

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

陈虹先^{1,2} 陈 林^{1,2} 余建军^{1,2} 肖江南^{1,2} 曹子崴^{1,2} 李 凡^{1,2}

(¹ 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082

² 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 提出并实验研究了在 60 GHz 正交频分复用(OFDM)-光载无线通信(ROF)系统中采用压扩变换技术降低 OFDM 信号峰值平均功率比(PAPR),并提高系统的接收灵敏度。实验结果表明,携带基于压扩变换的 2.5 Gb/s 60 GHz 的 OFDM-ROF 信号经标准单模光纤传输 50 km 后,在无色散补偿和误码率为 10^{-3} 的条件下,当入纤功率为 12 dBm 时,系统接收灵敏度提高约 2.3 dB,并且当互补累积分布函数(CCDF)为 10^{-4} 时,OFDM 信号的 PAPR 下降约 3 dB。

关键词 光通信;正交频分复用-光载无线通信系统;压扩变换;峰值平均功率比

中图分类号 TN929.9 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0306002

Experimental Investigation for 60 GHz Radio-Over-Fiber System Employing Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Format Based on Companding Transform

Chen Hongxian^{1,2} Chen Lin^{1,2} Yu Jianjun^{1,2} Xiao Jiangnan^{1,2} Cao Zizheng^{1,2} Li Fan^{1,2}

(¹ School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)
(² Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices Ministry of Education, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract A 60 GHz orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) radio-over-fiber (ROF) system based on companding transform technique is proposed and experimentally demonstrated to reduce the peak-to-average power ratio (PAPR) of OFDM signals and improve the sensitivity of the receiver. The 2.5 Gb/s 60 GHz OFDM-ROF signals based on companding transform is transmitted over 50-km standard single-mode fiber in the system. The experimental results show that the PAPR of the OFDM signal is decreased by 3 dB at complementary cumulative distribution function (CCDF) level of 10^{-4} , and the receiver sensitivity is improved by 2.3 dB for launch power of 12 dBm at the BER of 10^{-3} and without dispersion compensation.

Key words optical communication; orthogonal frequency-division multiplexing-radio-over-fiber system; companding transform; peak-to-average power ratio

OCIS codes 060.2330; 060.0060; 190.4360

1 引 言

随着高清(HD)电视技术和网络电视(IPTV)技

术等的快速发展,人们对无线通信技术数据处理速度和信号带宽提出了更高要求。由于现有频率带宽

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-19

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z220, 2009AA01Z222)和国家自然科学基金(60977049)资助课题。

作者简介: 陈虹先(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤无线通信技术和光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: xianhongchen1000@yahoo.com.cn

导师简介: 陈 林(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤无线通信技术、光正交频分复用和光标记交换等方面的研究。E-mail: lilichen12@vip.163.com(通信联系人)

的有限性和拥塞,无线通信速率被局限于几十兆比特每秒,因此将通信波段延伸到毫米波段成为无线通信网络发展的必然趋势,其中 60 GHz 波段因提供了 7 GHz 无授权频谱(57~64 GHz)而倍受关注^[1,2]。但是毫米波易受大气损耗、射程短和有限覆盖面积等因素的影响。光纤具有带宽宽和传输损耗低的特性,因此结合二者优点的光载无线通信(ROF)技术成为实现构建高速率、高覆盖率和强灵活性的通信系统和网络的一个重要解决方法。

正交频分复用(OFDM)技术最早由 Jolley 等^[3]提出,由于其具有抗符号间干扰、抗多径衰落、频谱利用率高、抗光纤色度色散和偏振模色散(PMD)等优点,在大容量长距离光通信中得到广泛研究,成为目前解决 ROF 系统长距离传输的最佳解决方案^[4~6]。但 OFDM 信号存在信号峰值平均功率比(PAPR)高的问题,从而导致对放大器、调制器、数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC)等光电器件的线性范围以及光纤本身的非线性效应有所影响^[7,8],许多学者对如何降低 OFDM 信号 PAPR 进行了研究^[9~16]。其中压扩变换技术由于实现简单、计算复杂度低、效果较显著以及无需多余硬件设备而受到广泛关注^[10~16],Wang 等^[10]提出将小信号变大,大信号保持不变的 μ 律压扩法;Jiang 等^[12]提出将信号变成近似正态分布的指数压扩法;Jiang 等^[13]提出基于误差函数的误差函数压扩法;Hou

