

## 概率整形双子载波复用跨洋光纤传输系统

熊凌敏, 闫连山\*, 蒋林, 易安林, 潘炜, 罗斌

西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

**摘要** 针对跨洋光纤通信系统中存在严重的噪声累积和非线性效应等问题, 将概率整形(PS)技术与子载波复用(SCM)技术相结合以缓解跨洋传输链路损伤, 进而实现系统传输性能的提升。通过在商用 VPI 软件中搭建跨洋光纤传输仿真链路, 对单载波和双子载波复用系统进行仿真研究。仿真结果表明, 在 20% 的 FEC 阈值条件下, 均匀( $H=4$ )双子载波和 PS( $H=3.6, H=3.7, H=3.8$ )双子载波 PDM-16QAM 系统的传输距离相比均匀( $H=4$ )单载波 PDM-16QAM 系统分别提升了 2.3% (405 km)、21% (3698 km)、19.7% (3468 km) 和 14.5% (2549 km)。随后, 搭建光纤环路传输实验平台, 进一步验证所提方案的可行性。实验结果表明, 在 20% 的 FEC 阈值条件下, 均匀双子载波和 PS( $H=3.8$ )双子载波 PDM-16QAM 系统的传输距离相比均匀单载波 PDM-16QAM 系统分别提升了 5.6% (282 km) 和 46.2% (2323 km)。仿真与实验结果表明, 在跨洋光纤通信系统中引入 PS 与 SCM 可有效提升系统的传输性能。

**关键词** 光通信; 概率整形; 子载波复用; 非线性效应; 跨洋光纤通信

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2006001

## Transoceanic Fiber Transmission System Based on Probabilistic Shaping and Dual-Subcarrier Multiplexing

Xiong Lingmin, Yan Lianshan\*, Jiang Lin, Yi Anlin, Pan Wei, Luo Bin

Center for Information Science and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China

**Abstract** Given the serious noise accumulation and the nonlinearity effect in transoceanic fiber communication systems, probabilistic shaping (PS) and subcarrier multiplexing (SCM) are combined to alleviate transoceanic transmission link impairments, so as to improve the transmission performance of these systems. The single-carrier and dual-subcarrier multiplexing systems are simulated by developing a simulation link of transoceanic fiber transmission with the commercial software VPI. The simulation results show that the transmission distances of the uniform ( $H=4$ ) and PS ( $H=3.6, H=3.7, H=3.8$ ) dual-subcarrier PDM-16QAM systems are respectively 2.3% (405 km), 21% (3698 km), 19.7% (3468 km), and 14.5% (2549 km) longer than that of the uniform ( $H=4$ ) single-carrier PDM-16QAM system under the 20% forward error correction (FEC) threshold. Then, an experimental fiber loop transmission platform is built to verify the feasibility of the proposed scheme. According to the experimental results, the transmission distances of the uniform and PS ( $H=3.8$ ) dual-subcarrier PDM-16QAM systems are respectively 5.6% (282 km) and 46.2% (2323 km) longer than that of the uniform single-carrier PDM-16QAM system under the 20% FEC threshold. In summary, both simulation and experimental results demonstrate that applying PS and SCM to transoceanic fiber communication systems can effectively enhance these systems' transmission performance.

**Key words** optical communications; probabilistic shaping; subcarrier multiplexing; nonlinear effect; transoceanic fiber communications

## 1 引言

跨洋光纤传输系统是全球宽带网络的基础和连接

世界各国的重要通信方式, 95% 以上的国际数据通信都是由跨洋光纤传输实现的。1988 年, 连接美国与英国和法国之间的第一条海底光缆铺设成功, 全长

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-04-06; 录用日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1803500)、国家自然科学基金(62005228)、中央高校基本科研业务费专项(2682021CX050)

通信作者: \*lsyan@home.swjtu.edu.cn

6700 km, 传输速率高达 280 Mb/s, 标志着海底光缆时代的正式到来。1993 年, 我国成功建设了首条国际(中日之间)海底光缆。随后, 我国参与建设的全球海底光缆系统建设成功并被投入运营, 这也是第一条在我国登陆的洲际海底光缆。2020 年, Google、Facebook、中国太平洋光缆数据通信公司和美国海底通信技术公司联合发布将进行横跨太平洋的海底光缆铺设, 建成后传输速率将高达 120 Tb/s, 全长 12800 km, 有利于加强太平洋地区与北美地区的网络互联。

