

# 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

高海越 潘 炜

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

**摘要** 四波混频(FWM)效应是相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统中最主要的非线性作用。分析基于小波变换的相干光正交频分(WT-OFDM)系统原理,研究小波变换对 FWM 效应和光放大器自发辐射(ASE)引起的相位噪声的改善效果。数值结果表明,在采用常规 G. 652 光纤,100 Gbit/s 的 WT-OFDM 传输 1500 km 时,非线性相位噪声降低 20%,总相位噪声降低 15%。

**关键词** 非线性光学;相位噪声;四波混频;小波变换

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1106006

## Analysis of Phase Noise Induced by Four-Wave Mixing in Long-Haul Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Based on Wavelet Transforms

Gao Haiyue Pan Wei

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University,  
Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract** Four-wave mixing (FWM) is the most important nonlinear effect in coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing (CO-OFDM) system. The principle of CO-OFDM system based on wavelet transforms (WT-OFDM) is analyzed, and effect of wavelet transforms on phase noise caused by FWM and amplified spontaneous emission (ASE) of optical amplifiers is discussed. For the conventional optical fiber G. 652, 100 Gbit/s WT-OFDM system, the simulation results show that the variance of the total phase noise can be decreased by 15%, and the nonlinear phase noise has a 20% reduction while the transmission distance reaches 1500 km.

**Key words** nonlinear optics; phase noise; four-wave mixing; wavelet transforms

**OCIS codes** 060.1660; 060.4510; 190.4380

### 1 引 言

相干光正交频分复用(CO-OFDM)作为新一代的高速光通信技术,具有频谱效率高<sup>[1,2]</sup>、抵抗光纤色散和偏振模色散等优点<sup>[3,4]</sup>,能够实现长距离大容量的光传输网络<sup>[5~7]</sup>。正交频分复用(OFDM)技术对相位噪声极为敏感<sup>[8,9]</sup>,在 CO-OFDM 系统中,自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)引起的相位可以忽略,四波混频(FWM)效应是相位噪声的主要来源,在长距离传输中更为明显<sup>[10,11]</sup>。为了消

除码间干扰(ISI)和载波间干扰(ICI),基于傅里叶变换的 OFDM 系统需要加入循环前缀(CP)<sup>[12,13]</sup>。相比傅里叶变换(FT),小波变换(WT)具有更好的载波正交性,OFDM 系统不需要 CP 即可消除 ISI 和 ICI,提升了系统频谱利用率,并且提升了系统色散容限,降低了 OFDM 计算复杂度<sup>[14,15]</sup>。

然而上述研究并没有涉及小波变换对于 CO-OFDM 系统相位噪声改善的表现。本文从非线性薛定谔方程(NLS)出发,分析基于小波变换的相干

收稿日期: 2012-05-15; 收到修改稿日期: 2012-06-04

作者简介: 高海越(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: hyue\_gao@126.com

导师简介: 潘 炜(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事混沌和量子等光通信方面的研究。

E-mail: weipan80@sina.com

光正交频分(WT-OOFDM)长距离传输系统中线性噪声和由 FWM 引起的非线性相位噪声。

## 2 系统结构与理论分析

基于小波变换的光 OFDM 系统典型结构如图 1 所示<sup>[11,15]</sup>,包括 OFDM 调制、光调制、光纤链路、光解调及 OFDM 解调五个模块,其中 MZM 为马赫-曾德尔调制器,LD1 和 LD2 为本地激光器,

PD1,PD2,PD3 为光电二极管。信号经过串并转换,相移键控调制(PSK),离散小波逆变换(IDWT)或离散傅里叶逆变换(IDFT),然后根据变换情况确定是否加入 CP,进而完成 OFDM 调制。经数模转换后,将 I、Q 两路信号利用相干调制方式调制到光载波,进入光纤链路传输。在接收端,I、Q 两路信号经过光学相干检测恢复原始传输的光信号,最后经过电域 OFDM 解调恢复原始信号。

