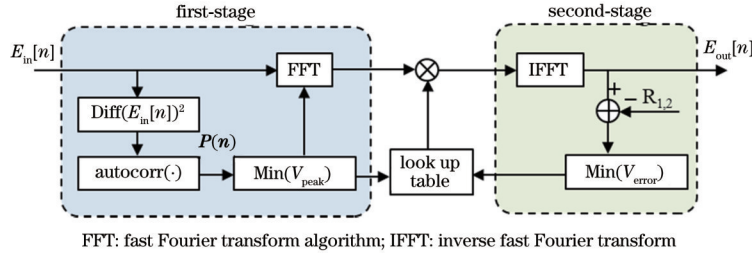


图 3 自适应色散估计算法原理图
Fig. 3 Principle of adaptive dispersion estimation algorithm

3.2 非线性均衡算法

在超高容量距离单模光纤传输系统中,需要使用较高的调制格式阶数以及符号速率,这致使传输信号对光纤非线性效应更加敏感。此外,系统中存在大量的并行波分复用信道 (>100),交叉相位调制效应将会引起信道间严重非线性串扰。光纤非线性效应被认为是高速长距离传输系统的主要障碍,通过光学或者数字信号处理算法对光纤非线性效应进行补偿,将有助于增加系统传输容量与传输距离。本文采用业界公认最有效的非线性补偿 (DBP) 算法^[27-28],该算法主要是通过非线性薛定谔方程模拟反向传输演变,可表示为

$$\frac{\partial E}{\partial z} = (\hat{D}^{-1} + \hat{N}^{-1})E, \quad \hat{D}^{-1} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}, \quad \hat{N}^{-1} = \frac{8i\gamma}{9} |E|^2, \quad (2)$$

式中: E 为接收端信号; \hat{D}^{-1} 和 \hat{N}^{-1} 分别表示线性补偿算子和非线性补偿算子; β_2 是光纤色散参数,可由色散估计模块计算的累积色散推算出来; γ 是非线性因子,

可通过非线性参数估计算法结合链路平均功率获得。由于每一段补偿步长中非线性效应集中在单点补偿,以至于高频强度波动与相位失配效应可能造成非线性效应过补偿。在非线形补偿过程中采用数字低通滤波器限制非线性补偿带宽,提升非线性补偿性能。发射端 32 GBaud PS-16QAM 信号产生采用滚降因子为 0.1、压缩后信号 3 dB 带宽约为 17 GHz 的数字低通滤波器。由对低通滤波 DBP 复杂度的分析^[29]可知,色散补偿操作单比特单次运算所需的实数乘法次数为 $2 + 2\text{lb} n$,非线性补偿操作单比特单次运算所需的实数乘法次数为 $5.5 + \text{lb} n$ 。低通滤波 DBP 复杂度的整体表达式为

$$O = (2 + 2\text{lb} n)k_{CD} + (11/2 + \text{lb} n)k_{NL}, \quad (3)$$

式中: n 为 DBP 算法中采用的数据点个数; k_{CD} 为色散补偿操作次数; k_{NL} 为非线性补偿操作次数。传输系统单跨段长度为 75 km,为保证非线性补偿精度,将 DBP 补偿步长设置为 5 km,因此 k_{CD} 为 4800, k_{NL} 为 2400。图 4 为数字后向传输算法示意图。此外,进一步采用了抽头数为 51、步长因子为 0.001 的 DD-LMS 算法提升线性以及非线性均衡性能。

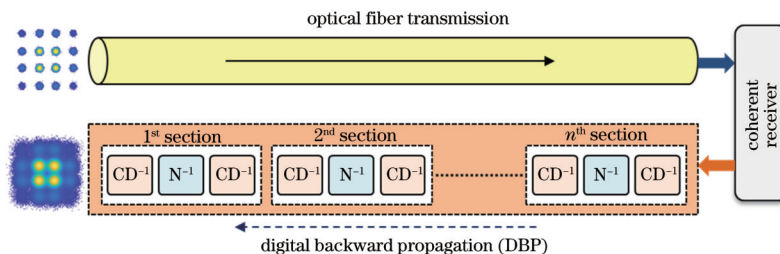


图 4 数字后向传输算法示意图
Fig. 4 Schematic diagram of digital backward transmission algorithm

4 实验结果

图 5(a)为发射端波分复用信号光谱图。C 波段光源(波长范围为 1529.8~1568.2 nm)通过 WSS 进行光谱整形,得到总共 129 路激光信号(预留 1 路测试信道)。通过波分复用器将测试信道与激光信号进行耦合,保证光谱平坦度 ≤ 0.1 dB。为更加清晰地分析传输信道光信噪比,图 5(b)展示了波分复用信号在光纤传输系统实验平台中传输 12000 km (16 圈,

