

## 激光与光电子学进展

## 基于低密度奇偶校验码的概率整形正交频分复用-光载无线通信系统的传输特性

刘安良\*, 李鸿志

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 提出了一种基于低密度奇偶校验码(LDPC)的概率整形(PS)方案,以优化正交频分复用(OFDM)信号在光载无线(RoF)通信系统中的传输性能。首先,理论分析了PS技术和PS-OFDM信号的生成原理,该方案的冗余度为6.7%,相比传统的OFDM信号平均功率降低了约20%。接着,在理论研究的基础上建立了仿真验证系统,与传统OFDM-RoF系统相比,该系统可明显降低OFDM信号的平均发射功率,在相同平均发射功率下改善系统的峰值平均功率比(PAPR)。最后,对该系统在不同光纤传输距离下的误码率分析结果表明,在基带数据速率为2.5 Gbps,射频载波频率为25 GHz的情况下,基于LDPC的PS-OFDM-RoF系统可以有效改善接收机的灵敏度,并增加系统的可靠传输距离。

**关键词** 傅里叶光学与信号处理; 光载无线通信; 正交频分复用; 概率整形; 误码率

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212658

## Transmission Performance of Probabilistic Shaping Orthogonal Frequency Division Multiplexing Radio-over-Fiber Communication System Based on Low Density Parity Check Code

Liu Anliang\*, Li Hongzhi

College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China

**Abstract** In this study, we propose an orthogonal frequency division multiplexing radio-over-fiber (OFDM-RoF) system based on low density parity check code (LDPC) coded with probabilistic shaping (PS) for optimizing the transmission performance of the OFDM signal. We theoretically analyze the PS technology and the generation and demodulation principle of the PS-OFDM signal. The average power of the modulated OFDM signals for the same transmission power decreased by approximately 20% after PS with a 6.7% extra overhead. Compared with a normal OFDM-RoF system, the proposed PS-OFDM-RoF system can reduce the transmitting power of OFDM signals, and it has a better peak-to-average power ratio (PAPR) performance. Furthermore, a 25 GHz verification RoF system with a data rate of 2.5 Gbps is established for analyzing the transmission characteristics of the PS-OFDM signals. The measured bit error rate curves at different fiber lengths show that a PS-OFDM-RoF system based on LDPC can effectively improve the sensitivity of the receiver and increase the reliable transmission distance of the system.

**Key words** Fourier optics and signal processing; radio-over-fiber communication; orthogonal frequency division multiplexing; probabilistic shaping; bit error rate

## 1 引言

随着8 k视频和在线直播业务的快速发展,移动用户对高速、大容量数据的需求不断增加。为缓解低频段载波频谱资源紧张、带宽有限的情况,第三代合作伙

伴计划(3GPP)组织提出,在5G通信网络高频系统中使用毫米波信号来满足超大容量的数据传输需求<sup>[1-2]</sup>。而实现高频段载波信号的长距离、可靠传输,离不开光载无线(RoF)通信技术的支持<sup>[3-5]</sup>。正交频分复用(OFDM)信号被广泛用于现在的5G通信系统中,保

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-12; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-25

基金项目: 博士后面基金(2019M651095)、中央高校基本科研业务项目(3132019348)

通信作者: \*alliu@dlnu.edu.cn

障 OFDM 信号的可靠传输,是 RoF 技术在未来高载频通信系统中应用的关键<sup>[6]</sup>。

近年来概率整形(PS)技术被提出用于传统相干光通信系统,通过降低平均发射功率以改善信号传输性能<sup>[7-8]</sup>。文献[9]通过改进判决引导最小均方算法来解决 PS 在相干光中的偏振解复用问题。文献[10]利用 PS 实现了在自由空间中 55 m 链路上 400G+ 信号的可靠性传输。文献[11]采用常规恒等量分布匹配算法(CCDM)的正交幅度调制(QAM)信号在无源光网络中进行传输。而对于 RoF 系统中 PS 技术的研究相对较少,刘博等<sup>[12]</sup>采用 CCDM 的 PS 方案,利用 RoF 中的光外差技术实现了载波为 15 GHz 的 16QAM 信号在 40 m 的自由空间中的传输。而这种编码效率较低,只做了对 QAM 信号调制,且缺少 PS 技术对 RoF 系统中传输特性的详细分析。文献[13]采用 CCDM 的 PS 技术实现 16QAM/OFDM-RoF 系统,但编码效率较低。

为了优化 OFDM-RoF 系统,本文采用基于低密度奇偶校验码(LDPC)编码的 PS 方案对 OFDM 信号进行编码上的优化,从而提高 OFDM 信号在 RoF 系统中的抗色散性能。首先理论分析了 PS-OFDM 信号的产生和解调原理,其次搭建了数据速率为 2.5 Gbps,射频载波频率为 25 GHz 的 OFDM-RoF 传输系统,并对比了该系统与传统 OFDM-RoF 系统中 OFDM 信号发射功率及接收光功率的性能指标。最后,通过在基站侧模拟接收端的恢复过程,通过测量恢复后的原始数据信息的误码率等指标,对不同光纤长度的系统传输特性进行了验证和分析。

## 2 系统实现原理

### 2.1 PS 原理

PS 技术可有效改善 QAM 信号的传输性能,在规则网格分布上,通过调整各个星座点的出现概率,使得外围高功率星座点的出现概率降低,从而改善系统的误码率。传统的 PS 方案中,通常使用 CCDM 算法来实现输入分布匹配,但是其编码效率较低,且算法复杂

度较高,信号编码冗余度较高,增大了系统的延时。为了实现更高的编码效率和更低的系统时延<sup>[14-15]</sup>,本文结合前缀码编码的思想和比特交织优化编码实现 PS-OFDM 信号的产生和解调。为了更逼近信道容量,本文采用了 LDPC 码在信源编码和译码。该方法的 PS 编码规则如图 1 所示。

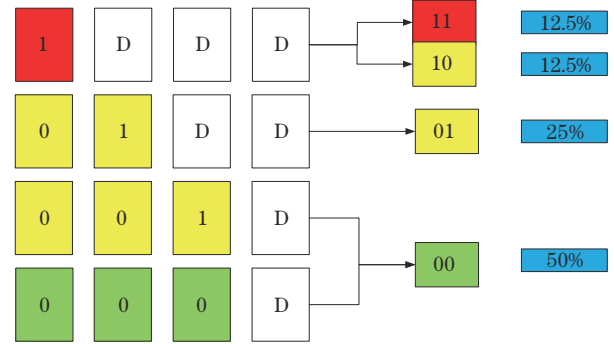


图 1 基于 LDPC 的 PS 编码规则

Fig. 1 PS coding rules based on LDPC

首先读取 16QAM 信号的前两个比特,将“11”,“01”,“10”,“00”分为 4 类,分别被编码为“1”,“01”,“001”,“000”。因为每个符号都有 4 个比特,所以这 4 类编码对应地分别读取 3 个、2 个、1 个、1 个比特来构成 1 个 16QAM 符号。再经过 PS 编码后,4 个比特可以映射为 1 个 16QAM 符号,但是所含有信息比特不同。假设所有原始符号出现概率相同,则经过编码后 4 个符号平均携带 15 个比特信息,该方案的冗余度为 6.7%。在译码阶段,本文采用比特翻转进行判决。

传统 16QAM 信号星座图如图 2(a)所示,经过 PS 后的星座图如图 2(b)所示。由图 2(b)可见,经过 PS 后从内到外各星座点出现的概率分别为 50%、37.5%、12.5%,形成类高斯分布,使得整形增益接近香农极限。各个星座点的功率即为到原点的距离,表达式为

$$P_i = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$ 表示各个星座点的 I、Q 两路的坐标; $P_i$ 是各

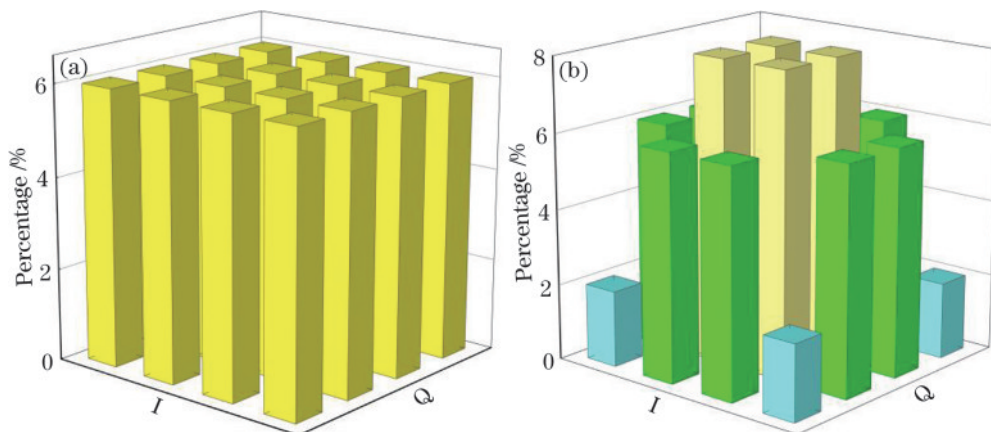


图 2 星座图概率分布图。(a) 传统 16QAM; (b) PS-16QAM

Fig. 2 Constellation probability distribution diagram. (a) Normal 16QAM; (b) PS-16QAM

星座点的功率。信号的平均功率可由下式计算获得：

$$\bar{P} = P_i \times p_i, \quad (2)$$

式中： $\bar{P}$  是平均功率； $p_i$  是各星座点的概率。假设 16QAM 中 I 路和 Q 路的 4 个电平幅值分别为  $-3$ 、 $-1$ 、 $1$ 、 $3$  V，则均匀分布下所有星座点的平均功率  $\bar{P}_N$  为

$$\bar{P}_N = \sqrt{(1^2 + 1^2)} \times \frac{4}{16} + \sqrt{(1^2 + 3^2)} \times \frac{8}{16} + \sqrt{(3^2 + 3^2)} \times \frac{4}{16} \approx 3(\text{W}) \quad (3)$$

则经过 PS 编码后，所有星座点的平均功率  $\bar{P}_{\text{ps}}$  为

$$\bar{P}_{\text{ps}} = \sqrt{(1^2 + 1^2)} \times 50\% + \sqrt{(1^2 + 3^2)} \times 37.5\% + \sqrt{(3^2 + 3^2)} \times 12.5\% \approx 2.4(\text{W}) \quad (4)$$

可见，在相同的发送功率下，经 PS 后调制 OFDM 信号子载波的平均功率相比传统均匀分布的平均功率降低了约 20%，这可以有效改善 OFDM 系统的非线性效应。当平均功率相同时，经 PS 后星座点的平均欧氏距离比传统均匀分布情况增大 25%，这可有效地降低传输误码率，改善光信噪比性能。

## 2.2 PS-OFDM 信号生成与解调

PS-OFDM 信号的生成和解调原理如图 3 所示。在中心站内，对输入的伪随机序列分为 4 路数据流，根据 PS 方案以及格雷映射准则对比数据。PS 后的比特序列，以符号为单位进行比特翻转，与 CCDM 算法相同，由这种编码方案需要符号内所有比特完全正确传输才可能正确译码。然后对整形数据进行合并串行流，对合并后的数据整体做 PS-16QAM 调制。OFDM 信号的生成公式为

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j \cdot 2\pi kn}{N}\right), \quad (5)$$

式中： $n$  表示 OFDM 信号中的第  $n$  个子载波，对 PS-16QAM 信号进行串并转换， $N$  点做快速傅里叶逆变换 (IFFT)，其中  $N$  表示用于传输的子载波数； $X_k$  ( $0 \leq k \leq N-1$ ) 表示第  $k$  个符号； $x_n$  表示  $N$  点 IFFT 的输出。然后再进行映射，加循环前缀，数模转换生成 PS-OFDM 信号。PS-OFDM 信号解调过程与调制过程进行相应的反变换。但是不同于传统 OFDM 信号，PS-OFDM 信号在子载波调制时需要进行标记—取反，改变各个星座点的编码和比特翻转。经 PS 后，星座图内圈低电平星座点的出现概率变高，外圈高电平星座点的出现概率变低，OFDM 信号的峰值平均功率比 (PAPR) 可由下式计算获得<sup>[16]</sup>：

$$P = 10 \lg \frac{\text{Max}\{|x_n|^2\}}{E[|x_n|^2]}, \quad (6)$$

式中： $P$  表示 PAPR 值； $\text{Max}\{|x_n|^2\}$  表示  $x_n$  信号的峰值功率； $E[|x_n|^2]$  表示  $x_n$  信号的平均功率。由式 (6) 可知，经 PS 后的 OFDM 信号的 PAPR 比传统 OFDM 系统更低，优化了 OFDM-RoF 系统的性能。

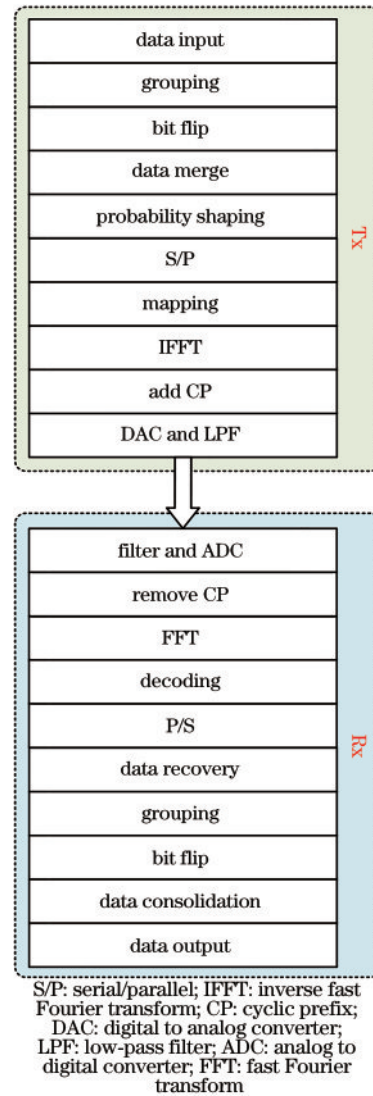


图 3 PS-OFDM 信号的生成和解调原理图

Fig. 3 Generation and demodulation schematic diagram of PS-OFDM signal

## 3 系统仿真验证及结果分析

### 3.1 系统结构

本文所提出的 PS-OFDM-RoF 系统原理图如图 4 所示，利用 Optisystem 和 Matlab 联合仿真对该系统性能进行验证。在中心站内，2.5 Gbps 原始基带数据信号首先被调制为 PS-OFDM 信号，其中 PS-OFDM 生成模块参数如下：发射功率为 10 dBm，最大子载波数为 128，实际数据子载波数为 80，加循环前缀为 10。接着，调制后的 PS-OFDM 信号和频率为 25 GHz 的本振信号通过电混频器，实现上变频功能，混频后信号通过双臂马赫-曾德尔调制器 (MZM)，被调制到波长为 193.1 THz 的光载波上，完成中心站射频信号的电/光转换。MZM 的半波电压被设置为 2 V，消光比为 20 dB，为实现双边带调制格式，直流偏置电压被设置为 1 V，MZM 输出光信号频谱图如图 5 所示，可见中心载波频率为 193.1 THz，以及新生成的上、下 1 阶边带

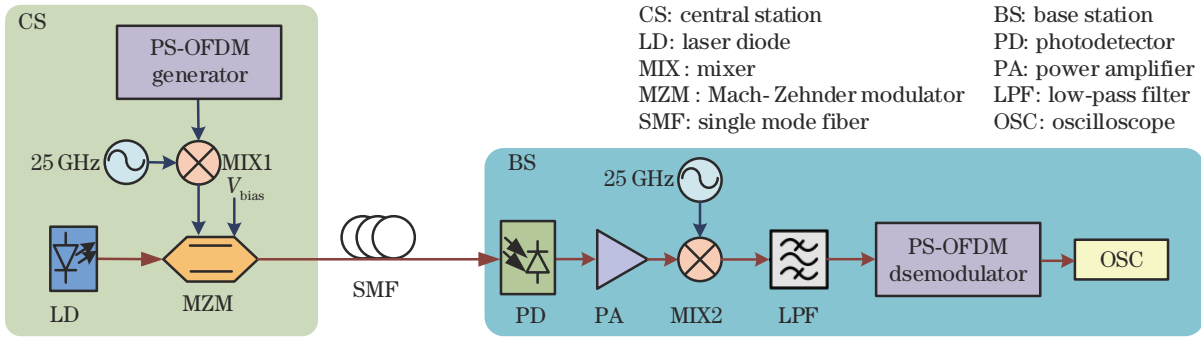


图 4 PS-OFDM-RoF 系统原理图  
Fig. 4 Schematic of PS-OFDM-RoF system

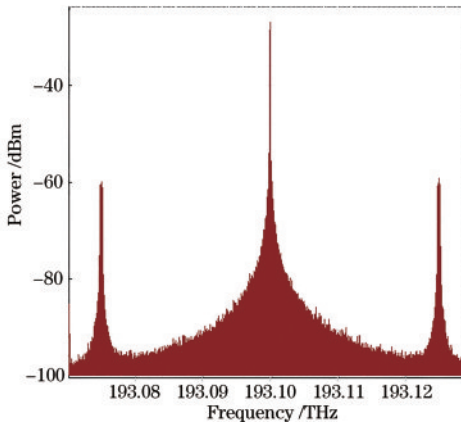


图 5 MZM 输出信号光谱图  
Fig. 5 Optical spectra of MZM output signal

的频率间隔为 25 GHz 的双边带光谱图。该信号经过标准单模光纤被送至远端基站,在基站内,通过光电二极管(PD)探测器的拍频作用,可恢复出 25 GHz 的 PS-OFDM 射频信号,该信号经过放大和射频天线即可发送给移动终端,这里为了对下行传输的 PS-OFDM 信号光纤传输性能进行分析,在基站侧,利用混频器和 25 GHz 本振对其进行下变频,并利用 PS-OFDM 解调模块恢复出原始的基带数据信号,利用示波器对其眼图进行观测分析,并测试系统的传输误码率,对该系统性能进行进一步分析。

### 3.2 实验结果分析

本文首先在相同的 OFDM 信号平均发射功率下

研究传统 OFDM-RoF 系统与 PS-OFDM-RoF 系统的误码率变化,如图 6 所示。因为 OFDM 信号在高功率下非线性差,容易出现误码,在背靠背链路上传输,当提高 OFDM 信号的平均发射功率时,OFDM-RoF 系统逐渐出现误码。但是传统 OFDM-RoF 链路在平均发射功率为 20 dBm 出现误码,PS-OFDM-RoF 链路在 21.4 dBm 出现误码,这说明了 PS-OFDM 信号相比传统 OFDM 信号可以适当提高信号平均发射功率的门限。在误码率为  $1 \times 10^{-4}$  时,PS-OFDM 信号相比传统 OFDM 信号传输功率门限提高了约 1.10 dBm。

本文设计的传统 OFDM-RoF 链路和 PS-OFDM-RoF 链路的平均功率相同。由图 7 可以看出,在相同

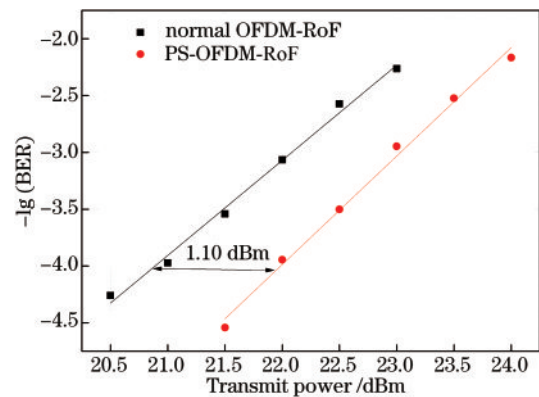


图 6 不同发射功率下误码率曲线对比图  
Fig. 6 Bit error rate (BER) versus transmit power

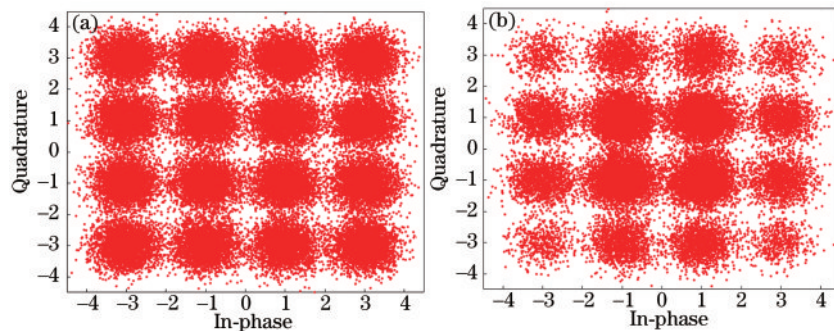


图 7 16QAM-PS-OFDM 信号接收端星座图。(a)传统 OFDM-RoF 系统;(b)PS-OFDM-RoF 系统  
Fig. 7 Recovered constellation diagram of 16QAM-PS-OFDM signal. (a) Normal OFDM-RoF system; (b) PS-OFDM-RoF system

的数据传输下,传统 OFDM-RoF 系统的最外圈峰值功率点出现概率高于 PS-OFDM-RoF 系统的。根据式(5)可知,在平均功率相同下,峰值功率越高,则链路的 PAPR 值越高。利用互补累计函数测得的传统 OFDM-RoF 链路和 PS-OFDM-RoF 链路在背靠背传输情况下的 PAPR 对比曲线如图 8 所示。PS-OFDM-RoF 系统相比传统 OFDM-RoF 系统的 PAPR 值降低了约 0.6 dB,有效改善了 OFDM-RoF 系统的非线性效应。

最后,对 PS-OFDM 系统在不同光纤长度传输距离下的误码率性能进行了测试。其结果如图 9 所示。由式(2)可知,PS-OFDM 信号星座点间的欧氏距离大于传统 OFDM 信号,所以传统 OFDM 信号比 PS-OFDM 信号更容易出现误码。从图 9 可以看出,PS-OFDM 信号在 RoF 系统中传输的误码率性能明显优于传统 OFDM 信号在 RoF 系统中传输。PS-OFDM-RoF 系统在前向纠错门限误码率  $3.8 \times 10^{-3}$  时,光纤长

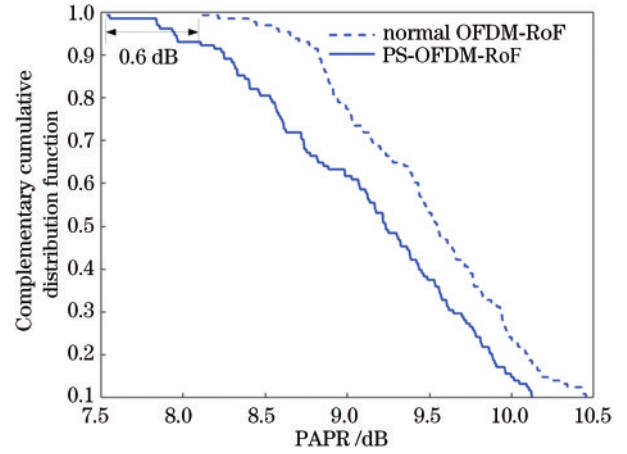


图 8 传统 OFDM-RoF 和 PS-OFDM-RoF 系统 PAPR 对比曲线  
Fig. 8 PAPR curves of normal OFDM-RoF system and PS-OFDM-RoF system

度分别为 0、10、20 km 时,对应的接收机灵敏度分别提高了 1.17、1.21、1.30 dBm。

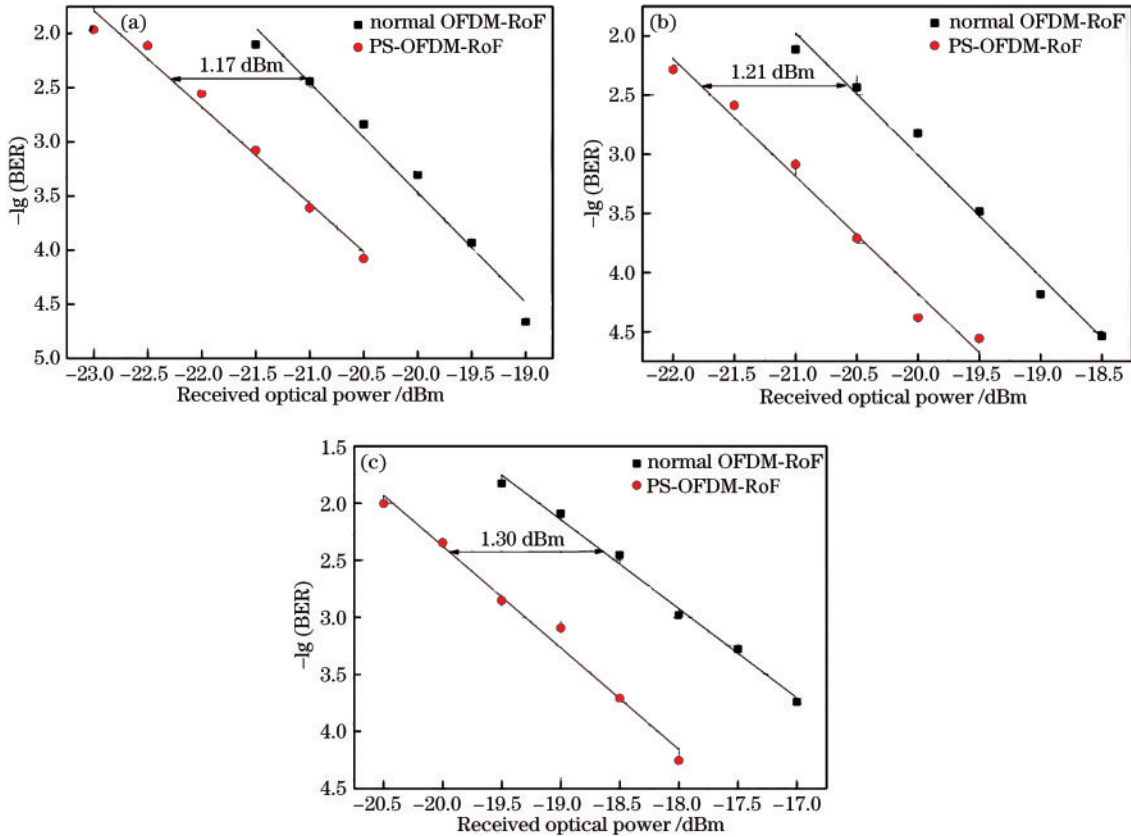


图 9 不同光纤长度(L)下误码率曲线。(a)  $L=0$ ; (b)  $L=10$  km; (c)  $L=20$  km  
Fig. 9 BER curves at different fiber lengths (L). (a)  $L=0$ ; (b)  $L=10$  km; (c)  $L=20$  km

## 4 结 论

研究并设计了一个基于 LDPC 的 PS-OFDM-RoF 系统,理论分析了 PS-OFDM 信号和传统 OFDM 信号的平均发射功率,测量并比较了比特率为 2.5 Gbps,载波为 25 GHz 的传统 OFDM-RoF 信号与 PS-

OFDM-RoF 信号分别在 0、10、20 km 光纤传输后的系统性能。仿真结果表明:在光纤长度为 20 km 传输时,PS-OFDM-RoF 系统的 PAPR 比传统 OFDM-RoF 系统的改善了约 2 dBm,接收机灵敏度提高了约 1.3 dBm,且基于 PS 技术的 OFDM-RoF 系统有效地增加了 OFDM 信号在光纤中的传输距离。

## 参 考 文 献

- [1] Ge C, Wang N, Selinis I, et al. QoE-assured live streaming via satellite backhaul in 5G networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(2): 381-391.
- [2] Chen N, Okada M. Toward 6G internet of things and the convergence with RoF system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8719-8733.
- [3] Kim B G, Bae S H, Kim M S, et al. Reflection-tolerant RoF-based mobile fronthaul network for 5G wireless systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(24): 6105-6113.
- [4] Cunha M S B, Lima E S, Andriolli N, et al. 5G NR RoF system based on a monolithically integrated multi-wavelength transmitter[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(2): 6100308.
- [5] Sung M, Kim J, Kim E S, et al. RoF-based radio access network for 5G mobile communication systems in 28 GHz millimeter-wave[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 409-420.
- [6] Thng G H, Bakaul M, Jaward M H. Differential encoding for unlock heterodyning millimeter-wave RoF link[J]. Optics Communications, 2021, 498: 127221.
- [7] 林志颖, 杨彦甫, 向前, 等. 用于概率整形信号的自适应载波相位恢复算法[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306001.  
Lin Z Y, Yang Y F, Xiang Q, et al. Adaptive carrier phase recovery algorithm for probabilistically shaped signals[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2306001.
- [8] 林志颖, 杨彦甫, 向前, 等. 相干光通信中概率整形信号的偏振解复用算法[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0606002.  
Lin Z Y, Yang Y F, Xiang Q, et al. Polarization demultiplexing algorithm for probabilistically shaped signals in coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0606002.
- [9] Arikawa M, Sato M, Hayashi K. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1300-1315.
- [10] Guiomar F P, Lorences-Riesgo A, Ranzal D, et al. Adaptive probabilistic shaped modulation for high-capacity free-space optical links[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(23): 6529-6541.
- [11] Xiao Q H, Chen Y F, Lin S X, et al. DFT-spread DMT-WDM-PON employing LDPC-coded probabilistic shaping 16 QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 714-722.
- [12] Liu B, Li X Y, Zhang Y, et al. Probabilistic shaping for ROF system with heterodyne coherent detection[J]. APL Photonics, 2017, 2(5): 056104.
- [13] 李汐, 张春蕾, 王欢. 基于概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0906008.  
Li X, Zhang C L, Wang H. 16QAM/OFDM-RoF system based on probabilistic shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0906008.
- [14] Yoshizawa R, Ochiai H. A trellis shaping for peak and average power reduction of BICM-OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 1143-1154.
- [15] 倪玮隆, 郑玉甫, 冯楚滢. 导频辅助降低 PAPR 技术在光正交频分复用通信系统中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 140601.  
Ni W L, Zheng Y F, Feng C Y. Application of pilot-assisted peak-to-average power ratio reduction technology in optical orthogonal frequency division multiplexing communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 140601.
- [16] Hou J, Ge J H, Zhai D W, et al. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals with nonlinear companding scheme[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2010, 56(2): 258-262.