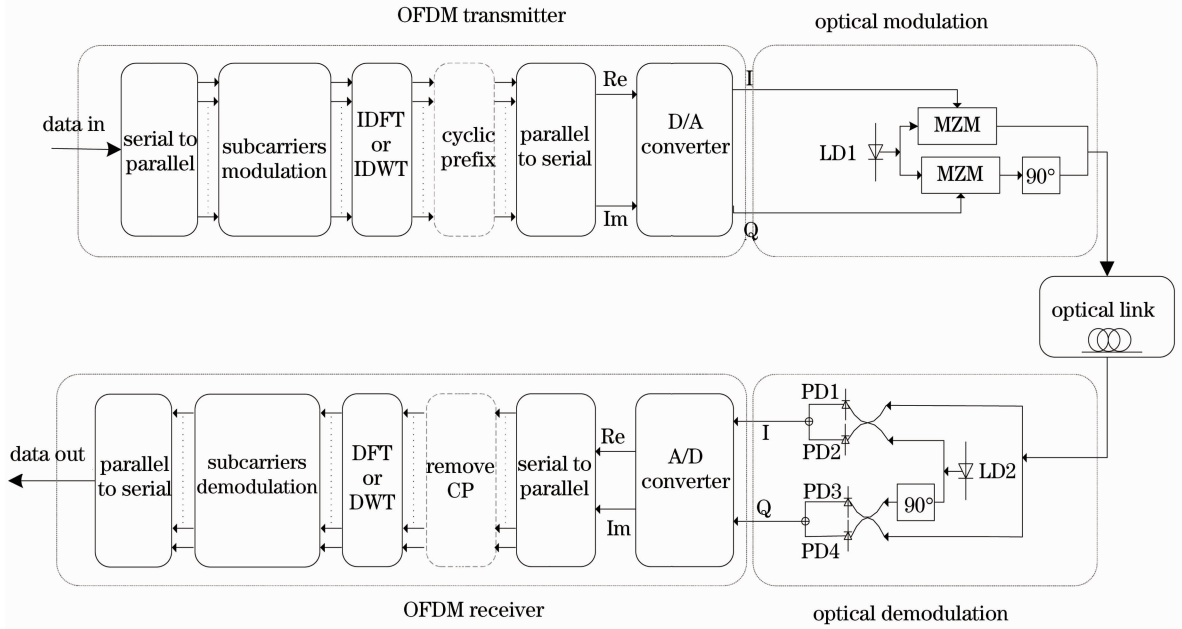


图 1 WT(FT)-OOFDM 系统结构图

Fig. 1 Diagram of WT(FT)-OOFDM system's structure

假设在 WT-OOFDM 系统中,小波母函数采用 Haar 小波。 $u_k(t, z)$  为子载波小波变换后的包络振幅,进入光纤链路的 OFDM 信号的一般形式表示为

$$u(t, z) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} u_k(t, z) \exp(j2\pi k/T_{\text{block}}t), \quad (1)$$

式中  $N$  为 OFDM 子载波个数,  $T_{\text{block}}$  为 OFDM 符号周期。

光纤中脉冲的传输服从 NLS,外部光场的演变描述为<sup>[16]</sup>

$$j \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = -\frac{j\alpha}{2} A, \quad (2)$$

式中  $A$  为脉冲包络的慢变包络振幅,  $T$  为随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度,  $\beta_2$  为群速度色散,  $\gamma$  为非线性系数,  $\alpha$  为光纤损耗。其中传输距离  $z$  和色散  $\beta_2$  为影响相位噪声的主要因素。

在 WT-OOFDM 长距离传输系统中,存在多级级联放大器,假设放大器只放大由光纤损耗引起的

功率损失。在放大器内部用净增益  $G$  代替  $-\alpha$ ,同时色散和非线性效应忽略不计,引入  $u(t, z)$  做变换

$$A = u(t, z) \exp(-\alpha z/2), \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,可得

$$j \frac{\partial u(t, z)}{\partial z} - \frac{\beta_2(z)}{2} \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial t^2} + \gamma \exp[-f(l_s)] |u(t, z)|^2 u(t, z) = 0, \quad (4)$$

式中  $f(l_s) = \exp(-\alpha l_s)$ ,  $l_s$  为段内光纤传输距离。该方程描述了光脉冲在具有光放大器的 WT-OOFDM 系统中的传输特性。