750 km/圈)后的光谱图。在超宽带(C 波段)传输系统中,拉曼散射效应引起短波长功率向长波长转移,此外光纤损耗也与波长相关,造成整体短波长光谱性能变差,进而导致传输性能降低。后续为了进一步缓解拉曼效应引起的功率转移以及波长相关光纤损耗的影响,控制所有超宽带光放大器在倾斜输出光谱条件下,使短波长区输出更高的光功率,优化系统短波长与长波长之间的光信噪比差^[30]。

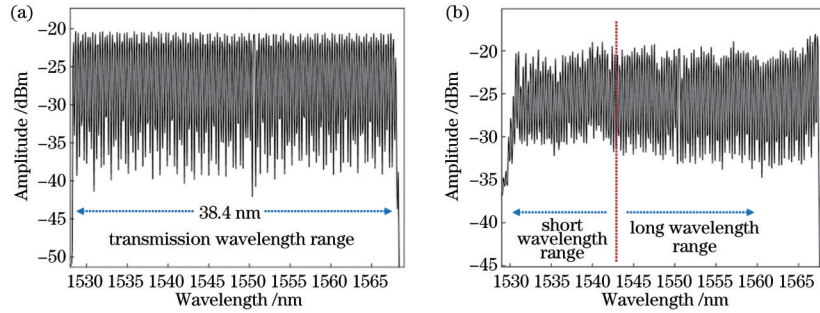


图 5 发射端光谱图和传输 12000 km 的光谱图。(a)发射端光谱图;(b)传输 12000 km 的光谱图

Fig. 5 Optical spectrum at transmitter, and optical spectrum after 12000 km transmission. (a) Optical spectrum at transmitter; (b) optical spectrum after 12000 km transmission

本文所使用的超低损大有效面积单模光纤在 1550 nm 处的色散值为 $21.8 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,由于光纤材料的折射率随波长的变化而变化,以至于不同波长将会呈现出不同色散值。尽管所有信道的光纤传输都为 12000 km,但累积色散变化范围为 246.5~279.8 ns/nm。本文借助前面所介绍的色散估计算法^[15],对每个波长信道的色散进行精准估计并进行补偿。图 6 所示为色散估计算法精准获取的不同波长信道的累积色散值。

此外,高阶调制格式信号所需的平均功率相对于 QPSK 调制格式将变大,对光纤非线性效应更加敏感。概率整形调制格式通过降低具有较大能量的外围星座点概率,提高具有较小能量的内部星座点概率,从而降低高阶调制格式信号的平均能量,有效减小光纤非线性效应的影响。概率整形调制格式可增大星座点之间的欧氏距离,增强信号的抗噪能力。因此,在测试系统中根据传输信道信噪比,选用 32 GBaud 不同信息熵(H 为 2.6、3.0、3.2、3.5)的 PS-16QAM 信号作为传输信号。实验传输系统共使用 129 个波长信道进行 12000 km 传输验证,信道间隔为 0.3 nm(37.5 GHz),波长范围为 1529.8~1568.2 nm。图 7 所示为本实验系统 129 个波长信道的误码测试结果图,从图中可知所有波长信道误码率都低于 25% 前向纠错(FEC)阈值(误码率为 4.2×10^{-2}),计算误码率时所使用的比特数为 800000。具体测试结果如下:1)1541.2~1568.2 nm 波长范围内共 91 个信道,采用信息熵 H 为 3.5 的 224 Gbit/s PDM-PS-16QAM 信号,该波长范围速率总和为 $224 \text{ Gbit/s} \times 91 = 20384 \text{ Gbit/s}$; 2) 1531.0~1540.9 nm 波长范围内共 34 个信道,采用信息熵 H 为 3.2 的 204.8 Gbit/s PDM-PS-16QAM 信号,该波长范围速率总和为 $204.8 \text{ Gbit/s} \times 34 = 6963.2 \text{ Gbit/s}$; 3)1530.1~1530.7 nm 波长范围共 3 个信道,采用信息熵 H 为 3.0 的 192 Gbit/s PDM-PS-16QAM 信号,该波长范围速率总和为 $192 \text{ Gbit/s} \times 3 = 576 \text{ Gbit/s}$; 4)1529.8 nm 波长信道采用 166.4 Gbit/s (信息熵 $H = 2.6$) PDM-PS-16QAM 信号;最终实现单根单模光纤中传输容量为 $20384 \text{ Gbit/s} + 6963.2 \text{ Gbit/s} + 576 \text{ Gbit/s} + 166 \text{ Gbit/s} \approx 28.09 \text{ Tbit/s}$,传输距离为

