

100-Gb/s 高速 PDM-CO-OFDM 系统峰值平均功率比抑制性能研究

童峥嵘 刘颖慧 曹晔

天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384

摘要 利用迭代部分传输序列(IPTS)限幅算法实现 100-Gb/s 高速偏振模复用相干光正交频分复用(PDM-CO-OFDM)系统峰值平均功率比(PAPR)抑制,并对其 PAPR、误码率(BER)及非线性性能进行了分析。仿真结果表明,与限幅算法相比,IPTS 限幅算法不仅可以进一步降低 PAPR,还可以减小光纤的非线性效应,从而提高系统 BER 性能。当互补累积分布函数(CCDF)等于 0.0001 时,IPTS 限幅算法的阈值比限幅算法的优化了 0.62 dB。与原始信号相比,IPTS 限幅算法的最大峰值功率降低了 2.63 dBm。相同条件下,IPTS 限幅算法在光信噪比(OSNR)为 12.28 dB 时,BER 即可达到 10^{-3} ,而限幅算法的最小 BER 仅为 1.55×10^{-3} 。当发射功率等于 -1 dBm 时,IPTS 限幅算法的 Q 值与限幅算法相比提高了 0.28 dB。

关键词 光通信;相干光正交频分复用;偏振模复用;峰值平均功率比;迭代部分传输序列;限幅

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0106002

Research on Peak-to-Average Power Ratio Reduction Performance for 100-Gb/s High-Speed PDM-CO-OFDM Systems

Tong Zhengrong Liu Yinghui Cao Ye

Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology,
Tianjin 300384, China

Abstract The iterative partial transmit sequence (IPTS) clipping algorithm is used to reduce the peak-to-average power ratio (PAPR) of 100-Gb/s high-speed polarization division multiplexing coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (PDM-CO-OFDM) system. PAPR, bit error rate (BER), and nonlinearity performance are analyzed. Simulation results demonstrate that the PAPR, BER, and nonlinearity performance of IPTS clipping algorithm are superior to those of clipping algorithm. At the complementary cumulative distribution function (CCDF) of 0.0001, the threshold value of IPTS clipping algorithm is optimized by 0.62 dB compared with clipping algorithm. Compared with original signal, the maximum peak power of IPTS clipping algorithm is reduced by 2.63 dBm. In the same conditions, the needed optical signal to noise ratio (OSNR) of IPTS clipping algorithm is 12.28 dB to reach the BER level of 10^{-3} . However, the minimum BER of clipping algorithm is only 1.55×10^{-3} . At the launch power of -1 dBm, the Q value of IPTS clipping algorithm is improved by 0.28 dB compared with clipping algorithm.

Key words optical communications; coherent optical orthogonal frequency division multiplexing; polarization division multiplexing; peak-to-average power ratio; iterative partial transmit sequence; clipping

OSIC codes 060.1660; 060.4510; 060.2430; 070.4340

1 引言

相干光正交频分复用(CO-OFDM)是一种结合了相干光检测和正交频分复用(OFDM)的新型多载波调

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-08-29

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014201)、天津市自然科学基金(13QNJC01800)

作者简介: 童峥嵘(1971—),女,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: zhrong@sohu.com

制技术,具有频谱效率高、接收机灵敏度高、抗色散能力强、易与波分复用(WDM)系统兼容等优点^[1-2]。偏振模复用(PDM)是光纤通信中的一种复用技术,可以理解为光信道中的多输入多输出(MIMO)模型。将PDM与CO-OFDM技术结合可以在不增加信号带宽的条件下,使系统的传输速率提高两倍^[3-4]。由于这些显著优势,偏振模复用相干光正交频分复用(PDM-CO-OFDM)技术成为未来实现高速率、大容量、远距离光纤传输的重要解决方案,因此得到了广泛研究,并取得了一些成果^[5-7]。

较高的峰值平均功率比(PAPR, R_{PAP})是PDM-CO-OFDM系统的主要缺点之一。高PAPR不仅会影响光纤非线性,还要求一些非线性器件具有较大的线性范围,增加了系统成本和复杂度^[8]。因此,如何有效抑制系统的PAPR是PDM-CO-OFDM技术实用化的关键。比较成熟的PAPR抑制算法主要分为三类^[9-10]:预畸变类技术^[11]、编码类技术^[12]及概率类技术。目前国内外的相关研究主要是针对传统算法的缺点进行改进^[13-14],或者将两种算法结合^[15-16]。文献[14]提出了一种基于判决矩阵的新型边带信息检测方法,降低了选择映射(SLM)算法的计算复杂度。文献[16]将部分传输序列(PTS)算法与交织技术结合降低了OFDM系统的PAPR。本文通过在限幅算法之前加入PTS算法的改进形式迭代PTS(IPTS)算法,实现100-Gb/s高速PDM-CO-OFDM系统PAPR有效抑制的同时,降低了限幅算法产生的不良影响,提高系统传输性能。

2 IPTS限幅算法

IPTS限幅算法是传统PTS算法的改进形式IPTS算法与限幅算法的级联。由于限幅算法属于非线性运算,会引入限幅噪声,增大系统误码率(BER)^[17]。IPTS算法可以减小限幅算法中峰值超过门限值信号出现的概率,从而降低限幅产生的不良影响,提高系统BER性能。此外,与单一算法相比,级联后的IPTS限幅算法可以获得更好的PAPR抑制性能。

图1是在子载波数为128,限幅率(CR)为4 dB,子序列个数 V 为4,相邻分割,二进制正交振幅键控(4-QAM)调制条件下得到的不同算法的互补累积分布函数(CCDF, F_{CCDF})曲线对比图。由图可以看出,IPTS限幅算法的PAPR抑制效果最好。在CCDF等于0.0001时,IPTS限幅算法的PAPR为5.27 dB,与原始信号,加IPTS、PTS、限幅、及限幅IPTS算法后信号的PAPR相比分别优化了6.12、3.44、3.05、0.62、0.21 dB。其中,限幅IPTS算法与IPTS限幅算法的级联顺序相反,可以看出,加IPTS后限幅算法的级联方式能更好地降低系统的PAPR。

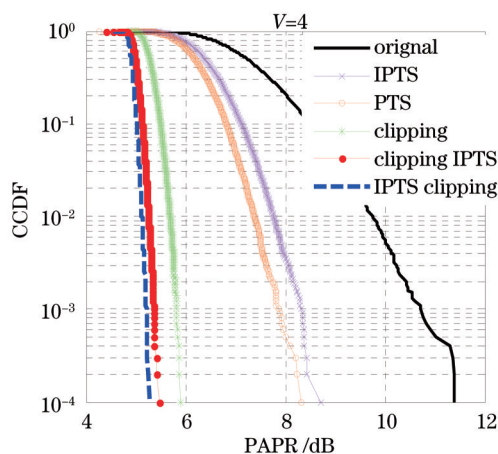


图1 不同算法的CCDF曲线

Fig.1 CCDF curves of different algorithms

3 100-Gb/s 高速PDM-CO-OFDM系统基本原理

图2为100-Gb/s PDM-CO-OFDM系统结构图。两路50 Gb/s射频OFDM信号由Matlab软件生成。子载波总数为256,循环前缀长度为32,数据子载波为128,用于相位估计的导频子载波数为5,OFDM符号数为200,调制方式为四相相移键控(QPSK)。光源经过偏振分束器(PBS)后分为X偏振和Y偏振方向,分别与两路基带信号经过光调制器进行调制,实现电光上变频转换,形成CO-OFDM信号。随后经过偏振合束器(PBC)

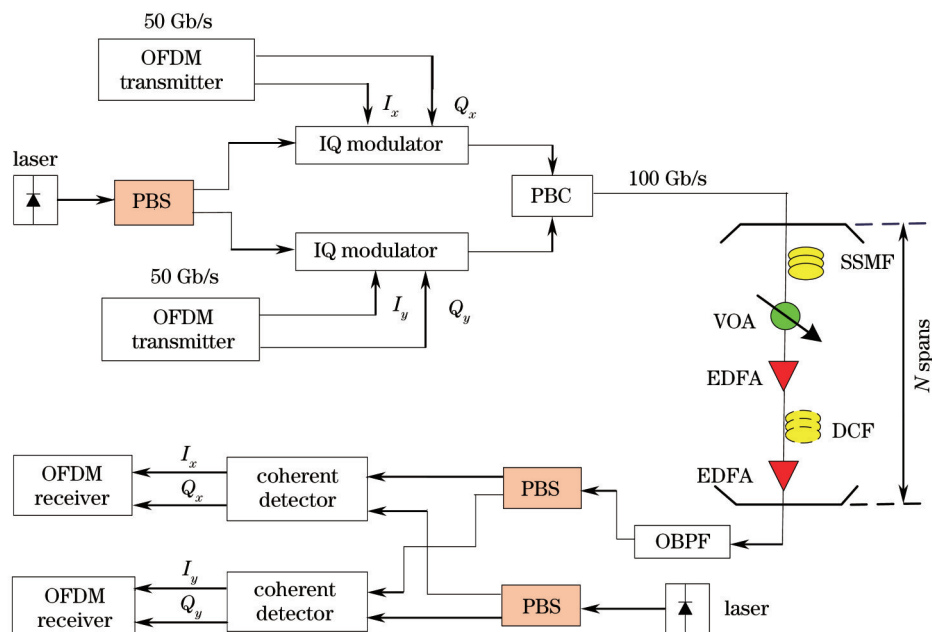


图2 100-Gb/s PDM-CO-OFDM 系统结构图

Fig.2 Structure diagram of 100-Gb/s PDM-CO-OFDM system

合为一路光信号,传输速率变为 100 Gb/s。

光纤链路主要由标准单模光纤(SSMF)、可变光衰减器(VOA)、掺铒光纤放大器(EDFA)、以及色散补偿光纤(DCF)组成, N 为环数。EDFA用于补偿传输中的系统损耗,VOA用于控制光功率,DCF用于对色散进行补偿,提高系统传输性能。在接收端,经过光纤传输后的信号首先通过PBS解偏振复用,然后进行相干检测得到基带电信号,最后导入 Matlab 里进行离线处理。主要包括:用Schmidl算法进行快速傅里叶变换(FFT)窗口同步,用最小二乘(LS)算法进行信道估计,用已知的导频数据进行相位估计,本文不考虑频偏。

4 仿真结果及性能分析

本文利用 Optisystem 软件搭建了 100-Gb/s PDM-CO-OFDM 仿真系统,其主要参数设置如下:采用连续波激光器作为光源,发射功率为 -1 dBm,光载波频率为 193.1 THz,线宽为 100 kHz;EDFA的噪声系数为 4 dB;高斯光带通滤波器(OBPF)的频率为 193.1 THz,带宽为 50 GHz,阶数为 4 ;SSMF和DCF的主要参数如表1所示。

表1 SSMF和DCF的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SSMF and DCF

Parameter	SSMF	DCF
Length / km	120	20
Loss / (dB/km)	0.2	0.4
Dispersion coefficient / [ps/(nm/km)]	16	-80
Dispersion slope / [ps/(nm ² /km)]	0.08	-0.45
Effective area / μm^2	80	30
Nonlinearity coefficient/ (m^2/W)	2.6×10^{-20}	2.6×10^{-20}
Polarization mode dispersion / (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	0.5	0.5

图3为原始信号和加 IPTS 限幅算法后信号经过 IQ 调制器得到的功率随时间的变化图。为便于观察,统一设定横坐标的范围为 $100\sim 900$ ns,纵坐标的范围为 -16 dBm ~ -2 dBm。IPTS 限幅算法的峰值功率为 -5.87 dBm,比原始信号的峰值功率小 2.63 dBm,且边缘部分更加整齐,说明 IPTS 限幅算法可以有效降低 PDM-CO-OFDM 信号的 PAPR。

图4为原始信号传输 560 km 后, X 偏振方向和 Y 偏振方向的 BER 曲线及星座图。由图4(a)可以看出,两个偏振方向上的信号均能被成功恢复,但由于导入 X 偏振方向和 Y 偏振方向的射频 OFDM 信号不同造成其 BER

存在一定的差异。图 4 (b)和图 4 (c)是在光信噪比(OSNR)等于 12.32 dB时,经过信道均衡和相位估计后得到的星座图,虽然由于相位噪声和子载波间干扰等原因使其相位发生偏移,幅度产生失真,但不影响数据进行正确解调。

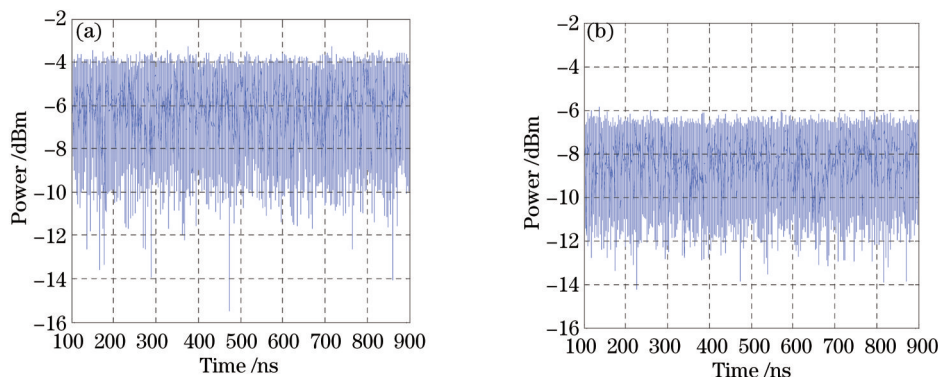


图 3 光域信号功率对比图。(a)原始信号;(b)加 IPTS 限幅算法

Fig.3 Comparison figures of signal power in optical domain. (a) Original signal; (b) with IPTS clipping algorithm

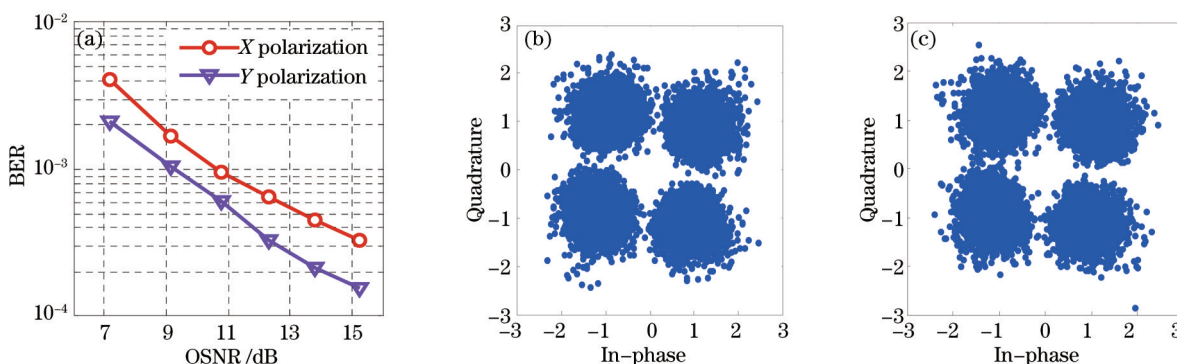


图 4 原始信号传输 560 km 后得到的 X 偏振和 Y 偏振方向 BER 性能及星座图对比。(a)BER 与 OSNR 的关系;(b) X 偏振方向星座图;(c) Y 偏振方向星座图

Fig.4 Comparison of BER performance and constellation in X polarization and Y polarization directions after original signals are transmitted 560 km. (a) BER as a function of OSNR; (b) constellation in X polarization direction; (c) constellation in Y polarization direction

图 5 为原始信号在不同传输距离条件下的系统 BER 和 Q 因子对比图,仿真结果为 X 偏振和 Y 偏振方向测得数据的平均值。由图 5 (a)可以看出,传输距离越短,BER 性能越好。BER 随着 OSNR 的增大而减小,但是减小到一定值时,开始变大。因为入纤光功率的提高在增大 OSNR 的同时,也会使光纤的非线性效应增强,进而增大系统 BER。在 BER 等于 10^{-3} 时,传输距离为 560 km 和 700 km 所需的 OSNR 分别为 10.07 dB 和 13.62 dB。然而,当传输距离为 840 km 时,系统的 BER 所能达到的最小值仅为 2.48×10^{-3} ,所需的 OSNR 却

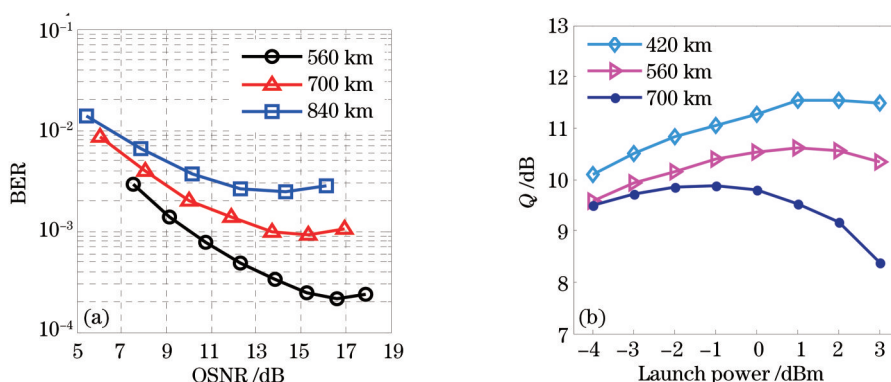


图 5 原始信号在不同传输距离下的系统性能对比。(a) BER 与 OSNR 的关系;(b) Q 因子与发射功率的关系

Fig.5 Comparison of system performance of original signal at different transmission distances. (a) BER as a function of OSNR; (b) Q-factor as a function of launch power

为 14.29 dB。由图 5 (b) 则可以看出, 传输距离越大, 非线性性能越差。传输距离为 420 km 和 560 km 的最优输入功率均为 1 dBm, 传输距离为 700 km 时的最优输入功率为 -1 dBm。当输入功率超过最优值时, 由于光纤非线性的增大导致系统性能下降, Q 值减小。

图 6 为不同算法经过 560 km 光纤传输后得到的系统 BER 和 Q 因子对比图, 其中, IPTS 限幅算法和限幅算法的限幅率均为 3 dB。由图 6 (a) 可以看出, 虽然限幅算法可以降低系统 PAPR, 但是会增大 BER; 而 IPTS 限幅算法与限幅算法相比可以明显提高系统 BER 性能。在 BER 等于 10^{-3} 时, 原始信号和加 IPTS 限幅算法后信号的 OSNR 分别为 10.07 dB 和 12.28 dB, 而加限幅算法后信号的最小 BER 为 1.55×10^{-3} 。在 OSNR 等于 13 dB 时, 限幅算法的 BER 为 1.68×10^{-3} , 而 IPTS 限幅算法的 BER 减小为 9.19×10^{-4} 。由图 6 (b) 可以看出, 虽然 IPTS 限幅算法和限幅算法的最优输入功率均为 -1 dBm, 但是 IPTS 限幅算法的非线性性能更好些。在发射功率等于 -1 dBm 时, 它们的 Q 值分别为 9.31 dB 和 9.59 dB。

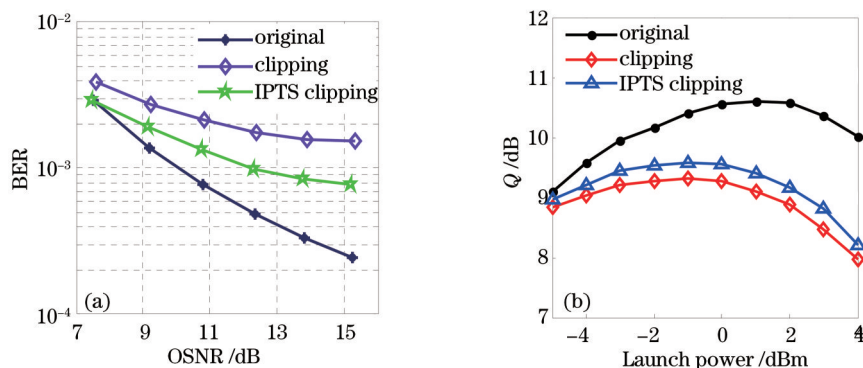


图 6 不同算法在限幅率为 3 dB 经过 560 km 光纤传输后的系统性能对比。(a) BER 与 OSNR 的关系; (b) Q 因子与发射功率的关系

Fig.6 Comparison of system performances of different algorithms after the fiber with distance of 560 km when CR is 3 dB. (a) BER as a function of OSNR; (b) Q -factor as a function of launch power

4 结 论

利用 Optisystem 软件搭建了 100-Gb/s 高速 PDM-CO-OFDM 系统, 并运用 IPTS 限幅算法对其 PAPR 进行抑制。与限幅算法相比, IPTS 限幅算法不仅可以获得更好的 PAPR 抑制效果, 而且由于 IPTS 算法可以降低限幅算法产生的不良影响, 级联后的 IPTS 限幅算法具有更优的系统 BER 和非线性性能。相同条件下, 与限幅算法相比, IPTS 限幅算法的 PAPR 优化了 0.62 dB; 与原始信号相比, IPTS 限幅算法的最大峰值功率下降了 2.63 dBm。在 OSNR 和发射功率等于 13 dB 和 -1 dBm 时, IPTS 限幅算法的 BER 和 Q 因子与限幅算法相比分别优化了 7.61×10^{-4} 和 0.28 dB。实验仿真结果充分说明了在限幅算法之前加入 IPTS 算法具有可行性, 可以提高系统的传输性能。

参 考 文 献

- 1 William Shieh, Xingwen Yi, Yiran Ma, *et al.*. Coherent optical OFDM: Has its time come?[J]. Journal of Optical Networking, 2008, 7 (3): 234-255.
- 2 Khaled Alatawi, Fahad Almasoudi, Mohammad A Matin. Performance study of 1 Tbits/s WDM coherent optical OFDM system [J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(5): 330-335.
- 3 Chun J Youn, Xiang Liu, S Chandrasekhar, *et al.*. Channel estimation and synchronization for polarization-division multiplexed CO-OFDM using subcarrier/polarization interleaved training symbols [J]. Opt Express, 2011, 19(17): 16174-16181.
- 4 Linglong Dai, Chao Zhang, Zhengyuan Xu, *et al.*. Spectrum-efficient coherent optical OFDM for transport networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(1): 62-74.
- 5 Xiang Liu, Fred Buchali. Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM [J]. Opt Express, 2008, 16(26): 21944-21957.
- 6 Xuejun Liu, Yaojun Qiao, Yuefeng Ji. Electronic compensator for 100-Gb/s PDM-CO-OFDM long-haul transmission systems [J].

- Chin Opt Lett, 2011, 9(3): 030602.
- 7 Xi Fang, Chuanchuan Yang, Fan Zhang. Time-domain maximum-likelihood channel estimation for PDM CO-OFDM systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(6): 619-622.
- 8 Li Yongzhi, Xiao Jiangnan, Chen Ming, *et al.*. Experiment for orthogonal frequency division multiplexing system peak to average power ratio reduction with a new scheme using dummy subcarriers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706020.
李勇志, 肖江南, 陈 明, 等. 基于虚拟子载波降低光正交频分复用信号峰均功率比新方法的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706020.
- 9 Tao Jiang, Yiyang Wu. An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(2): 257-268.
- 10 V Vijayarangan, DR (MRS) R Sukanesh. An overview of techniques for reducing peak to average power ratio and its selection criteria for orthogonal frequency division multiplexing radio systems [J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2009, 5(1): 25-36.
- 11 Chen Hongxian, Chen Lin, Yu Jianjun, *et al.*. Experimental investigation for 60 GHz ratio-over-fiber system employing orthogonal frequency-division multiplexing format based on companding transform [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306002.
陈虹先, 陈 林, 余建军, 等. 基于压扩变换的 60 GHz 正交频分复用光载无线通信系统实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306002.
- 12 Wang Yanjin, Shao Yufeng, Chi Nan. Application of peak-to-average power ratio reduction algorithm using precoding technique in 60 GHz orthogonal frequency-division multiplexing ratio-over-fiber system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706018.
王燕瑾, 邵宇丰, 迟 楠. 预编码峰均比抑制算法在 60 GHz 正交频分复用光载无线通信系统中的应用[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706018.
- 13 Young-Jeon Cho, Jong-Seon No, Dong-Joon Shin. A new low-complexity PTS scheme based on successive local search using sequences [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1470-1473.
- 14 Eonpyo Hong, Hyunju Kim, Kyeongcheol Yang, *et al.*. Pilot-aided side information detection in SLM-based OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3140-3147.
- 15 Tao Jiang, Chunxing Ni, Chang Xu, *et al.*. Curve fitting based tone reservation method with low complexity for PAPR reduction in OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(5): 805-808.
- 16 Pandurangan, Mukunthan, Erumal Dananjayan. Modified PTS with interleaving for PAPR reduction of OFDM signal with QPSK subblocks [J]. International Journal of Future Computer and Communication, 2014, 3(1): 22-25.
- 17 Seung Hee Han, Jae Hong Lee. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(2): 56-65.

栏目编辑: 王晓琰