在 CO-OOFDM 长距离传输系统中, FWM 效应远大于 SPM 和 XPM<sup>[11]</sup>。忽略 SPM 和 XPM,由于 FWM 效应,频率分别为  $f_p, f_q, f_r$  的载波分量相混作用产生频率为  $f_k$  的分量,即  $f_k = f_p + f_q - f_r$ ,假设第  $m$  个载波的频率为  $f_m = m \cdot 2\pi\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega$  为载波角频率间隔,将(1)式代入(4)式,则 NLS 演化为

$$\begin{aligned}
 j \frac{\partial u_k}{\partial z} - j\beta_2 \omega_k \frac{\partial u_k}{\partial t} - \frac{\beta_2}{2} \omega_k \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2} + \frac{\beta_2}{2} \omega_k^2 u_k = & -\gamma \exp[-f(l_s)] \sum_{\substack{p+q-r=k \\ p \neq l, q \neq r}} u_p u_q u_r^* \exp\left(-j\omega_p^2 \frac{\beta_2}{2} z\right) \times \\
 & \exp\left(-j\omega_q^2 \frac{\beta_2}{2} z\right) \exp\left(j\omega_r^2 \frac{\beta_2}{2} z\right), \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中  $u_k, u_p, u_q, u_r^*$  为子载波包络振幅,  $\omega_k, \omega_p, \omega_q, \omega_r$  为角频率。(5)式表明了 FWM 效应产生的新频率成分和传输距离将影响系统的非线性相位噪声。系统中离散的线性及非线性损耗可以由数字回传技术进行补偿<sup>[17]</sup>, 假设光放大器产生的噪声为高斯白噪声, 利用数值仿真模拟(5)式, 分析系统相位噪声性能。

### 3 数值结果与分析

在数值模拟中, OFDM 信号比特率为 100 Gbit/s, 调制方式为正交相移键控调制(QPSK), OFDM 载波个数为 64, FT-OOFDM 的 CP 为 1/4 离散傅里叶变换(DFT)窗口长度, WT-OOFDM 系统不采用 CP。光纤色散常数为 17 ps·km/nm, 且在光纤长度内保持不变,

非线性系数为 2.0 W/km, 发射功率为 7 dBm, 每段光纤长度为 100 km, 光纤段数为 15, 放大器噪声系数为 6 dB<sup>[11]</sup>。系统中使用的单模光纤和光放大器的类型为同一类型, 在 Matlab 环境下搭建仿真平台。

图 2 为  $D=17$  ps·km/nm 时 WT-OOFDM 系统和 FT-OOFDM 系统相位噪声与传输距离的关系。结果表明线性相位噪声和非线性相位噪声均随着传输距离的增加而变大, 当传输距离达到 1500 km 时, WT-OOFDM 系统总相位噪声更小, 总相位噪声降低 15%。当传输距离较小时, 相位噪声主要表现为线性相位噪声, 而当传输距离超过 600 km 时, 非线性相位噪声是相位噪声的主导因素, 系统主要受非线性相位噪声影响。

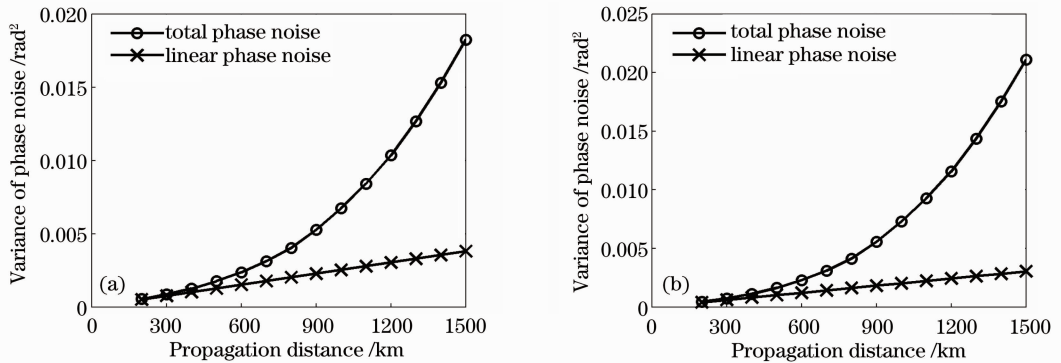


图 2 (a) WT-OOFDM 系统和(b) FT-OOFDM 系统的相位噪声与传输距离的关系

Fig. 2 Variance of phase noise of the system of (a) WT-OOFDM and (b) FT-OOFDM versus propagation distance