跨洋传输系统是由多个跨段光纤与光放大器级联而成的, 严重的放大器自发辐射(ASE)噪声和光纤非线性相位噪声的累积极大地影响了系统的传输性能<sup>[1-6]</sup>。如何进一步缓解链路损伤效应以提升跨洋传输系统容量和传输距离, 已经成为科研人员重点关注的研究方向。在光纤非线性效应补偿方面, 近年来科研人员提出了多种有效的解决方案, 包括数字后向传播算法(DBP)、脉冲整形技术和子载波复用(SCM)技术等<sup>[7-9]</sup>。数字后向传播算法是目前公认的非线性均衡效果最好的非线性补偿算法, 但由于算法复杂度较高, 故在实际系统中应用受限。脉冲整形技术可以有效减小非线性损伤的影响<sup>[10-11]</sup>, 但牺牲了频谱效率。子载波复用技术是将大带宽的单载波(SC)信号分割成多个低波特率的子载波信号, 在紧密信道间隔下对子载波信号进行调制和多路复用, 随后将子载波信号调制到光载波上进行传输。该技术利用在电域复用的方式大大降低了系统成本, 且信道之间相互独立, 便于更加灵活地处理各通道信号。研究表明, 子载波复用技术对无色散管理的相干光通信传输系统的非线性损伤效应具有显著改善<sup>[12-14]</sup>。在减小 ASE 等噪声影响方面, 概率整形<sup>[15-19]</sup>技术可根据不同能量级星座点在光纤中受到的噪声干扰的不同, 对星座点重新分配概率,

有效地缓解了 ASE 等噪声对传输性能的影响。

本文将概率整形(PS)技术与子载波复用技术相结合以缓解链路损伤效应, 从而提升跨洋传输系统性能。仿真对比了双子载波复用(2SCM)系统与单载波系统的传输性能, 并分析了非线性串扰损伤<sup>[20]</sup>和带宽限制效应的影响。同时, 对所提方案进行了实验验证与分析。研究结果表明, 概率整形技术和子载波复用技术相结合有望进一步提升跨洋传输系统的性能。

## 2 基本原理

### 2.1 子载波复用及解复用技术

传输系统发射端子载波复用流程如图 1(a)所示。将  $N$  组随机比特序列分别进行正交幅度调制(QAM), 得到  $N$  组正交幅度调制信号  $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。调制后的信号经过上采样与成型滤波器  $H(f)$  操作, 实现  $K$  倍上采样和脉冲成型。然后, 将  $N$  组成型滤波信号在频域中平移到不同的中心频率  $(f_1, f_2, \dots, f_N)$  处, 使  $N$  组信号在频域中不发生重叠。接着, 将频率不重叠的  $N$  组时域信号叠加起来, 得到子载波复用信号, 子载波复用信号经过重采样操作后进入到数模转换器(DAC)中。子载波复用信号经过数模转换后可得到模拟射频信号, 利用光调制器将射频信号调制到光域上, 在光纤中进行传输。在接收端, 通过相干检测将光信号转换为模拟电信号, 再通过模数转换器(ADC)将其转化为数字信号并进行重采样操作。重采样后的数字信号在频域中分别平移  $-f_1, -f_2, \dots, -f_N$  回到基带, 再通过匹配滤波器  $G(f)$  与下采样操作对每个子载波信号进行匹配滤波和  $K$  倍下采样操作。最后, 每个子载波信号可分别通过数字信号处理(DSP)来补偿链路损伤效应, 并进行信号解调。子载波解复用流程如图 1(b)所示。图 2 为单载波与双子载波信号功率谱。

