

doi:10.3788/gzxb20154412.1206001

小波包变换对 CO-OFDM 系统高峰均比的抑制性能研究

童峥嵘, 郭尊礼, 曹晔, 张卫华

(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:针对相干光正交频分复用系统中出现的高峰值平均功率比问题,提出用小波包变换取代传统快速傅里叶变换的相干光正交频分复用系统.仿真实验证明了具有良好正交性的小波包变换对高峰值平均功率比起到一定程度上的抑制作用,且误码率性能优于传统的快速傅里叶变换.随着小波尺度函数及小波函数对称性的提升,其避免信号处理过程中的相移的能力提高,系统性能有所改善.与传统的快速傅里叶变换系统相比,基于小波包变换的系统中,小波基函数 haar 小波的互补累计分布函数为 0.01 时,门限值降低约 2 dB,且在误码率为 10^{-3} 的情况下,性能优化 1.5 dB.在此基础上,将小波提升算法应用到相干光正交频分复用系统中,得到的抑制峰均比及误码率性能与应用 Mallat 算法时一致,但算法的结构复杂度降低.

关键词:正交频分复用;相干检测;小波包变换;误码率;频谱利用率

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1206001-6

Wavelet Packet Transform for PAPR Reduction Performance in CO-OFDM System

TONG Zheng-rong, GUO Zun-li, CAO Ye, ZHANG Wei-hua

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

Abstract: Due to the high peak to average power ratio in coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system, a coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system using the wavelet packet transform instead of the traditional fast Fourier transform was proposed. Simulation results show that the novel transformation has obvious inhibiting effect on peak to average power ratio and gets better bit error rate performance than the traditional system using fast Fourier transform. With symmetry of the wavelet scaling function and wavelet function improving, the ability to avoid the phase shift improves in the process of signal processing and system performance ameliorates. At the complementary cumulative distribution function of 0.01, peak to average power ratio of using haar wavelet function can be optimized 2 dB and the optical signal to noise ratio of haar is improved by 1.5 dB at bit error rate of 10^{-3} compared with that of traditional fast Fourier transform. On the basis of research, with the simpler algorithm structure, lifting wavelet transform instead of Mallat algorithm was proposed to apply to the coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system and the inhibition peak to average power ratio and bit error rate performance is similar to the latter system.

Key words: Orthogonal frequency division multiple; Wavelet transforms; Coherent detection; Bit error rate; Spectrum utilization

OCIS Codes: 060.4510; 060.1660; 060.2330; 060.2630; 060.7140

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2013AA014201)、天津市自然科学基金(Nos. 11JCYBJC00100、13JCQNJC01800)资助

第一作者: 童峥嵘(1971-),女,教授,博士,主要研究方向为光纤通信. Email: tjtongzhengrong@163.com

通讯作者: 郭尊礼(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信. Email: guozunli@126.com

收稿日期: 2015-06-03; **录用日期:** 2015-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

正交频分复用技术 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 作为实现高速数据传输的一种有效手段, 利用许多并行、低速率数据传输的子载波来进行传输, 从而实现高速率的数据通信^[1-3].

在一般情况下, 潜在的高峰均功率比 (Peak to Average Power Ratio, PAPR)^[4-5] 是基于 OFDM 系统的缺点. 当大量的子载波调制信号叠加时, 会有一定概率使叠加后的信号产生很高的峰值功率. 光 OFDM 系统除了会同无线 OFDM 系统一样限制系统容量, 从而引起交调失真, 增加 A/D、D/A 转换器的复杂度, 还会影响马赫-曾德调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM) 的功率效率^[6]. OFDM 技术的核心是保证子载波的正交性, 用小波变换代替快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 研究结果取得了有益进展^[7-8]. 长距离基于小波包的相干光正交频分复用 (Wavelet Packet Transform in Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, WPT-OOFDM) 系统中小波变换能够抑制系统非线性噪声^[9]. 在高速情况下, 小波包变换的 CO-OFDM 在波分复用系统下可实现 1 Tbps 的传输速度, 使其传输距离达 600 km^[10]. 小波包变换能同时提供时间轴平移上函数本身的正交性和正交子空间中各函数基的互正交性, 而且很容易用多速率滤波器组来实现. 若将每一小波子空间当作 OFDM 系统中的一个载波, 利用小波包变换 (Wavelet Packet Transform, WPT) 及其逆变换 (Inverse Wavelet Packet Transform, IWPT) 对信号进行分解与合成, 小波函数良好的正交性与时频局部性在提高通信系统性能和改善多载波调制系统缺陷方面具有很大的优势和潜力^[11], 其中在在峰均比方面有一定的抑制作用. 与 OFDM 相比, 小波调制可以灵活地配置子信道, 从而更有效地抑制码间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI)、载波间干扰 (Inter Carrier Interference, ICI)、脉冲干扰、窄带干扰等影响, 更方便地实现满足不同业务和业务质量要求的多速率信号的传输, 进一步降低了误码率并且提高了系统的性能^[12]. OFDM 技术采用循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 以避免码间干扰和载波间干扰^[13], 但 CP 会导致系统额外的功率开销和频谱开销. 基于 WPT 的 CO-OFDM 系统由于不需要添加循环前缀, 频带利用率比 OFDM 系统更优.

本文采用 Matlab 和 Optisystem 软件, 建立基于 WPT 的 CO-OFDM 系统的仿真平台. 提出了用小波包变换 (WPT) 取代传统快速傅里叶变换 (FFT) 的新型相干光正交频分复用 (CO-OFDM) 系统, 从提高系统传输性能和抑制高 PAPR 两方面分析了 WPT 的优势.

1 小波包调制及 PAPR 问题

紧支撑性和正交性是正交小波的特点, 由于正交小波在数字信号处理过程中可以提供有限长的数字滤波器, 所以其在小波调制系统中有着重要的地位. 正交小波可分为 Daubechies (dbN)、Symmlets (symN)、Coiflet (coifN) 及 haar 小波.

依据 Mallat 算法^[14], 将小波包变换应用到相干光的 OFDM 中, 即 WPT-CO-OFDM. 多分辨率分析, 通过一系列的高通滤波器及低通滤波器组将信号进行 n 阶分解与重构, 进而实现 2^n 路信号的调制与解调. 使用滤波器对信号进行分解可以得到高频部分和低频部分, 分别反映信号的概况与细节, 且两者是正交的关系.

图 1 为小波包调制的简化结构, 对调制出的信号进行峰均比分析, 得到小波包调制信号为

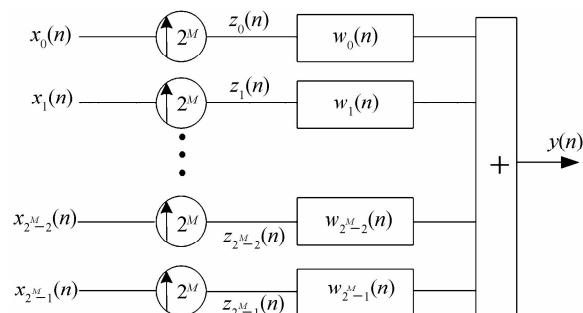


图 1 小波包调制的简化结构

Fig. 1 Simplified structure of wavelet packet modulation

$$y(n) = \sum_{k=0}^{2^M-1} \sum_p z_k(p) w_k(n-p) \quad (1)$$

式中, $w_k(n-p)$ 中为 M 级 Mallat 算法的等效滤波器, $z_k(n)$ 是基带 $x_k(n)$ 的上采样, 可表示为

$$z_n(p) = \begin{cases} x_k(\frac{n}{2^M}), (\frac{n}{2^M}) \text{ 为整数} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可得

$$y(n) = \sum_{k=0}^{2^M-1} \sum_p z_k(p) w_k(n-2^M \cdot p) \quad (3)$$

小波包调制信号在时域上交迭, 因此 PAPR 信号需要以码元为单位进行计算, 小波包调制信号是相互独立的子信道上的传输信息之和, 其 PAPR 可由式(4)得到, 即

$$\text{PAPR} = \frac{\max_n (|y[n]|^2)}{E(|y[n]|^2)} \quad (4)$$

式中, $y[n]$ 是发送端的输出信号, $\max_n(\cdot)$ 表示所有时刻上功率最大值, $E(|\cdot|)$ 表示总体均值. 由于信号幅度最大值出现的概率非常小, 直接用 $\max_n(|y[n]|^2)$ 定义信号幅度峰值没有实际意义, 一般用系统峰均功率比大于峰均功率比阈值 PAPR_0 的概率来衡量一个

系统的峰均功率比性能,即求 $P(\text{PAPR} > \text{PAPR}_0)$,也就是 PAPR 的互补累积分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF),本文仿真中以 CCDF 作为衡量 PAPR 的参数^[15].

将算法与结构都更简单的小波提升算法(Lifting Wavelet Transform, LWT)及其逆变换(Inverse Lifting Wavelet Transform, ILWT)取代 Mallat 算法应用到 CO-OFDM 系统中.小波提升算法的正变换和反变换的结构框图如图 2.

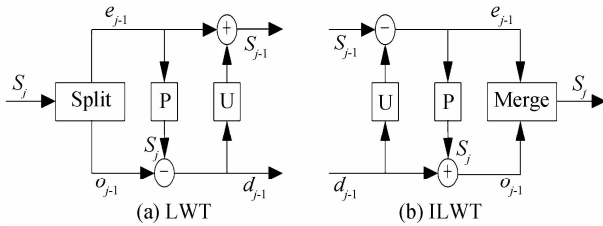


图 2 小波提升算法框图

Fig. 2 The wavelet transform by Lifting wavelet algorithm

提升算法构造第二代小波主要有分裂(Split)、预测(Predit)和更新(Update)三个步骤,重构过程是分解过程的逆过程,即反更新、反预测、合并,在重构时可以将正变换作为依据,只需要将正变换中的加号换成减号、数据流取相反的方向就可以实现.由此可以看出,提升算法能够实现重构和原位运算,可以使用较少的存储空间^[9].

2 基于 WPT 的 CO-OFDM 系统

用 CO-OFDM 技术作为系统传输模型,它在射频

OFDM 技术的基础上结合了相干检测技术的优点.相干光通信与正交频分复用相互促进,OFDM 技术使得相干系统易于进行相位与信道估计,计算效率高,而相干系统满足了 OFDM 所需的线性关系.

本文选用的相干检测系统是直接上/下变频结构,这种结构的优点是降低了发射机和接收机对电信号的带宽要求.完整的 CO-OFDM 系统框图如图 3.该系统可分为电域和光域两部分.其中,电域部分包括射频 OFDM 信号发射机与射频 OFDM 信号接收机,用于产生和恢复 OFDM 基带与射频信号.该部分的仿真工作在 Matlab 软件中完成.光域部分包括射频到光的上变频器,光到射频的下变频器以及光信道.上变频器与下变频器用于完成射频信号与光信号的线性转换,光信道用于传输光 OFDM 信号.相比傅里叶变换 FFT,小波包变换 WPT 具有更好的载波正交性,因此该系统 COOFDM 系统不需要循环前缀 CP 即可消除 ISI 和 ICI,提升了系统频谱利用率与系统色散容限并降低了计算复杂度.该部分的仿真工作主要在 Optisystem 软件中完成.

3 仿真分析

利用 Optisystem 构建一个 CO-OFDM 的光通信信道模型,将 Matlab 产生的射频 OFDM 信号输入到系统发射端.接收端采用相干检测恢复电信号.系统结构如图 3.选择不同的小波基,分析各小波基对 WPT-CO-OFDM 的性能影响,并通过 Matlab 进行仿真.仿真参数设置如表 1.

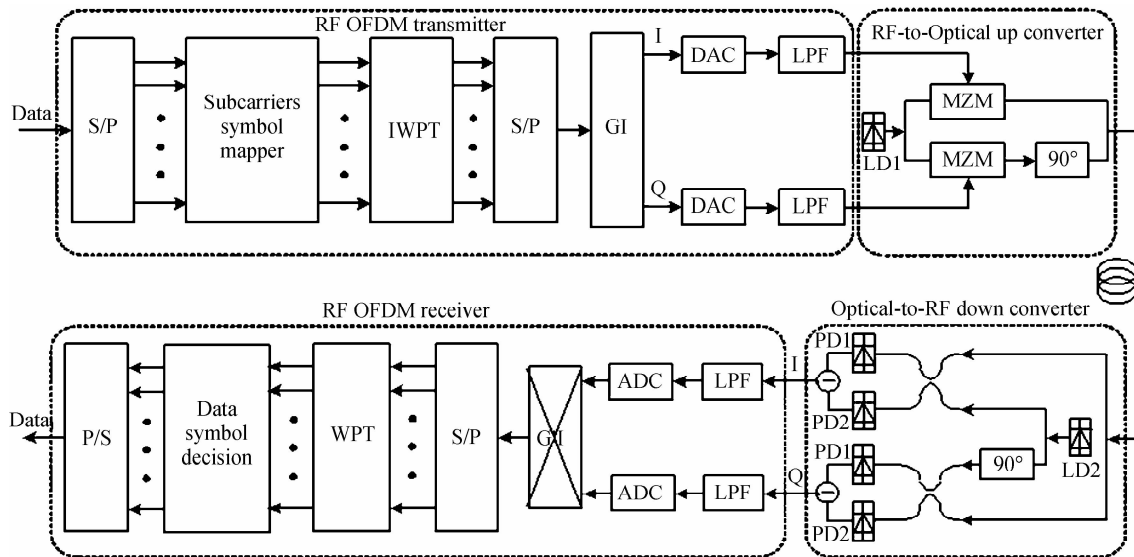


图 3 基于 WPT 的 CO-OFDM 系统

Fig. 3 The COOFDM system based on WPT module

表 1 仿真参数设置
Table 1 Simulation parameter Settings

Modulation mode	Number of subcarriers	Wavelet types	Channel	Transmission distance	Transmission power
4QAM	128	haar,coif,db,sym	Optical channel	80×3 km	-5dBm

在光路中,如果 OFDM 信号的 PAPR 值较高,将导致电光转换后的光信号峰值功率较大.因此,可以通过观察马赫-曾德调制器调制后的光信号功率的时域波形来了解 OFDM 信号的峰值情况.论文通过在消失矩相同情况下研究 haar、coif3、db4、sym5 的小波基类型对 CO-OFDM 系统的峰均比的影响.可以通过观察

峰值情况反映出系统的峰均比大小.

原始 OFDM 信号及基于小波基 haar、db4、LWT-haar 的 CO-OFDM 信号光时域波形如图 4.为方便比较,设定横轴时间为 $0 \mu\text{s}$ 到 $5 \mu\text{s}$,纵轴功率为 -20 dBm 到 0 dBm .

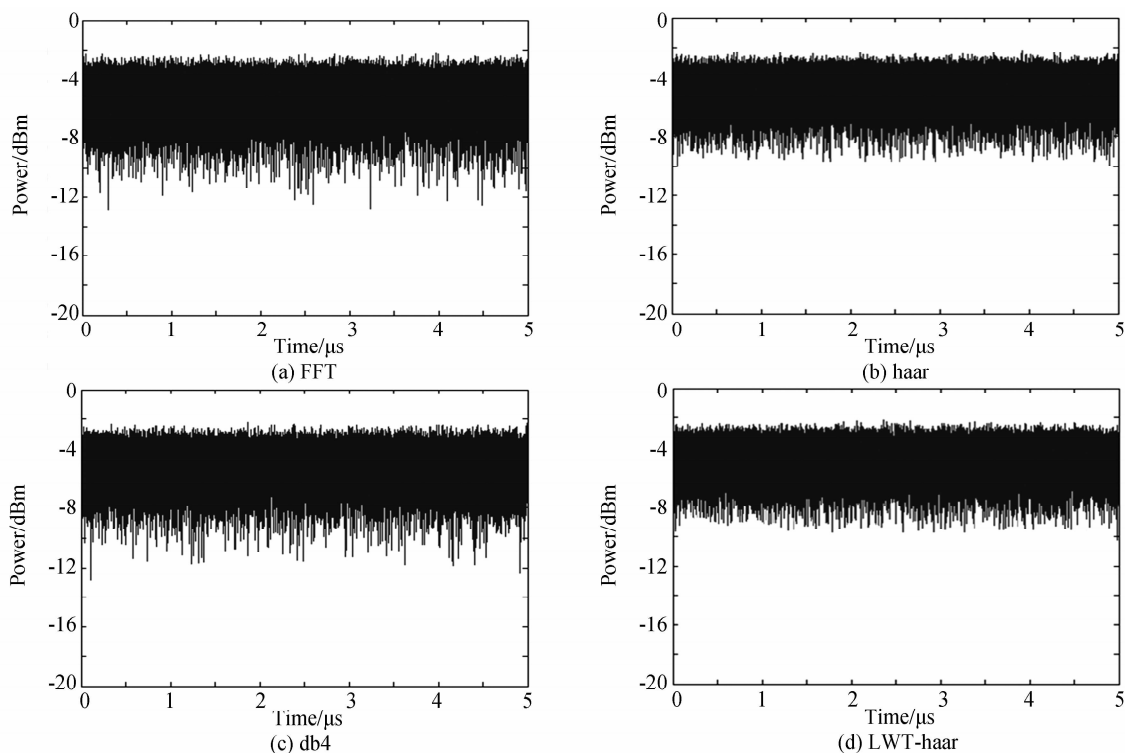


图 4 光域信号功率对比图

Fig. 4 Simulation signal power values of different techniques in optical domain

图 4(a)中峰值过高现象比较普遍,大部分信号功率超过 -10 dBm ,多处功率值在 -12 dBm 左右,毛刺数量较多,说明峰均比高的问题比较严重;图 4(b)中峰值情况有了改善,功率值绝大多数保持在 -10 dBm ,信号光时域波形中的毛刺数量较少,且无明显高峰值的现象,这是小波基函数 haar 的尺度函数及函数对称性良好的特性所决定,对 PAPR 的抑制起到一定的效果;图 4(c)中功率值的大小均保持在 -12 dBm ,与图 4(a)相比没有出现明显的差异.通过图 4(a)~(c)可看出,小波基函数不同,在小波包变换的 CO-OFDM 系统对 PAPR 的抑制效果也不同.用 haar 小波后,抑制效果更加显著.图 4(d)与 (b)中峰值基本一致,并且毛刺突出的情况也相似,毛刺数量较少,可以看出两者都对高峰均比起了明显的抑制作用.

haar、coif3、db4、LWT-haar、sym5 的小波基类型对 CO-OFDM 系统峰均比的影响如图 5.从图 5 可以看

出,改变小波基函数的类型会对 PAPR 产生影响.选用 db4 小波时系统对 PAPR 的抑制效果一定程度上好于传统的傅里叶变换,但差异较小;选用 sym5、coif3 小波基函数时,系统对 PAPR 的抑制效果得到改善,在 $\text{PAPR}_0 = 7 \text{ dB}$,较传统傅里叶变换,CCDF 提高两个数

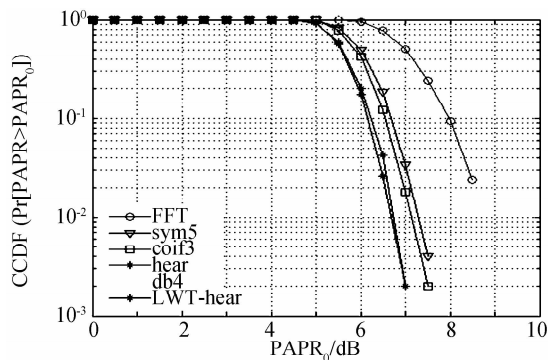


图 5 不同小波基类型的 CCDF 曲线
Fig. 5 CCDF curve of wavelet functions

量级;选用 haar 小波基函数,在 CCDF = 0.01 时将 PAPR₀ 优化了大约 2dB. 小波提升算法下的 haar 与 Mallat 算法下 haar 的 CCDF 曲线相当,这与其信号时域波形图得出的结论一致.

最后对小波包变与 FFT 的可靠性做对比分析,由于小波包变换将信号分解成时域有限长度的“小波”,可以根据需求设计不同小波. 由于其良好的载波正交性,在误码率方面,明显优于传统的快速傅里叶变换. 图 6 显示了 haar、coif3、db4、sym5、LWT-haar 的小波基类型同 FFT 的误码率的对比.

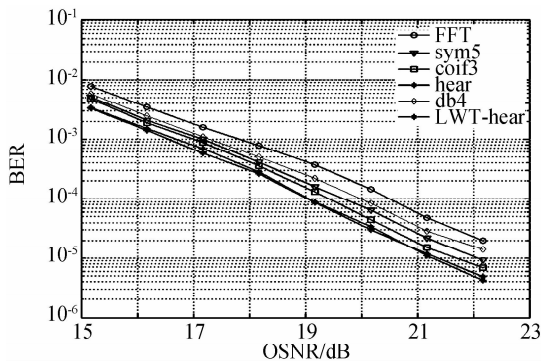


图 6 240 km 传输下 WPT-CO-OFDM 与 FFT-CO-OFDM 系统误码率对比

Fig. 6 BER performances of FFT and WPT in 240 km SMF transmission

图 6 可以看出由于良好的正交性,基于 WPT-CO-OFDM 的误码率优于 FFT-CO-OFDM,其中在这五种代表性的小波基函数中,性能较好的依次为 haar、coif3、sym5 和 db4,其中 haar 在 BER = 10⁻³ 的情况下,性能提高了 1.5 dB. 针对 haar 小波基函数用小波提升算法取代 Mallat 算法应用到 CO-OFDM 系统中,在误码率方面与 Mallat 算法构造的 haar 小波包变换相当,但是运算复杂度较低.

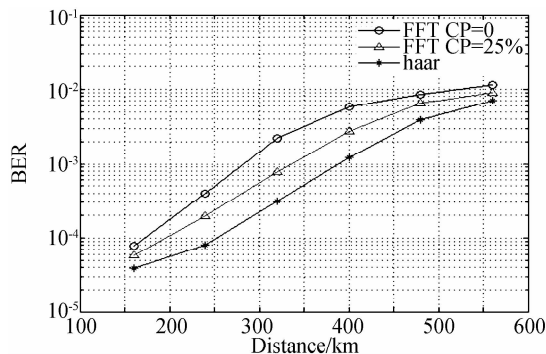


图 7 不同传输距离下 WPT-CO-OFDM 与 FFT-CO-OFDM 系统 BER 比较

Fig. 7 BER performances of WPT-CO-OFDM and FFT-CO-OFDM in different transmission distance

将基于小波包变换 CO-OFDM 系统与基于传统的傅里叶变换系统在不同传输距离下的性能进行比较如图 7. 从图中可以看出,加入循环前缀 CP = 1/4 作为保

护间隔的 FFT-CO-OFDM 性能明显优于不加循环前缀的系统. 基于良好正交性的小波包变换的 CO-OFDM 系统不需要添加循环前缀,这一方面表现出的性能优于加入 CP 的 FFT-CO-OFDM 系统,从而减少了系统额外的功率开销和频谱开销,频带利用率比 FFT-CO-OFDM 系统更高. 但这种优势随着距离的增加会逐渐减少.

4 总结

本文采用小波包变换,取代传统的傅里叶变换来分析光 OFDM 系统的 PAPR 性能以及误码率性能. 用 Optisystem 软件搭建了基于 WPT 的 CO-OFDM 系统,与传统 FFT 系统的光路对比分析表明,WPT 结构在一定程度上抑制了光 OFDM 系统的峰均比,在误码率方面,具有良好正交性的小波基函数表现优于传统的快速傅里叶变换. 针对 haar 小波基函数,采用小波提升算法取代 Mallat 算法应用到 CO-OFDM 系统中,在降低复杂度的同时,保持了与 Mallat 算法一致的峰均比以及误码率性能. 因此可以证明,采用 WPT 算法取代传统 FFT 算法可以使 CO-OFDM 系统在 PAPR 以及误码率性能方面得到一定程度上的改善.

参考文献

- [1] GIULIO C, FOGGI T. Impact of phase noise and compensation techniques in coherent optical systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(18): 2790-2801.
- [2] ZHANG Na-na, ZHOU Xian, SHI Jun-fei, et al. 40Gbps OFDM-PON system using polarization division multiplexing for upstream transmission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706018.
- [3] 张娜娜,周娴,施浚飞,等. 40 Gbps OFDM-PON 系统采用偏振复用技术实现上行链路传输 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706018.
- [4] SANDER L J, ITSURO M, TIM C, et al. Coherent optical 25.9-Gb/s OFDM transmission over 4160-km SSMF [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(1), 6-15.
- [5] HE Zhen, WANG Jian-ping, YAN Jing. A restorable clipping scheme for PAPR reduction of OFDM-ROF system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706017.
- [6] 何振,王建萍,颜晶. 降低 OFDM 系统峰均比的可恢复限幅技术 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706017.
- [7] CHO Y J, NO J S, SHIN D J. A new low-complexity PTS scheme based on successive local search using sequences [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, **16**(9): 1470-1473.
- [8] SILVA J A L, CARTAXO A V T, SEGATTO M E V. A PAPR reduction technique based on a constant envelope OFDM approach for fiber nonlinearity mitigation in optical direct-detection systems [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, **4**(4): 296-303.
- [9] LINFOOT S L. A study of different wavelets in orthogonal wavelet division multiplexing for DVB-T [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, **54**(3): 1042-1048.
- [10] LI A, SHIEH W, TUCKER R S. Wavelet packet transform-based OFDM for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(24): 3519-3619.
- [11] GAO Hai-yue, PAN Wei. Analysis of phase noise induced by

- four-wave mixing in long-haul optical orthogonal frequency-division multiplexing based on wavelet transforms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11):87-90.
- 高海越,潘炜. 基于小波变换的长距离光正交频分复用系统中四波混频引起的相位噪声分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 87-90.
- [10] BEN- EZRA Y, BRODESKI D, ZADOK A. 1 Tbps transmission system based on hierarchical approach to Wavelet Packet Transform OFDM[C]. *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2011 13th International Conference on. IEEE, 2011: 1-4.
- [11] DAOUD O. Performance improvement of wavelet packet transform over fast Fourier transform in multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems[J]. *IET Communications*, 2010, **6**(7):765-773.
- [12] ZHANG Hong-bo, Yi Xing-wen, CHEN Lei, *et al.* Wavelet packet transform-based optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission using direct detection[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(10):105004.
- [13] ZHAO Chun-xu, CHEN Yuan-xiang, LI Ju-hao. Experimental demonstration of 1.08 Tb/s PDM CO-SCFDM transmission over 3170 km SSMF[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 787-793.
- [14] MAN Chun-tao, WEI Wang, CHI Yan-tao, *et al.* The research of OFDM Modulation and Demodulation technology Based on wavelet packet [C]. Harbin: The 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST2011) (IEEE/EI), 2011, **2**: 902-906.
- [15] LAKSHMANAN M K, NIKOOKAR H. A review of wavelets for digital communication [J]. *Wireless Personal Communications*, 2006, **37**(34):387-420.