等^[14]提出发射端压缩处理,接收端不扩展的非线性压扩法。结合光通信,要求实现简单、复杂度低、时延小和信息速率高的信号处理技术的特点,本文采用压缩扩展变换降低 OFDM 信号 PAPR。

在 60 GHz 的光载毫米波 OFDM 系统中,由于受到色散及非线性效应的影响,光纤传输距离受到限制,本课题组前期的实验表明在没有采用降低 PAPR 措施的情况下,60 GHz OFDM-ROF 信号成功传输 20 km^[17]。本文提出并实验研究了在 60 GHz OFDM-ROF 系统中引入压扩变换降低 OFDM 的 PAPR,提高入纤功率,降低 PAPR,提高的系统灵敏度和传输距离。在中心站(CO),通过结合单臂马赫-曾德尔强度调制器(MZM-IM)和光纤布拉格光栅(FBG)产生 58 GHz 光载毫米波信号,经过压扩变换后的 2.5 Gb/s 正交相移键控(QPSK) OFDM 信号通过强度调制器(IM)加载到光载波上,经标准单模光纤(SSMF)传输至基站(BS),在 BS 中通过改变 OFDM 毫米波接收功率,测得 OFDM 信号的误码率(BER)曲线图和星座图。

2 系统原理和理论分析

2.1 系统原理

基于压扩变换技术的 60 GHz OFDM-ROF 系统原理图如图1所示。以分布式反馈激光器(DFB-LD)

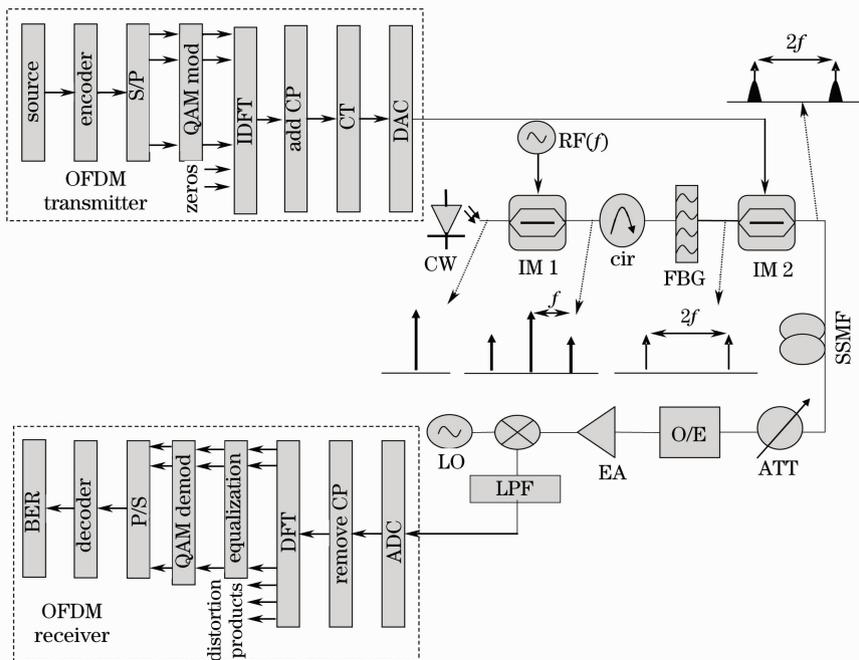


图 1 基于压扩变换的 60 GHz OFDM-ROF 系统原理图

Fig. 1 Schematic of the 60 GHz OFDM-RoF system based on companding transform

产生连续波(CW)激光作为光载波,频率为 $f = 29$ GHz的射频信(RF)号驱动强度调制器 1(IM 1),合理设置调制器的偏置电压以实现双边带(DSB)调制方式,由于光能量主要集中在中心载波和一阶边带上,可忽略高阶边带的影响。光信号经过一个 FBG 滤除中心载波实现载波抑制调制,形成频率间隔为 $2f$ 的光载毫米波。OFDM 信号经过强度调制器 2(IM 2)调制至光载波上,产生携带 OFDM 信号的 58 GHz 光毫米波信号。毫米波经过 SSMF 传输送到 BS 后,通过光电转换后与 58 GHz 的本地 RF (LO)信号混频下变换为基带 OFDM 信号,然后经低通滤波器(LPF)后再离线完成对基带 OFDM 信号的解调。