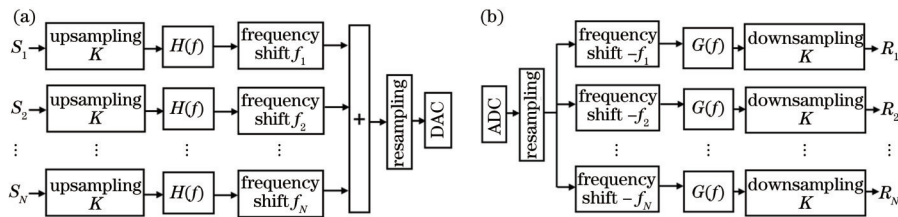


图 1 发送端子载波电域复用流程图和接收端子载波电域解复用流程图。(a)发送端子载波电域复用流程图;(b)接收端子载波电域解复用流程图

Fig. 1 Block diagrams of transmitter-side subcarrier multiplexing and receiver-side subcarrier de-multiplexing in electrical domain. (a) Block diagram of transmitter-side subcarrier multiplexing in electrical domain; (b) block diagram of receiver-side subcarrier de-multiplexing in electrical domain

### 2.2 概率整形技术

概率整形是先对输入比特序列在给定概率条件下进行编码, 再将其映射到二维星座点上的过程。概率整形星座点的分布常采用麦克斯韦-玻尔兹曼(MB)分布, 这是最适合于光纤高斯信道的分布, 具体公式为

$$P_X(x_i) = \frac{\exp(-\lambda |x_i|^2)}{\sum_{i=1}^M \exp(-\lambda |x_i|^2)}, \quad (1)$$

式中:  $X$  为星座点的集合;  $x_i$  为第  $i$  个星座点的复坐标;  $\lambda \geq 0$  为自由参数;  $M$  为星座点数, 16QAM 中  $M$  为 16。当  $\lambda = 0$  时, 该分布为均匀分布。  $\lambda$  越大, 不同能量级

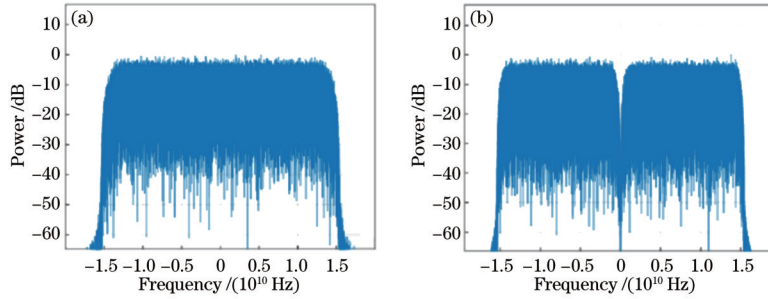


图 2 单载波与双子载波信号功率谱。(a)单载波信号功率谱;(b)双子载波信号功率谱

Fig. 2 Signal power spectra of single carrier and dual-subcarrier. (a) Signal power spectrum of single carrier; (b) signal power spectrum of dual-subcarrier

之间的概率相差越大,即能量越小的星座点被分配到的概率越大。给定 $\lambda$ ,可根据式(1)得到相应的 $P_X(x_i)$ ,进而计算出信息熵 $H$ ,具体公式为

$$H = - \sum_{i=1}^M P_X(x_i) \text{lb} P_X(x_i) \quad (2)$$

根据得到的目标分布对伪随机比特序列进行恒参分布匹配(CCDM)。CCDM将独立的伯努利(1/2)分布的输入比特转换为具有期望分布的比特序列,并且通过等组分和算术编码的方法实现可逆和低复杂度的

编码器和解码器。概率整形信号产生原理如图3所示。首先,将随机比特序列 $B$ 分为I、Q两路随机比特序列 $B_1$ 、 $B_2$ ,由输入的16QAM MB分布概率 $P = p_1 p_2 \cdots p_{16}$ 得到I、Q两路MB分布概率 $P_{\text{PAM4}}$ (PAM4为四电平脉冲幅度调制),其中 $p_1 \sim p_{16}$ 为16QAM中每个星座点的概率。将I路随机比特序列 $B_1$ 与MB概率分布 $P_{\text{PAM4}}$ 输入到CCDM中获得非均匀分布比特流序列 $I_{\text{bit}}$ 。同理,得到Q路非均匀分布比特流序列 $Q_{\text{bit}}$ 。最终,将I、Q两路合起来得到概率整形的16QAM非均匀分布比特流序列 $A$ 。