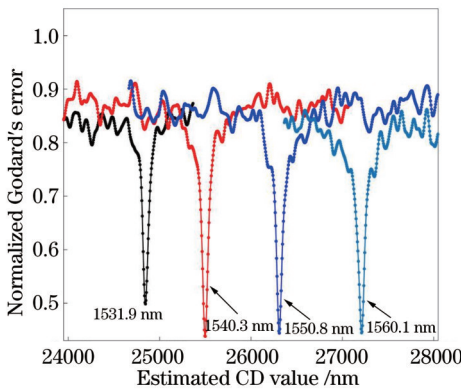


图 6 不同波段信道的色散估计值图

Fig. 6 Estimated chromatic dispersion values with different wavelength channels

高速光纤通信系统具有幅度及相位信息的高阶调制格式,可有效提升系统频谱效率。但随着调制阶数的增加,调制格式星座点之间的欧氏距离变得更小,以至于信号抗干扰能力更差,进而严重影响系统传输性

12000 km, 总容量距离积达到 $337 \text{ Pbit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}$ 。从测试结果来看, 短波长信道的传输速率相对于长波长信道呈现一定程度的下降, 这主要是由于短波长信道受到严重拉曼效应的影响, 信号光功率向长波长转移, 致

使短波长信道光信噪比降低。此外, EDFA 在短波长信道范围的噪声系数更大, 并且具有更大的光纤损耗, 造成短波长区间整体传输性能降低。

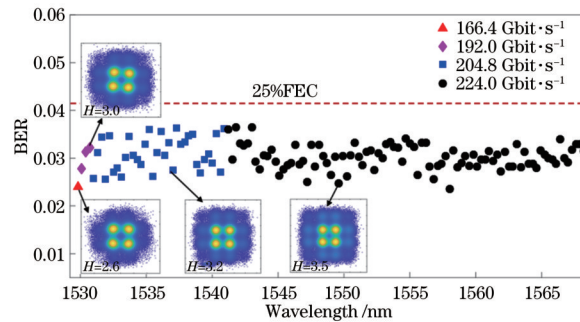


图7 所有传输信道 12000 km 单模光纤传输后的误码率 (BER) 结果

Fig. 7 BER results for all channels after 12000 km single-mode fiber transmission

5 结 论

本文首先回顾了近年来国际上超高容量距离积单模以及空分复用光纤传输系统的主要研究进展, 随后详细介绍了基于国产化链路的 C 波段超高容量距离积单模光纤传输实验。通过采用概率整形调制格式和各种 DSP 算法, 结合国产化 EDFA 和超低损大有效面积单模光纤构成的传输链路, 系统容量距离积达到 $337 \text{ Pbit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}$ 。后续通过将传输信道进一步拓展至 S+C+L 波段, 有望使传输容量突破 100 Tbit/s , 达到国际先进水平。要实现 S+C+L 波段超大容量传输, 需要在收发器件、链路优化、信号产生、损伤均衡等多个方面开展研究。在收发器件方面, 研制支持 S、C、L 波段的小线宽高输出功率光源、高性能 IQ 调制器、相干接收机; 在链路优化方面, 可以通过优化制造工艺来进一步降低光纤损耗, 通过降低放大器噪声指数和优化增益平坦度提升超波段 EDFA 综合性能; 在多维信号产生与解调方面, 可以考虑基于概率整形与几何整形的联合整形, 产生与传输信道优化匹配的多维调制信号; 在信号损伤补偿方面, 结合神经网络等人工智能算法进一步提升均衡效率与性能。

参 考 文 献

- [1] 余少华, 何炜. 光纤通信技术发展综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1361-1376.
Yu S H, He W. Latest survey on optical fiber communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(9): 1361-1376.
- [2] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [3] Yan L S, Liu X, Shieh W. Toward the Shannon limit of spectral efficiency[J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(2): 325-330.
- [4] Sorokina M A, Turitsyn S K. Regeneration limit of classical Shannon capacity[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3861.
- [5] Tamura Y, Hayashi T, Nakanishi T, et al. Low-loss uncoupled two-core fiber for power efficient practical submarine transmission[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, March 3-7, 2019, San Diego, California. New York: IEEE Press, 2019.
- [6] Kobayashi T, Nakamura M, Hamaoka F, et al. 1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band dense SDM transmission over 205.6-km of single-mode heterogeneous multi-core fiber using 96-gBaud PDM-16QAM channels[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. New York: IEEE Press, 2017.
- [7] Soma D, Wakayama Y, Beppu S, et al. 10.16-peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C+L band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(6): 1362-1368.
- [8] Luís R S, Rademacher G, Puttnam B J, et al. 1.2 Pb/s throughput transmission using a $160 \mu\text{m}$ cladding, 4-core, 3-mode fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(8): 1798-1804.
- [9] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, et al. 10.66 peta-bit/s transmission over a 38-core-three-mode fiber[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [10] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, et al. Multi-span transmission over 65 km 38-core 3-mode fiber[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC), December 6-10, 2020, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2020.
- [11] Turukhin A, Sinkin O V, Batshon H G, et al. 105.1 Tb/s power-efficient transmission over 14, 350 km using a 12-core fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-24, 2016, Anaheim, California. New York: IEEE Press, 2016.
- [12] Turukhin A, Batshon H G, Mazurczyk M, et al.