经过压扩变换后的 OFDM 信号源产生过程如图 1 中 OFDM 信号发送端所示,二进制比特流经过编码、串/并(S/P)变换和多进制正交振幅调制(QAM)成为符号帧,再在各个符号中加入导频,并在高频部分插零作为保护间隔(GI),经过离散傅里叶变换(IDFT)产生多正交子载波波形。其中 IDFT 面向共轭对称的信号进行,IDFT 之后的信号只存在实部,将 OFDM 两路同相/正交(I/Q)信号转变成一路信号。再在基本波形的前端加入波形本身的一部分作为循环前缀(CP),用来克服信号的传输时延,这样就形成了 OFDM 数据信号。然后,对 OFDM 信号整体进行压缩变换和数模转换后,即成为系统所需的 OFDM 信号。在 OFDM 信号接收端,除压缩变换不需要解压缩以外,其他都进行相应的逆变换,即完成了对 OFDM 信号的解调。

2.2 理论分析

设 OFDM 信号的表达式为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d_n \exp\left(j2\pi \frac{nt}{N}\right),$$

式中 $n = 0, 1, \dots, N-1, N$ 为子载波数, d_n 为调制到第 n 个子载波上的序列符号,信号的峰值平均功率比(PAPR)可表示为

$$S_{\text{PAPR}} = 10 \lg \left\{ \frac{\max |s(n)|^2}{\mathbb{E}[|s(n)|^2]} \right\}.$$

在分析过程中,采用 S_{PAPR} 的互补累积分布函数(CCDF)来描述 OFDM 信号的峰值统计分布特性,表达式为

$$P\{S_{\text{PAPR}} > p\} = 1 - P\{S_{\text{PAPR}} \leq p\} = 1 - (1 - e^{-p})^N. \quad (1)$$

μ 律压扩算法是在发送端按 μ 律公式对 OFDM 信号进行压缩,在接收端进行相应的解压缩过程。

由于 μ 律压缩是将小信号幅度放大,大信号幅度保持不变,因此信号的平均功率被提升。为了保持信号平均功率基本不变,在 μ 律压缩之后再对信号幅度进行线性压缩处理。OFDM 信号 $s(t)$ 经过传统 μ 律压缩后表达式为^[10]

$$s'(t) = C[s(t)] = \frac{\text{Asgn } s(t) \ln[1 + \mu |s(t)/A|]}{\ln(1 + \mu)}, \quad (2)$$

式中 μ 为压扩系数, A 为信号的最大幅值。由文献[15]可知,OFDM 信号幅值小于 $A/10$ 的概率大约为 94%,即绝大多数情况下 $\frac{s(t)}{A} < 0.1$ 。当 μ 不是很大时, $\mu s(t)/A$ 很小,由泰勒级数定理可知 $s'(t) \approx$

$s(t) \frac{\mu}{\ln(1 + \mu)}$,压缩变换后信号平均功率有所提高,为了使信号平均功率保持基本不变,在发射端乘以系数 $K = \frac{\ln(1 + \mu)}{\mu}$,则发射端信号表达式为^[11]

$$s''(t) = C'(x) = \frac{\text{Asgn } s(t) \ln[1 + \mu |s(t)/A|]}{\mu}. \quad (3)$$

压扩变换后产生的 OFDM 信号 $s''(t)$ 通过 MZM-IM2 加载到实现了光载波抑制(OCS)调制的光载波上,从 MZM-IM2 输出的光信号表达式为^[18]

$$E'_{\text{out2}}(t) = s''(t) [E_0 J_1(b) \cos(\omega_0 + \omega_{\text{RF}})t + E_0 J_1(b) \cos(\omega_0 - \omega_{\text{RF}})t], \quad (4)$$