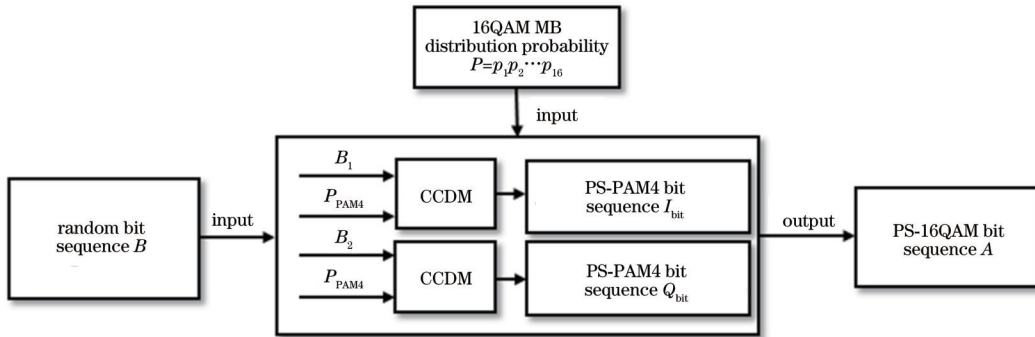


图 3 概率整形信号产生原理图

Fig. 3 Block diagram of PS signal generation

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 仿真设置

为了验证概率整形与子载波复用技术相结合以

缓解链路损伤的研究方案的可行性,在商用光学仿真软件 VPItransmissionMaker 中搭建双子载波复用跨洋光纤传输系统,如图4所示。其中,Tx DSP代表发送端数字信号处理,Rx DSP代表接收端数字信号处

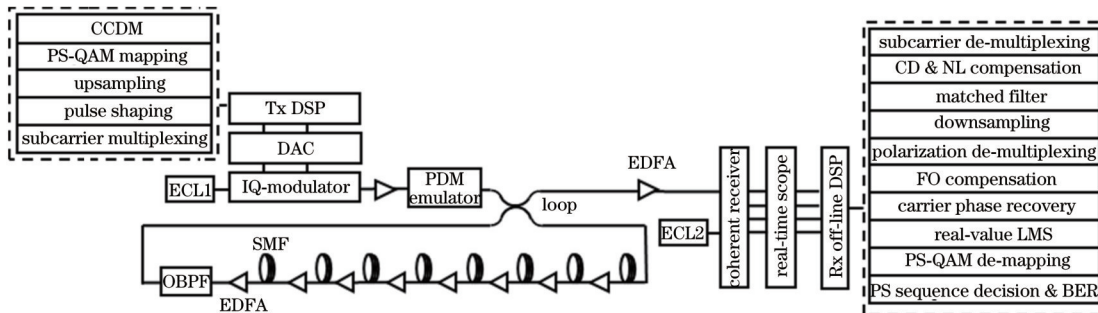


图 4 跨洋传输系统仿真装置示意图

Fig. 4 Illustration of simulation setup for transoceanic fiber transmission system



理, LMS 代表最小均方算法。在数字信号预处理中, 将两组伪随机比特分别通过 CCDM 编码调制为概率整形比特序列, 该序列经星座映射后变为 PS-16QAM 符号。同时, 对每个子载波的 PS-16QAM 符号进行 4 倍上采样, 再利用滚降因子为 0.01 的根升余弦滤波器对其进行脉冲成型。随后, 将脉冲成型后的多路信号进行子载波复用。在传输链路的发射端处, 外腔激光器 (ECL) 发出波长为 1550 nm、线宽为 100 kHz 的连续光, 利用两个数模转换器 (DAC) 将相同速率的单载波和双子载波信号转换为模拟信号以驱动 IQ 调制器进行电光调制, 在利用偏振复用 (PDM) 模拟器将其调制为偏振复用信号后进入环路。环路由 8 段损耗为 0.155 dB/km、有效面积为  $130 \mu\text{m}^2$  的单模光纤 (SMF), 8 个噪声系数为 4.5 dB 的掺铒光纤放大器 (EDFA) 和 1 个带宽为 37.5 GHz 的光学带通滤波器 (OBPF) 串联组成。在接收端处, 环路输出信号光经过再次放大后进行相干探测, 探测后的模拟信号分别经模数转换器转换为数字信号, 最终得到 4 路数字信号。随后, 进行离线数字信号处理, 主要算法包括子载波解复用、色散 (CD) 和非线性 (NL) 补偿、匹配滤波、偏振解复用、频偏 (FO) 补偿和载波相位恢复等。子载波信号的误码率 (BER,  $M_{\text{BER}}$ ) 为所有子载波的平均值。值得注意的是, 计算误码率所使用的随机比特序列为概率整形的非均匀比特序列, 且子载波解复用后的算法均是针对每个子载波分别进行处理的。

### 3.2 总比特率恒定条件下仿真性能分析

本文基于图 4 所示的仿真系统, 研究了在不同传输距离条件下均匀单载波 (uni-single carrier) 与均匀双子载波 (uni-dual subcarriers) PDM-16QAM 的传输性能, 如图 5 所示。当发射功率为 2 dBm (最优发射功率) 时, 在 20% 的前向纠错 (FEC,  $M_{\text{FEC}}$ ) 阈值 (误码率为  $2.4 \times 10^{-2}$ ) 条件下, 均匀双子载波系统的传输距离相比均匀单载波系统提升了 2.3% (405 km)。值得注意的是, 单载波传输系统与双子载波复用传输系统 (子载波之间的保护间隔为 0.6 GHz) 的总传输速率均为 224 Gb/s。

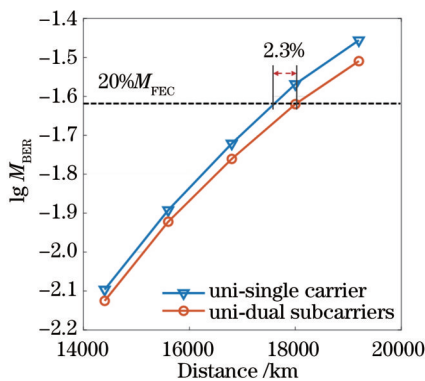


图 5 误码率与传输距离的关系

Fig. 5 Relationship between bit error rate and transmission distance

图 6 展示了不同传输距离 (14400~21600 km) 条件下, 不同熵值的概率整形单载波与双子载波 PDM-16QAM 信号的误码率性能。这里需要注意, 概率整形信号降低了每个符号的比特数, 因此需要提高波特率来保持总比特率的恒定。仿真结果表明, 概率整形熵值  $H$  越小, 系统的传输性能越好。然而, 随着传输距离的增加, 不同熵 ( $H=3.6$ 、 $H=3.7$ 、 $H=3.8$ ) 的概率整形传输系统的误码率曲线不断接近, 由概率整形带来的性能优势逐渐减弱。导致这种现象的原因有两个: 1) 概率整形熵  $H$  低的信号需要较高的波特率来保证总比特率恒定, 从而增大了信号带宽, 此时传输链路中光带通滤波器的带宽限制效应的累积使信号传输性能逐渐劣化; 2) 概率整形信号会增加传输中的非线性串扰 (NLI), 熵值越低的符号受到的串扰越大, 并且随着传输距离的增加, NLI 将更加明显, 并且双子载波信号中还存在子载波间的 NLI。由图 6 可知, 当总比特率相同时, 在 20% 的 FEC 阈值 (误码率为  $2.4 \times 10^{-2}$ ) 条件下, 概率整形 ( $H=3.6$ 、 $H=3.7$  和  $H=3.8$ ) 双子载波 PDM-16QAM 系统相比均匀单载波 PDM-16QAM 系统的传输距离分别提升了 21.0% (3698 km)、19.7% (3468 km) 和 14.5% (2549 km)。

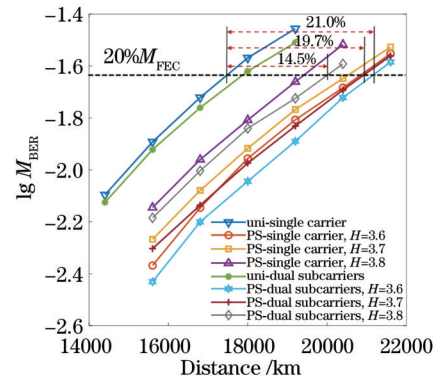


图 6 最优发射功率下误码率与传输距离的关系

Fig. 6 Relationship between bit error rate and transmission distance under optimum launch power

### 3.3 波特率恒定条件下仿真性能分析

本文进一步分析在波特率恒定的条件下, 概率整形信号在传输过程中所受 NLI 效应的影响, 仿真结果如图 7 所示。光纤传输距离设置为 18000 km, 信号波特率设置为 28 GBaud。所有仿真传输信号的波特率保持不变, 从而排除带宽限制效应的影响。当发射功率范围为 -2 dBm~4 dBm 时, 不同熵 ( $H=3.6$ 、 $H=3.7$ 、 $H=3.8$ ) 信号之间的性能相差较大, 熵较小的信号的传输性能较好。在发射功率大于 4 dBm 后, 不同熵 ( $H=3.6$ 、 $H=3.7$ 、 $H=3.8$ ) 信号之间的性能差异有所减小。根据增强型高斯噪声 (EGN) 模型<sup>[21]</sup>, 较强的概率整形 (熵较小) 将减弱系统对非线性的容忍度。此外, 较强的非线性效应会使得信号频谱展宽严重, 子载波复用系统的 NLI 损伤和带宽限制效应已经超过其抗非线性能力, 此时单载波系统的性能优于双子载波系统。然而, 在最优发射功率的情况下, 双子载波系统的

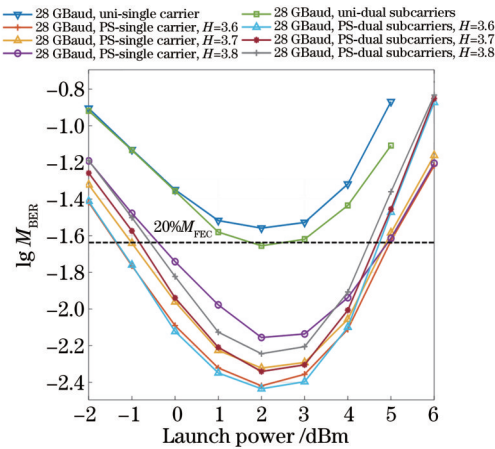


图 7 光纤传输距离为 18000 km 时误码率与发射功率的关系  
Fig. 7 Relationship between bit error rate and launch power when optical fiber transmission distance is 18000 km

性能仍然略优于单载波系统。

### 3.4 实验性能分析

为进一步验证所提方案的可行性,本文搭建了超长距光纤环路传输实验平台来模拟长距离跨洋传输。在发射端处,采用中心波长约为 1549.325 nm、线宽约为 100 kHz 的可调谐激光器作为光源,由任意波形发生器(AWG, 8195A)产生单载波和双载波复用 PS-16QAM ( $H=3.8$ ) 信号,再利用偏振复用模拟器得到最终的传输速率为 224 Gb/s 的单载波和双载波 PDM-PS-16QAM ( $H=3.8$ ) 信号。随后,将该信号输入光纤环路系统中以模拟长距离跨洋传输。光纤环路系统主要由声光调制器(AOM)、超低损大有效面积光纤(ULA)、掺铒光纤放大器和 C 波段波长选择开关(WSS)构成。其中,ULA 的损耗小于 0.155 dB/km、有效面积大于  $130 \mu\text{m}^2$ ,掺铒光纤放大器的噪声指数约为 5 dB。利用 WSS 对产生的信号进行光谱整形滤波,并注入到光纤链路中进行传输。在光纤环路系统中,利用两个 AOM 控制环路通断,利用控制信号控制光在环路中转的圈数以实现目标传输距离。每段光纤的损耗由对应的掺铒光纤放大器补偿。为了使环路实验可以更加精准地模拟跨洋长距离真实链路传输,使用环路同步偏振控制器(LSPC)在光信号每次循环通过对光信号偏振进行随机扰动,避免光信号的偏振态在环路传输中发生周期性变化。在接收端处,对信号进行相干探测,首先利用带宽为 37.5 GHz 的光学带通滤波器过滤 ASE 噪声,相干探测后的信号由采样率为 80 GSa/s、模拟带宽为 33 GHz 的实时数字示波器进行模数转换,最后进行离线数字信号处理。