- Demonstration of 0.52 Pb/s potential transmission capacity over 8, 830 km using multicore fiber[C]//ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. Offenbach: VDE, 2016.
- [13] Turukhin A, Paskov M, Mazurczyk M V, et al. Demonstration of potential 130.8 Tb/s capacity in power-efficient SDM transmission over 12, 700 km using hybrid micro-assembly based amplifier platform[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, March 3-7, 2019, San Diego, California. New York: IEEE Press, 2019.
- [14] Puttnam B J, Luís R S, Rademacher G, et al. 319 Tb/s transmission over 3001 km with S, C and L band signals over >120 nm bandwidth in 125 μm wide 4-core fiber [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [15] Soma D, Beppu S, Wakayama Y, et al. 50.47-tbit/s standard cladding coupled 4-core fiber transmission over 9, 150 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(22): 7099-7105.
- [16] Puttnam B J, Luís R S, Rademacher G, et al. High-throughput and long-distance transmission with >120 nm S-, C- and L-band signal in a 125 μm 4-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(6): 1633-1639.
- [17] Zhang S L, Yaman F, Huang Y K, et al. 50.962 Tb/s over 11185 km Bi-directional C+L transmission using optimized 32QAM[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2017: JTh5A.9.
- [18] Ghazisaeidi A, de Jauregui Ruiz I F, Rios-Müller R, et al. Advanced C L-band transoceanic transmission systems based on probabilistically shaped PDM-64QAM [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(7): 1291-1299.
- [19] Cai J X, Batshon H G, Mazurczyk M V, et al. 51.5 Tb/s capacity over 17, 107 km in C L bandwidth using single-mode fibers and nonlinearity compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2135-2141.
- [20] Ionescu M, Lavery D, Edwards A, et al. 74.38 Tb/s transmission over 6300 km single mode fibre enabled by C L amplification and geometrically shaped PDM-64QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 531-537.
- [21] Luo M, Yang C, Zhang H G, et al. Experimental demonstration of long-haul transmission using silicon-based IC-TROSA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(16): 862-865.
- [22] Jiang L, Yi A, Yan L S, et al. 28.224-Tbit/s capacity over 8191.898-km in full C-band using single-mode fibers with adaptive chromatic dispersion and nonlinearity compensation[C]//Proceeding of 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2022), May 15-20, 2022, San Jose, California, United States. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: SM2J.7.
- [23] Puttnam B J, Luís R S, Rademacher G, et al. Investigation of long-haul S-, C- + L-band transmission [C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 6-10, 2022, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [24] Puttnam B J, Luís R S, Rademacher G, et al. S, C and extended L-band transmission with doped fiber and distributed Raman amplification[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [25] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(1): 430-434.
- [26] Jiang L, Yan L S, Yi A L, et al. Fast and adaptive chromatic dispersion compensation scheme for digital coherent systems utilizing two-stage estimation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16177-16183.
- [27] Jiang L, Yan L S, Yi A L, et al. Chromatic dispersion, nonlinear parameter, and modulation format monitoring based on Godard's error for coherent optical transmission systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 7900512.
- [28] Cartledge J C, Guiomar F P, Kschischang F R, et al. Digital signal processing for fiber nonlinearities[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1916-1936.
- [29] Gao Y, Ke J H, Zhong K P, et al. Assessment of intrachannel nonlinear compensation for 112 Gb/s dual-polarization 16QAM systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3902-3910.
- [30] Cai J X. 100G transmission over transoceanic distance with high spectral efficiency and large capacity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3845-3856.

约稿专家介绍:



闫连山(1971—),西南交通大学信息科学与技术学院院长,美国光学学会会士,国家重点研发计划项目负责人。曾获国家杰出青年科学基金资助,入选教育部长江学者特聘教授。1990—1994年在浙江大学光电与科学仪器工程学系学习并获学士学位。担任 *Light: Advanced Manufacturing* 期刊共同主编,国家“十三五”期间“光电子与微电子器件及集成”和“十四五”期间“信息光子技术”重点专项专家组成员。曾获得教育部技术发明一等奖和自然科学二等奖,以及 IEEE 光子学会 Distinguished Lecturer Award 等奖项。E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn。