

激光与光电子学进展

基于概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统研究

李汐*, 张春蕾, 王欢

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了在不增加平均光功率的前提下,降低光载无线系统(RoF)的系统误码率和提高系统速率,提出了一种基于概率整形(PS)的 W 波段正交频分复用光载无线(OFDM-RoF)系统。在理论上分析了 PS 的原理和操作规则,并在仿真平台上完成了 OFDM-RoF 系统的搭建。在该系统中,采用 PS 对 16 进制正交幅度调制(16QAM)的各个星座点的发送概率进行调整,之后与 OFDM-RoF 系统联合生成 80 GHz PS-16QAM-OFDM 毫米波信号,信号分别经光纤传输 0, 10, 20 km 后,结果表明:在系统的符号速率为 2.5 GBaud, $\lg R_{BE} = -9$ 时(R_{BE} 为误码率),与传统 16QAM/OFDM-RoF 系统相比,采用 PS 的 16QAM/OFDM-RoF 系统的发送光功率降低了 1 dBm,其系统性能更优;在系统的符号速率为 10 GBaud 时,采用 PS 的 16QAM/OFDM-RoF 系统的星座点外圈虽然出现了发散现象,但内圈星座点集中,系统性能良好。

关键词 光通信; 概率整形; W 波段; OFDM-RoF 系统; 发送光功率

中图分类号 TN928

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906008

16QAM/OFDM-RoF System Based on Probabilistic Shaping

Li Xi*, Zhang Chunlei, Wang Huan

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou, Gansu, 730070, China

Abstract To reduce the system bit error rate and increase the system rate of the radio of fiber (RoF) system without increasing the average optical power, this study proposes a W-band orthogonal frequency division multiplexing-radio of fiber (OFDM-RoF) system based on probability shaping (PS). The theory and operating rules of PS are analyzed theoretically. The OFDM-RoF system is developed on the simulation platform. In this system, the PS is used to adjust the transmission probability of each constellation point of 16 quadrature amplitude modulation (16QAM), and the 80 GHz PS-16QAM-OFDM millimeter-wave signal is generated jointly with the OFDM-RoF system. Results after the signals are transmitted 0, 10, and 20 km through an optical fiber show that when the symbol rate is 2.5 GBaud and $\lg R_{BE} = -9$ (R_{BE} is bit error rate), compared with the traditional 16QAM/OFDM-RoF system, the transmitting optical power of the PS-16QAM/OFDM-RoF system is reduced by 1 dBm, and its system performance is better. However, when the symbol rate is 10 GBaud, the constellation diagram of the 16QAM/OFDM-RoF system using PS diverges in the outer circle, but the constellation points in the inner circle are concentrated; its system performance is good.

Key words optical communications; probabilistic shaping; W-band; OFDM-RoF system; transmitting optical power

OCIS codes 060.4080; 060.5652; 060.2360

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-02; 录用日期: 2020-11-14

*E-mail: 346282380@qq.com

1 引言

W 波段具有高精度方向性和大带宽的优点^[1-2], 它与光载无线(RoF)系统结合能更好地实现无线和光纤网络的无缝融合, 并能提供与高速光纤通信系统相匹配的无线链路, 同时保持传输的透明度, 是未来无线通信的研究热点^[3-7]。正交频分复用(OFDM)作为一种多载波调制技术, 具有频带利用率高、可抵抗多径效应等特点, 相比于单载波技术, 它更适用于接收带宽有限的 W 波段 RoF 系统, 可以提高系统的频谱效率^[8-11]。但由于 OFDM 具有高峰值平均功率比(PAPR), 它会增强信号在光纤中传输时受到的非线性效应, 导致码间干扰, 降低了系统性能^[12-14]。

概率整形(PS)作为一种可以确保通信系统容量达到香农极限的数字信号处理(DSP)技术^[15-16], 考虑了星座内各点能量的消耗不同, 通过降低能量较大的星座点外圈的传输概率和提高能量较小的星座点内圈的传输概率来减小信号受到的非线性影响^[17-18]。PS 作为目前最先进的编码调制方案, 它的主要组成部分分为前向纠错(FEC)和分布匹配器(DM), 当光信噪比超过某个一定的值时, 互信息

接近香农极限, 降低了相同发射功率下的系统误码率(BER, R_{BE})^[19-20]。

本文提出一种采用概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 下行系统, 当系统符号速率为 2.5 GBaud 时, 对比了传统 16QAM/OFDM-RoF 系统和 PS-16QAM/OFDM-RoF 系统的系统性能; 当系统符号速率为 10 GBaud 时, 对 16QAM/OFDM-RoF 系统进行了验证。

2 概率整形原理及规则

概率整形保留了原本均匀分布的星座点位置, 通过加入冗余, 对输入重新进行编码与映射, 增大内圈星座点的发送概率, 减小外圈星座点的发送概率, 从而使输入分布趋向于高斯分布或者类高斯分布, 进而增大系统的信道容量, 使其等于或接近于系统的最大信道容量。由于基于比特交织编码调制(BICM)技术的系统性能能更好地接近香农极限, 且 BICM 技术通过将编码器 and 调制器分开, 可以更好加入概率整形编码模块, 降低了系统设计的难度。因此, 本文采用 BICM 编码调制的概率整形方案, 其方案框图如图 1 所示。

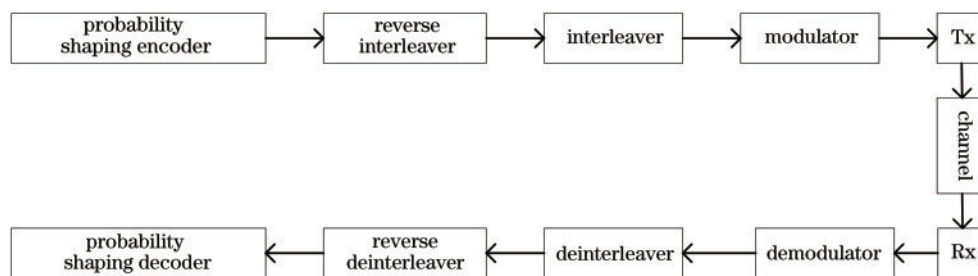


图 1 BICM-PS 方案框图
Fig. 1 Block diagram of BICM-PS program

16QAM 概率整形编码方案的映射规则如图 2 所示。将 16QAM 的星座点分为 3 个功率等级, 功率等级 1 是前两比特为“00”的星座点, 功率等级 2 是前两比特为“01”或“10”的星座点, 功率等级 3 是前两比特为“11”的星座点; 只要改变 3 种功率等级的出现概率, 就可以实现不均匀的输入分布。通过图 2 可知, 若要提高星座点内圈的发送概率, 则需要提高功率等级 1, 即“00”的出现概率。

为了提高“0”比特的出现次数, 使输入分布整形为类高斯分布, 采用“标志-取反”的方法设计出了额外增加冗余为 20% 的概率整形方案, 将均匀分布的 16QAM 符号序列当作 4 路随机比特序列, 对其

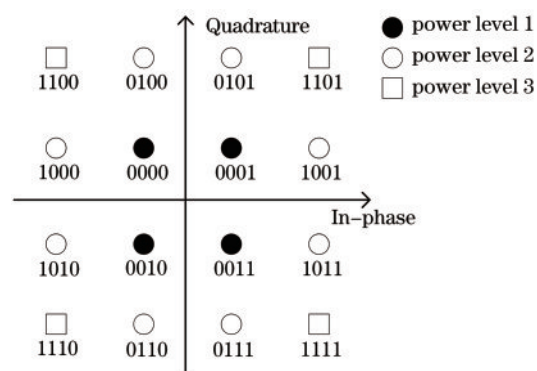


图 2 16QAM 概率整形编码方案的映射规则图
Fig. 2 Mapping rule diagram of 16QAM probabilistic shaping coding scheme

中的第 1 路和第 2 路进行操作, 设比特序列的总长度为 N , 以 3 个比特长度作为一个单位, 对第 1 路和第 2 路比特序列按顺序进行 $\frac{N}{3}$ 次操作。其操作规则为: 取第 1 路比特序列中的一个单位, 计算这个单位中“0”出现的次数 m , 若 $m \leq \frac{3}{2}$, 则对该单位的比特序列进行取反, 并将标志位“M1”置 1, 若 $m > \frac{3}{2}$, 则不对比特序列进行操作, 将标志位“M1”置 0; 同理, 取第 2 路比特序列中的一个单位, 根据相同的规则对其进行操作, 并以标志位“M2”记录最后的结果。最后将“M1”“M2”分别放置于第 3、4 路比特序列的相应单位的最后一个符号比特上。若剩余符号数小于 3, 则不对其进行操作。

3 系统仿真

基于 PS 的 RoF 系统仿真图如图 3 所示, 采用光仿真软件与 Matlab 联合仿真。首先, 在 Matlab 中根据操作规则对 16QAM 进行概率整形编码处理, 处理后的概率分布如图 4 所示; 其次, 在光仿真软件中, 经 PS 处理后的 16QAM 信号分成两路进入 OFDM 调制模块, OFDM 模块对两路信号进行串并转换(S/P)、傅里叶逆变换(IFT)、添加循环前缀(CP)等处理后, 完成 OFDM 调制过程; 最后, 调制后的 OFDM 信号经正交调制器(I/Q modulator)与 80 GHz 的射频混频后驱动马赫-曾德尔调制器(MZM)生成了 80 GHz OFDM 毫米波光信号。

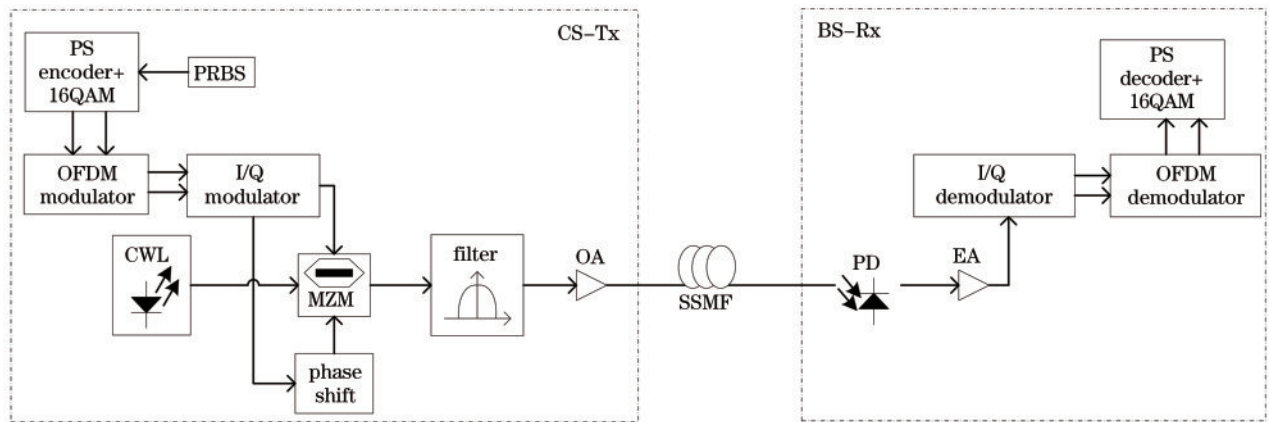


图 3 基于 PS 的 RoF 系统

Fig. 3 PS-based RoF system

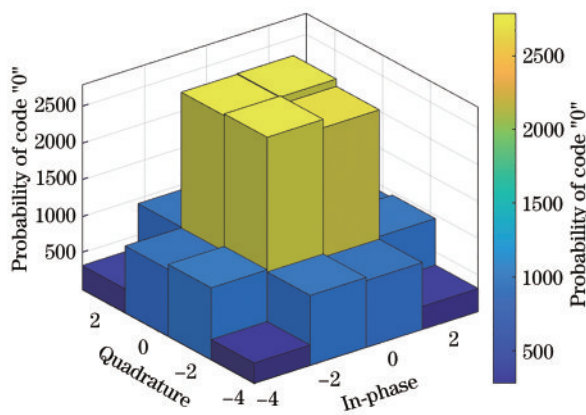


图 4 PS-16QAM 的概率分布

Fig. 4 Probability distribution of PS-16QAM

仿真分为中心站发送端(CS-Tx)和基站接收端(BS-Rx)两个部分。RoF 系统的 CS-Tx 端的主

要作用是生成经 PS 处理过的频率为 80 GHz 的 OFDM 毫米波光信号。由连续激光器(CWL)发射出一路频率为 193.1 THz 的光载波, 光载波经过被 OFDM 射频信号驱动的双端口 MZM 后完成了单边带调制; MZM 的半波电压为 4 V, 消光比为 30 dB, 双臂的相位差为 $\frac{\pi}{2}$, 幅度差为 2 V。经 MZM 调制后的 OFDM 信号经过一个频率为 193.18 THz、带宽为 160 GHz 的光滤波器后滤掉了残留的 +3 阶边带, 其频谱如图 5(a) 所示。滤波后的 OFDM 信号经光放大器(OA)实现光功率放大后经标准单模光纤(SSMF)传送至 BS-Rx 端。SSMF 的色散和损耗分别设置为 16.75 ps/(nm·km) 和 0.2 dB/km。

在 RoF 系统的 BS-Rx 端, 80 GHz 16QAM/OFDM 光毫米波信号经光电转换器(PIN)拍频后,

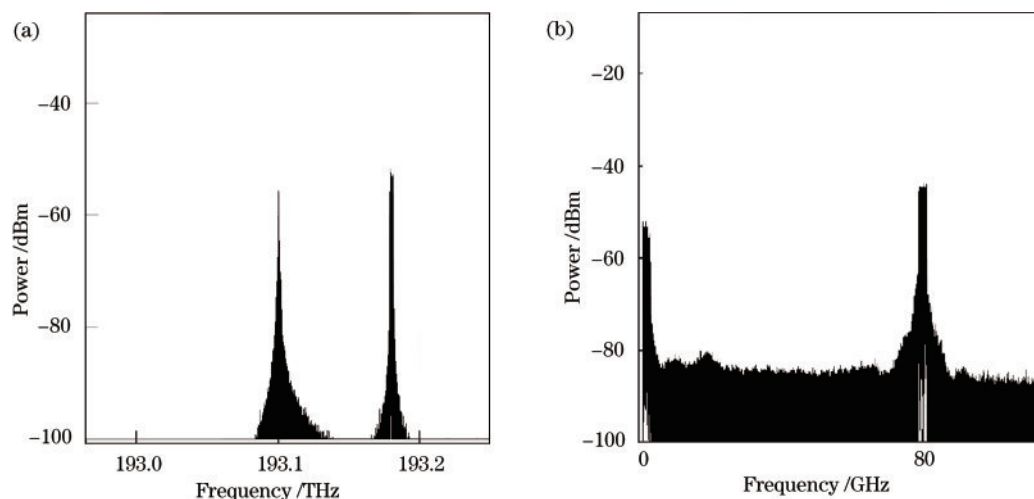


图5 80 GHz OFDM 光电频谱图。(a)光频谱图;(b)电频谱图

Fig. 5 80 GHz OFDM optical and electrical spectrogram. (a) Spectrogram; (b) electrical spectrogram

下变频为 80 GHz 16QAM/OFDM 电毫米波信号,其电频谱图如图 5(b)所示;PIN 的灵敏度为 1 A/W,暗电流为 10 nA。拍频后的电信号经电放大器(EA)放大功率后对信号进行解调,解调过程为调制的逆过程。首先,80 GHz OFDM 信号经过 I/Q 调制器转换成 OFDM 信号;其次,对 OFDM 信号进行去 CP、FFT 变换、并串转换等一系列处理;最后,16QAM 信号经概率整形解码后,得到了二进制序列,完成了整个解调过程。

4 仿真结果及分析

本研究从两个方面对系统结果进行分析:一是系统性能,即接收信号的质量;二是系统速率。首先,对比了系统的符号速率为 2.5 GBaud 时,平均分布 16QAM/OFDM 信号和概率整形 16QAM/

OFDM 信号在 RoF 系统中分别传输 0, 10, 20 km 后的星座图,如图 6 和图 7 所示,由图可知,平均分布 16QAM/OFDM 信号在背靠背(BTB)传输时,星座点之间没有发生混叠现象,接收端可以收到正确的信息;但在传输 10 km 和 20 km 后,星座点之间有明显的混叠现象,这说明 OFDM 信号在光纤中传输时受到了光纤非线性效应的影响,产生了码间干扰,接收到的信号质量较差。概率整形 16QAM/OFDM 信号在传输 0, 10, 20 km 后星座点之间没有产生任何的混叠现象,这是由于概率整形将星座点之间的最小欧氏距离最大化,减小了非线性效应对信号的影响,从而提高了系统传输信息的质量。同时,使用 Matlab 对仿真后的发送光功率和误码率(BER, R_{BE})进行收集,其曲线对比图如图 8 所示。由曲线图可知,当纠错后的 $\lg R_{BE} = -9$ 时,与传统

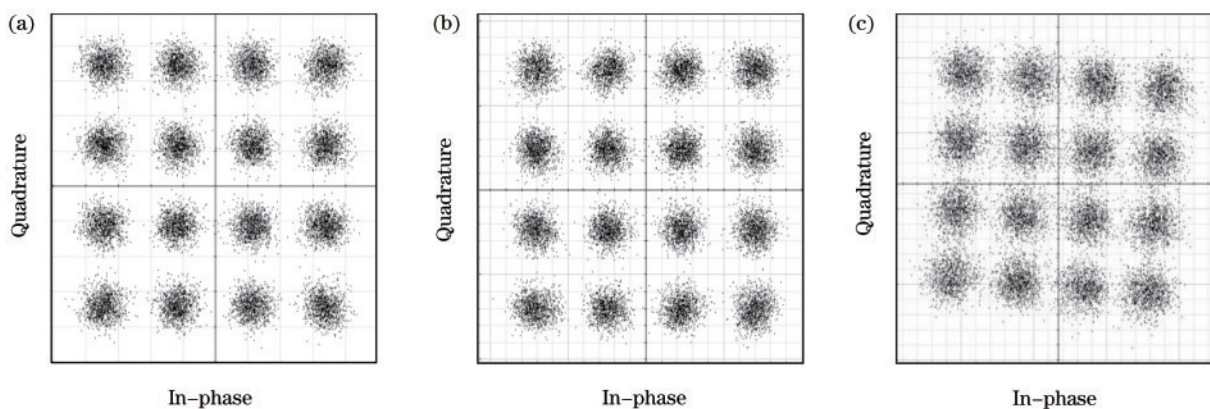


图6 16QAM/OFDM 信号经不同长度光纤传输后的星座图。(a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

Fig. 6 Constellation diagrams of 16QAM/OFDM signal transmitted through optical fibers with different lengths. (a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

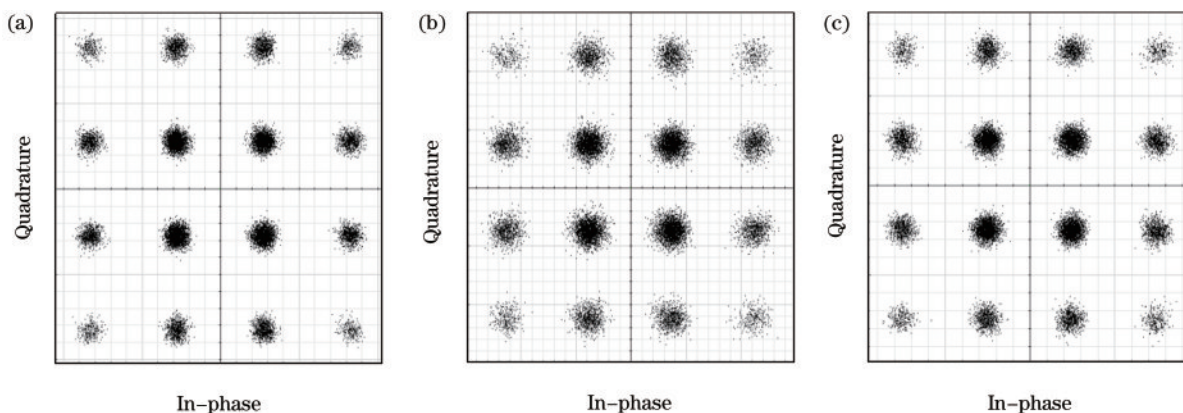


图 7 PS-16QAM/OFDM 信号经不同长度光纤传输后的星座图。(a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

Fig. 7 Constellation diagrams of PS-16QAM/OFDM signal transmitted through optical fibers with different lengths. (a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

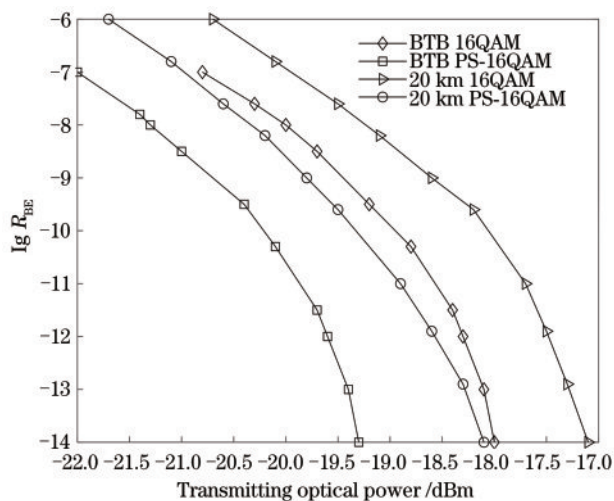


图 8 概率整形和传统 16QAM/OFDM 的误码率与发送光功率对比图

Fig. 8 Comparison of bit error rate and transmitting optical power between probability shaping and traditional 16QAM/OFDM

16QAM/OFDM 相比, PS-16QAM/OFDM 信号经 BTB 和 20 km 传输后的发送光功率分别降低了 1.3 dBm 和 1 dBm。由分析可知, 概率整形技术在光通信系统中可以起到改善系统性能、降低平均光功率的作用。

其次, 仿真了系统符号速率为 10 GBaud 时的概率整形 16QAM/OFDM-RoF 系统, 概率整形 16QAM/OFDM 信号分别经过 0, 10, 20 km 传输后, 其星座图如图 9 所示, 根据星座图可知, OFDM 信号在 BTB 传输时, 星座点十分集中, 没有任何混叠迹象; 在传输 10 km 和 20 km 后, 距离坐标轴中心最近的 4 个星座点集中没有发散, 但剩余的星座点随着距离的增加已经开始慢慢向外发散, 这是由于概率整形对星座点的发送概率进行了调整, 但接收端仍可以接收到质量较好的信号。通过上述分析可知, 概率整形技术在光通信系统中可以起到提高系统传输速率的作用。

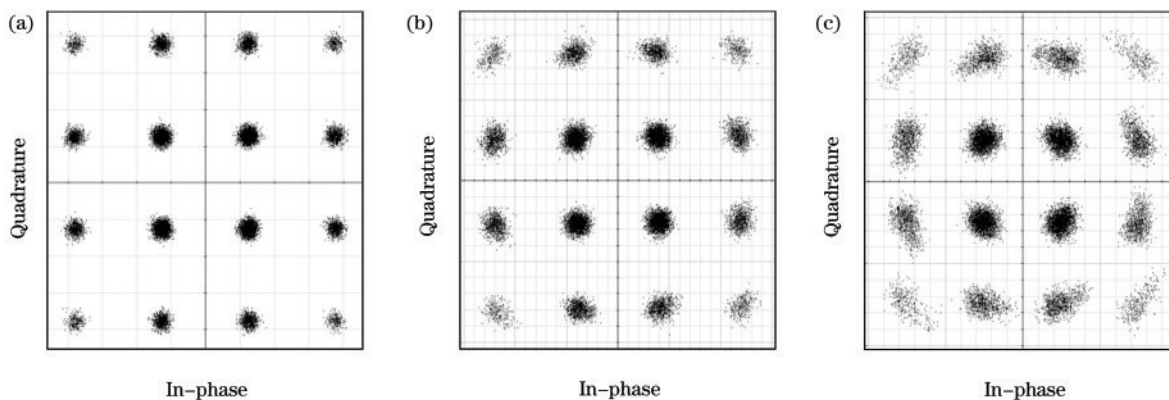


图 9 PS-16QAM/OFDM 信号经不同长度光纤传输后的星座图 (a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

Fig. 9 Constellation diagrams of PS-16QAM/OFDM signal transmitted through optical fibers with different lengths. (a) 0 km; (b) 10 km; (c) 20 km

5 结 论

提出了一种基于概率整形的 W 波段 RoF 系统, 通过概率整形对 16QAM/OFDM 进行概率调整, 减弱经 OFDM 调制后的信号在系统中传输时的非线性效应, 从而降低系统误码率。在对概率整形及系统原理进行理论分析的基础上, 基于光仿真软件平台对 RoF 系统的系统性能进行了仿真及分析, 结果表明: 在符号速率为 2.5 GBaud 时, 相比于传统的 16QAM/OFDM-RoF 系统, 经概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统经 20 km 光纤传输后, 发送光功率降低了 1 dBm, 系统性能更优; 在符号速率为 10 GBaud 时, 信号传输 20 km 后, 星座点内圈没有出现发散现象, 星座点外圈出现了发散现象, 但没有混叠, 接收端可以正常接收解调信号, 系统性能良好。在 OFDM-RoF 系统中, 采用概率整形编码调制不仅能提高系统性能, 还能提高系统速率。

参 考 文 献

- [1] Wu K Q, He J, Zhou Z H, et al. Probabilistic amplitude shaping for a 64-QAM OFDM W-band RoF system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(13): 1076-1079.
- [2] Zhou Z H, He J, Deng R, et al. A DCT-spread FOFDM signal with low PAPR in W-band RoF system[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [3] Li X Y, Dong Z, Yu J J, et al. Performance improvement by pre-equalization in W-band (75-110 GHz) RoF system[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-3.
- [4] Zhao F, Li J L, Gong J M, et al. 80-GHz RoF based on push-pull modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-6.
- [5] Lopes V, Laurêncio P, Medeiros M C R, et al. W-band OFDM-RoF system employing optical up-conversion[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 6-10, 2014, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [6] Wang K H, Li X Y, Kong M, et al. Probabilistically shaped 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system in a photonics-aided wireless terahertz-wave system [C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [7] Shen S Y, Zhou Q, Chen Y W, et al. Hybrid W-band/baseband transmission for fixed-mobile convergence supported by heterodyne detection with data-carrying local oscillator[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [8] Latunde A T, Milosavljevic M, Kourtessis P, et al. OQAM-OFDM RoF with IM-DD remote heterodyne 28 GHz upconversion for 5G millimeter RANs [C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 10-14, 2016, Trento, Italy. New York: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [9] Wang D F, Tang X F, Xi L X, et al. Orthogonal frequency division multiplexing vector millimeter-wave generation based on two parallel phase modulators[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806006
王东飞, 唐先锋, 席丽霞, 等. 基于两个并行相位调制器的正交频分复用矢量毫米波产生[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806006.
- [10] Zhang Y M, Chen L, Cao Z Z, et al. Experimental research about a full-duplex OFDM-ROF system based on intensity modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1744-1749.
张益民, 陈林, 曹子峥, 等. 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1744-1749.
- [11] Dong Y X, Jin W, Giddings R P, et al. Hybrid DFT-spread OFDM-digital filter multiple access PONs for converged 5G networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(7): 347-353.
- [12] Zhang K M, Wu X X, Zeng Y X, et al. 60 GHz optical millimeter wave OFDM-RoF system based on DFT spread spectrum [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(3): 36-39.
张凯明, 吴新星, 曾佑旭, 等. 基于 DFT 扩频的 60 GHz 光毫米波 OFDM-RoF 系统[J]. 光通信技术, 2019, 43(3): 36-39.
- [13] Ni W L, Zheng Y F, Feng C Y, et al. 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.
- 倪玮隆, 郑玉甫, 冯楚滢, 等. 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.
- [14] Wu X Q, Liu J F, Zeng X Y, et al. Timing synchronization algorithm for coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system based on pseudo noise sequence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0506001.
- 吴雪琪, 刘剑飞, 曾祥焯, 等. 基于伪随机噪声序列相干光正交频分复用系统的定时同步算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0506001.
- [15] Ding J J, Zhang J, Wei Y R, et al. Comparison of geometrically shaped 32-QAM and probabilistically shaped 32-QAM in a bandwidth-limited IM-DD system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4352-4358.
- [16] Iimori H, Stoica R A, de Abreu G T F, et al. Constellation shaping for rate maximization in AWGN channels with non-linear distortion [C] // 2017 IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), December 10-13, 2017, Curacao. New York: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [17] Skvortcov P, Phillips I, Forsyiaak W, et al. Nonlinearity tolerant LUT-based probabilistic shaping for extended-reach single-span links [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(16): 967-970.
- [18] Ren J, Liu B, Zhang L, et al. Nonuniform QAM GFDM RoF system based on probabilistic shaping with Huffman code [C] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Octpber 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [19] Yankov M P, Zibar D, Larsen K J, et al. Constellation shaping for fiber-optic channels with QAM and high spectral efficiency[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(23): 2407-2410.
- [20] Schmalen L. Probabilistic constellation shaping: challenges and opportunities for forward error correction [C] // 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.