式中 E_0 和 ω_0 分别为 CW 所产生的光信号的幅度和角频率, ω_{RF} 为 RF 信号的角频率, $J_1(b)$ 为第一类 1 阶贝塞尔函数。

图 2 为不同 μ 值情况下 μ 律压缩函数 $C'(x)$ 曲线图,其中函数 $y = x$ 用于对比。由图可知,按照(3)式的 μ 律公式压缩后,由于信号幅度绝大多数集中在 $-0.1 \sim 0.1$ 之间,OFDM 信号平均功率基本不变,而 OFDM 信号的峰值被大大降低,则信号 PAPR 被降低; μ 值越大,压缩后的最大值 A' 越小, PAPR 的降低度越大; μ 取 2, 4 和 6 时,压缩后的最大值分别约为 $0.55A, 0.4A$ 和 $0.33A$,随着 μ 值的增大, PAPR 降低的幅度逐步减小。又由于 μ 值过大时,OFDM 信号会引起较大失真而影响系统误码率(BER)性能。因此 μ 值过小, PAPR 变化不大, μ 值过大,信号失真过大易导致 BER 性能下降,权衡 PAPR 的降低度和信号失真情况,选择合适的压扩系数 μ ,结合文献[16]中对压扩系数选择的研究,当 μ 值取 1~3 时,对 OFDM 系统 BER 影响较平缓,因此选择 $\mu = 2$ 的情况进行实验研究。

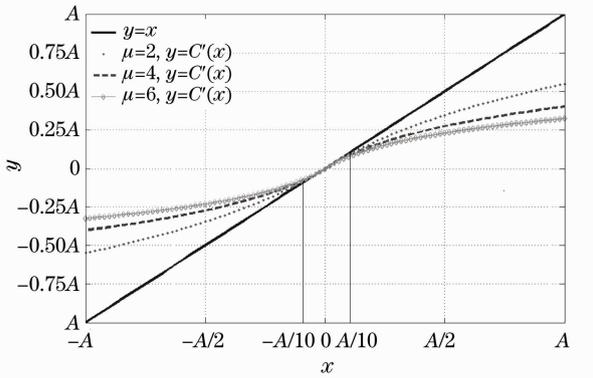


图 2 μ 律压缩公式 $C'(x)$ 图

Fig. 2 Diagram of μ law companding formula $C'(x)$

根据文献[14]对无扩展的非线性压扩方法的分析,由于扩展噪声较大,接收端不进行扩展变换,同样能得到较好的误码性能。因此结合传统 μ 律压缩和接收端无扩展的非线性压缩法对 60 GHz OFDM-ROF 系统的性能进行了研究。

3 实验装置和结果

3.1 实验装置

系统实验装置及各点光谱示意图如图 3 所示。实验装置包括中心站(CO)、光纤和基站(BS)三个模块。在 CO,DFB-LD 产生功率为 7 dBm 波长为

1543.65 nm 光载波,HP Agilent E8257D 模拟信号发生器产生功率为 16 dBm 的 14.5 GHz 正弦波信号,通过电放大器(EA)放大后经过一个 1×2 倍频器产生 29 GHz 电 RF 信号,该 RF 信号驱动 3 dB 带宽大于 20 GHz,消光比大于 25 dB 的 IM 1,设置调制器的直流偏置电压 $V_{bias} = 2.9$ V 实现 DSB 调制,其光谱图如图 3(b)所示。产生的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大和环形器(cir)后,经 FBG 滤除中心载波,其中环形器用于防止滤除的光信号返回激光器,由于其他高阶边带功率很小可以忽略其对系统的影响,只需要考虑一阶边带,这样得到频率间隔为 0.47 nm 的 58 GHz 光毫米波,其光谱图如图 3(c)所示。光毫米波经过一个 EDFA 进行功率补偿后,进入一个低速的 IM 2 调制器,设置调制器的直流偏置电压为 6.8 V,峰峰值电压 $V_{pp} = 2$ V。由任意波形发生器产生的 2.5 Gb/s 的 OFDM 信号经过 IM 2 强度调制至光毫米波上,其光谱图如图 3(d)所示。其中 OFDM 信号源由 Matlab 软件编程产生,比特率为 1.25 Gb/s,调制格式为 QPSK,每帧由 256 个子载波组成,其中 192 个子载波传输数据信息,8 个子载波作为导频用于信号相移的跟踪,剩余的 56 个子载波被置零作为频域 GI。

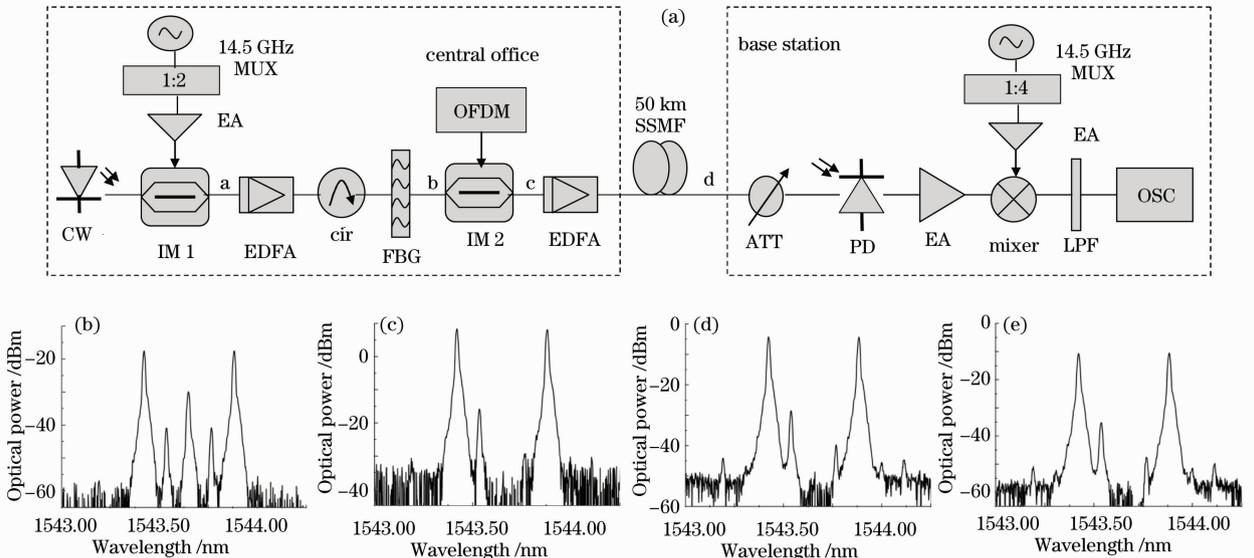


图 3 60 GHz OFDM-ROF 通信系统(a)实验装置图,(b)DSB 后的光谱,(c)经 FBG 滤除中心载波后的光谱,(d)OFDM 毫米波光谱图,(e)50 km SSMF 传输后 OFDM 毫米波光谱图

Fig. 3 (a) Experimental setup for the 60 GHz OFDM-ROF system, (b) optical spectra after DSB modulation, (c) spectra in which the central carrier is filtered out by FBG, (d) spectra of OFDM millimetre-wave and (e) that after 50 km SSMF transmission

携带 OFDM 信号的光毫米波经 EDFA 放大保持入纤功率为 12 dBm, 然后经 50 km SSMF 传输后到达 BS 中, 光纤色散系数是 $17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 损耗系数是 $0.19 \text{ dB}/\text{km}$, 其光谱图如图 3(e) 所示。在 BS 中, 光毫米波信号首先经 3 dB 带宽为 60 GHz 的高速光电检测器 (PD) 转变成电毫米波信号, 再经过 3 dB 带宽为 10 GHz 的 EA, 与 58 GHz 的 LO 信号经过混频器下变频产生基带 OFDM 信号, 其中 58 GHz 的 LO 信号由 14.5 GHz 正弦波信号经过 1×4 倍频器后产生得到。生成的基带 OFDM 信号经过一个 7.5 GHz LPF 滤除多余的带外噪声, 再送到 Tektronix TDS6804B 实时数字示波器以 10 GS/s 进行采样, 最后使用离线 Matlab 程序进行解调和分析。

3.2 实验结果

实验研究了引入压扩变换的 60 GHz OFDM-ROF 系统性能。图 4 为 Matlab 软件计算得到的发送端压扩变换前后 OFDM 信号的 CCDF 曲线图, 由图可知通过引入压扩变换后, 当 CCDF 为 10^{-4} 时 OFDM 信号的 PAPR 下降了约 3 dB。图 5 为原始 OFDM 信号和压扩 OFDM 信号经背靠背 (BTB) 和 50 km SSMF 传输后不同光接收功率下的误码曲线和星座图, 其中星座图是光接收功率为 -24, -21 和 -19 dBm 时的情况。由图可知, 随着光接收功率

的增加, BER 逐渐减小, 星座图逐渐集中, 而且压扩变化后信号星座图更集中。图 5(a) 显示在 BTB 传输情况下, BER 为 10^{-3} 时, 压扩变换后系统接收灵敏度提高约 1.7 dB; 图 5(b) 显示经过 50 km SSMF 传输, BER 为 10^{-3} 时, 压扩变换后系统接收灵敏度提高约 2.3 dB。实验结果表明, 引入压扩变换, 能较好地提升系统误码性能和接收灵敏度。这是因为当入纤功率较大时, 光纤非线性效应成为影响系统性能的一个重要因素, 通过降低 OFDM 信号的 PAPR, 不仅能减小 ADC, DAC, 放大器和 MZM-IM 等光电设备的非线性影响, 而且能较好地抵抗光纤非线性效应, 从而提高传输系统的整体性能。

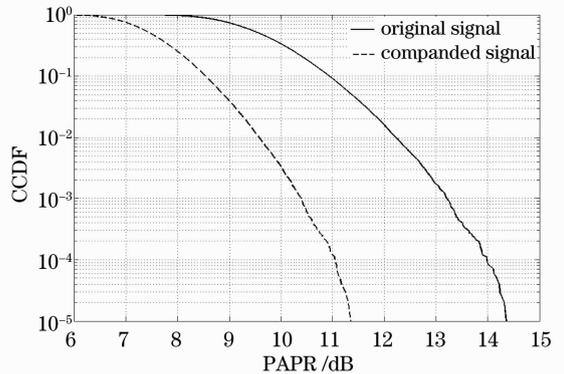


图 4 OFDM 信号 PAPR 的 CCDF 曲线

Fig. 4 CCDF curves of the PAPR for OFDM signal

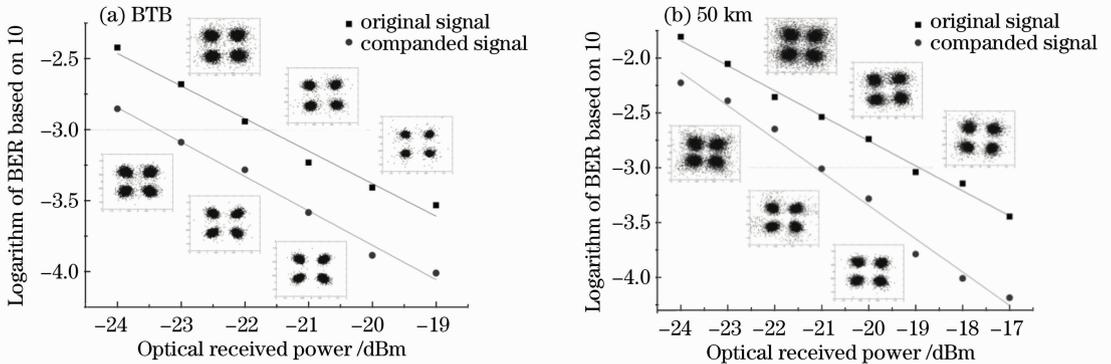


图 5 原始信号和压扩信号的误码曲线及星座图

Fig. 5 BER curves and constellation figures for OFDM original signal and companded signal

4 结 论

提出了一种在 60 GHz OFDM-ROF 系统中引入压扩变换技术处理 OFDM 信号, 降低 OFDM 信号 PAPR 并提高系统整体误码性能的方案。实验结果表明, 当入纤功率为 12 dBm 时, 在无色散补偿和 BER 为 10^{-3} 条件下, 2.5 Gb/s OFDM 信号经过 50 km SSMF 的传输, 通过引入压扩变换技术, 当 CCDF 为 10^{-4} 时 OFDM 信号 PAPR 降低约 3 dB,

系统的接收灵敏度提高约 2.3 dB, 而且星座图也更为紧凑。这是由于通过压扩变换技术降低了 OFDM 信号的 PAPR, 可减小 ADC, DAC, 放大器和 MZM-IM 等设备的非线性影响以及光纤传输中的非线性效应, 从而减小系统 BER, 达到对系统整体性能的提升。

参 考 文 献

- 1 Wang Jing, Cao Zizheng, Zhou Hui *et al.*. A wavelength division multiplexing radio-over-fiber system with 58 GHz optical orthogonal frequency division multiplexing millimeter-wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1274~1278
王 晶, 曹子峥, 周 慧等. 承载正交频分复用信号的 58 GHz 光载毫米波波分复用光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1274~1278
- 2 Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1018~1021
董 泽, 曹子峥, 陈 林等. 基于 60 GHz 光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1018~1021
- 3 N. E. Jolley, H. Kee, R. Rickard *et al.*. Generation and propagation of a 1550 nm 10 Gb/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1000 m of multimode fibre using a directly modulated DFB [C]. Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, 2005, OFP3
- 4 Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1586~1591
夏敏敏, 董 泽, 曹子峥等. 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1586~1591
- 5 J. Armstrong. OFDM for optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(3): 189~204
- 6 L. Chen, J. G. Yu, S. Wen. A novel scheme for seamless integration of ROF with centralized lightwave OFDM-WDM-PON System[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(14): 2786~2791
- 7 B. Krongold, Y. Tang, W. Shieh. Fiber nonlinearity mitigation by PAPR reduction in coherent optical OFDM systems via active constellation extension[C]. 34th European Conference on Optical Communication, 2008, P. 4. 13
- 8 Z. Huang, J. Li, S. Zhang *et al.*. Investigations of SPM suppression by PAPR reduction in coherent optical OFDM systems [C]. Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, China 2009, 1~2
- 9 J. Armstrong. Peak-to-average reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. *IEEE Electron Lett.*, 2002, **38**(5): 246~247
- 10 X. Wang, T. T. Tjhung, C. S. Ng. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique [J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 1999, **45**(3): 303~307
- 11 X. Wang, T. T. Tjhung, C. S. Ng. Reply to the comments on "Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique" [J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 1999, **45**(4): 420~422
- 12 T. Jiang, G. Zhu. Nonlinear companding transform for reducing peak-to-average power ratio of OFDM signals[J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 2004, **50**(3): 258~262
- 13 T. Jiang, Y. Yang, Y. Song. Exponential companding technique for PAPR reduction in OFDM systems [J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 2005, **51**(2): 244~248
- 14 J. Hou, J. Ge, D. Zhai *et al.*. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals with nonlinear companding scheme [J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 2010, **56**(2): 258~262
- 15 A. Mattsson, G. Mendenhall, T. D. Harris. "Comments on: "Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique" [J]. *IEEE Trans. Broadcasting*, 1999, **45**(4): 418~419
- 16 Huang Xiao, Lu Jianhua, Zheng Junli. Low complexity reduction of peak-to-average power ratio of OFDM signals [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(3): 1~4
黄 晓, 陆建华, 郑君里. 低复杂度 OFDM 信号峰均功率比压缩技术[J]. *电子学报*, 2003, **31**(3): 1~4
- 17 Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experiment on a full-duplex OFDM radio-over-fiber system with 60 GHz optical millimeter wave [J]. *J. Commun.*, 2011, **32**(2): 72~76
董 泽, 曹子峥, 陈 林等. 60 GHz 的全双工 OFDM-ROF 系统的实验研究[J]. *通信学报*, 2011, **32**(2): 72~76
- 18 Wang Wenpei, Chen Lin, Dong Ze *et al.*. Performance comparison between on-off keying and orthogonal frequency division multiplexing signals in 40 GHz radio-over-fiber systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 465~470
王文沛, 陈 林, 董 泽等. 40 GHz 光纤无线通信系统中开关键控与正交频分复用信号传输性能的比较[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 465~470

栏目编辑: 谢 婧