图 8 所示为发射功率为 1 dBm 时单载波与双载波 PDM-16QAM 信号传输实验的结果图,实验结果与仿真结果相吻合。均匀调制格式的曲线结果可以反映出双载波系统能够有效地缓解由光纤非线性效应引入的链路损伤。同时,本文进一步验证了子载波复用与概率整形技术联合使用的性能。单载波和双载波 PDM-PS-16QAM ( $H=3.8$ ) 信号的曲线结果表明,在

相同传输速率的情况下,概率整形技术的引入很大程度上提升了系统的传输距离。在 20% 的 FEC 阈值条件下,均匀单载波、均匀双载波、概率整形 ( $H=3.8$ ) 单载波和概率整形 ( $H=3.8$ ) 双载波 PDM-16QAM 信号的传输距离分别为 5033, 5315, 7180, 7356 km, 后三者相比均匀单载波 PDM-16QAM 系统分别提升了 5.6% (282 km)、42.6% (2147 km)、46.2% (2323 km)。然而,随着传输距离的增加,非线性效应使得信号频谱展宽严重,双载波系统会受到更为明显的带宽限制效应和子载波间串扰的影响,进而导致双载波的优势相对单载波逐渐减弱。

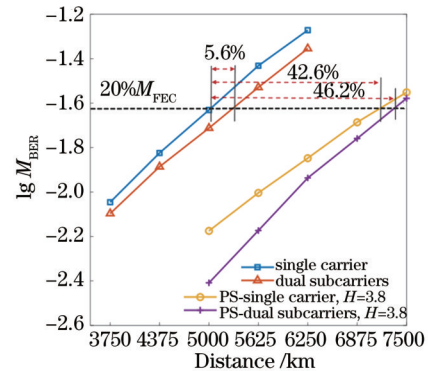


图 8 发射功率为 1 dBm 时实验误码率与传输距离的关系  
Fig. 8 Relationship between experimental bit error rate and transmission distance when launch power is 1 dBm

在仿真和实验中,概率整形双载波复用系统相比均匀单载波系统均提升了数千千米的传输距离。然而,由于实验系统中光电器件、传输链路的非理想特性,故实验系统的传输距离与仿真系统相差较大,具体原因:1)实验系统的收发端器件(任意波形发生器、IQ 调制器和相干接收机等)可能存在带宽限制效应、电噪声等非理想特性,并且实时数字示波器在模数转换过程中采样时钟不精准可能会造成实验系统的信噪比下降;2)传输链路中掺铒光纤放大器噪声系数较大(约为 5 dB),并且级联 WSS 的滤波器滚降和轻微的中心波长不匹配累积也将导致实验系统的信噪比下降;3)光纤在制造的过程中很难保证有效模面积的一致性,这会造成非线性效应的增加,进而导致实验系统的传输性能下降。综上,受成本、制造和技术的限制,仿真链路的配置和实验链路无法完全保持一致,故两者传输性能会存在差异。此外,跨洋系统性能对链路噪声(信噪比)非常敏感,而概率整形对噪声(ASE 噪声、非线性噪声等)具有高容忍度,因此能更好地缓解实验中噪声对传输性能的影响,从而使得实验性能提升幅度高于仿真系统。

## 4 结 论

研究了基于概率整形技术的子载波复用跨洋光纤传输系统,对不同熵值的概率整形单载波和双载波传输系统进行性能分析。仿真结果表明,在 20% 的 FEC 阈值(误码率为  $2.4 \times 10^{-2}$ ) 条件下,均匀双载波



PDM-16QAM 系统的传输距离相比均匀单载波 PDM-16QAM 系统提升了 2.3% (405 km)。双子载波 PDM-PS-16QAM ( $H=3.6$ 、 $H=3.7$ 、 $H=3.8$ ) 系统相较均匀单载波 PDM-16QAM 系统分别提升了 21.0% (3698 km)、19.7% (3468 km) 和 14.5% (2549 km)。实验结果表明, 双子载波 PDM-16QAM 系统在均匀和概率整形 ( $H=3.8$ ) 情况下的传输距离相比均匀单载波 PDM-16QAM 系统分别提升了 5.6% (282 km) 和 46.2% (2323 km)。概率整形技术和子载波复用技术相结合为跨洋传输系统提供了仿真和实验依据, 为实际跨洋传输系统性能的提升提供了可能。

## 参 考 文 献

- [1] Willner A. Optical fiber telecommunications VII[M]. New York: Academic Press, 2019: 565-625.
- [2] 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.
- [3] Poggiolini P. The GN model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3857-3879.
- [4] 黄媛, 赵家钰, 王金东, 等. 一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406003.  
Huang Y, Zhao J Y, Wang J D, et al. A real-time polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing for optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406003.
- [5] 陈祥敬, 王健, 吴重庆. DWDM 系统中 EDFA 串扰引起的误码率恶化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806005.  
Chen X J, Wang J, Wu C Q. Study on bit error rate degradation caused by EDFA crosstalk in DWDM system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806005.
- [6] 王轩力. 收发机噪声对非线性补偿光纤通信系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2306010.  
Wang X L. Influence of transceiver noise on nonlinearity-compensated optical transmission systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2306010.
- [7] Ip E, Kahn J M. Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3416-3425.
- [8] Tao Z, Dou L, Yan W, et al. Multiplier-free intra-channel nonlinearity compensation algorithm operating at symbol rate[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(17): 2570-2576.
- [9] Dar R, Winzer P J. Nonlinear interference mitigation: methods and potential gain[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 903-930.
- [10] 刘文楷, 刘成园, 董小伟. 基于相移光纤光栅积分特性的超短光脉冲整形[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0306005.  
Liu W K, Liu C Y, Dong X W. Ultrashort optical pulse shaping based on integral characteristics of phase-shifted fiber grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0306005.
- [11] Xu X, Châtelain B, Zhuge Q B, et al. Frequency domain M-shaped pulse for SPM nonlinearity mitigation in coherent optical communications[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013: JTh2A.38.
- [12] Shieh W, Tang Y. Ultrahigh-speed signal transmission over nonlinear and dispersive fiber optic channel: the multicarrier advantage[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(3): 276-283.
- [13] Qiu M, Zhuge Q B, Chagnon M, et al. Digital subcarrier multiplexing for fiber nonlinearity mitigation in coherent optical communication systems[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18770-18777.
- [14] Zhuge Q B, Châtelain B, Plant D V. Comparison of intra-channel nonlinearity tolerance between reduced-guard-interval CO-OFDM systems and Nyquist single carrier systems[C]//Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, March 4-8, 2012, California. Washington, D.C.: OSA, 2012: OTh1B.3.
- [15] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430-434.
- [16] Cho J, Schmalen L, Winzer P J. Normalized generalized mutual information as a forward error correction threshold for probabilistically shaped QAM[C]//European Conference on Optical Communication, September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017: 17733572.
- [17] Vassilieva O, Kim I, Ikeuchi T. On the fairness of the performance evaluation of probabilistically shaped QAM signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(11): 3067-3073.
- [18] Schmalen L. Probabilistic constellation shaping: challenges and opportunities for forward error correction [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition, March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: M3C.1.
- [19] 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.
- [20] Dar R, Feder M, Mecozzi A, et al. Accumulation of nonlinear interference noise in fiber-optic systems[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14199-14211.
- [21] Fehenberger T, Alvarado A, Böcherer G, et al. On probabilistic shaping of quadrature amplitude modulation for the nonlinear fiber channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 5063-5073.