图 3 为不同色散常数下 WT-OOFDM 系统和 FT-OOFDM 系统非线性相位噪声与传输距离的关系。仿真结果表明 WT-OOFDM 系统非线性噪声

表现优于 FT-OOFDM 系统, 非线性相位噪声降低 20%。当色散因子变大时, 光纤色散效应增强, 导致相位失配因子增大, FWM 相位匹配更难, 因此当

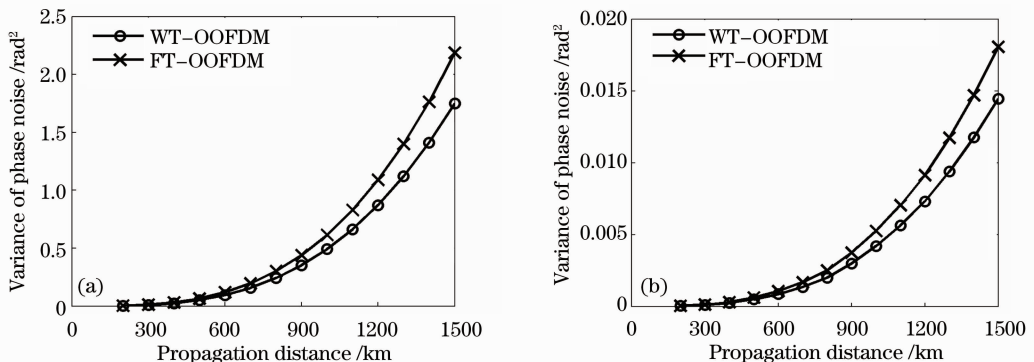


图 3 系统非线性相位噪声与传输距离的关系。(a)  $D=0$ ; (b)  $D=17$  ps·km/nm

Fig. 3 Variance of nonlinear phase noise of the system versus propagation distance. (a)  $D=0$ ; (b)  $D=17$  ps·km/nm

$D=17 \text{ ps}\cdot\text{km}/\text{nm}$  时,非线性相位噪声反而更小。

图 4 表示传输距离为 800 km 时,WT-OOFDM 系统相位噪声与系统比特率的关系。结果表明当比特率增加一倍时,系统相位噪声增加一倍。当系统比特率越高时,OFDM 信号周期越短,引起放大器自发辐射(ASE)噪声增加,从而导致系统总相位噪声变大。

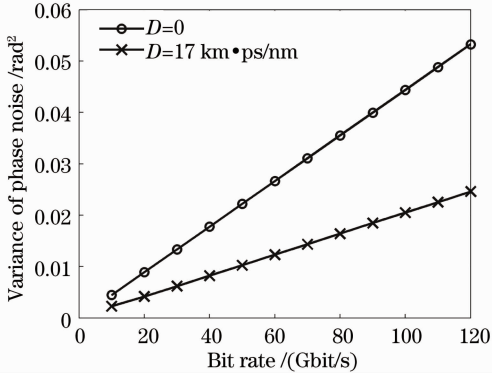


图 4 WT-OOFDM 系统相位噪声与比特率关系

Fig. 4 Relation between phase noise of WT-OOFDM system and bit rate

## 4 结 论

从 WT-OOFDM 系统 FWM 效应及放大器 ASE 引起的相位噪声出发,对比分析了小波变换与傅里叶变换对系统相位噪声的影响。结果表明在长距离 WT-OOFDM 系统中,小波变换能够抑制系统非线性噪声。

## 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 Zhang Jing, Qiu Kun, Li Yonggang *et al.*. Adaptively modulated optical orthogonal frequency division multiplexing system with variable guard interval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 323~326  
张 静, 邱 昆, 李永刚等. 自适应调制光正交频分复用系统的可变长保护间隔研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 323~326
- 3 Yang Yu, Zhang Jiankun, Liu Bo *et al.*. Study of the impact of LED nonlinearity on orthogonal frequency division multiplex based visible light communication systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **38**(3): 323~326  
杨 宇, 张建昆, 刘 博等. LED 非线性对基于正交频分复用可见光通信系统的影响[J]. *中国激光*, 2010, **38**(8): 323~326
- 4 Zou Shumin, Shao Yufeng, Zheng Xi *et al.*. Study on generation of all-optical orthogonal frequency division multiplexing signals based multi-tones modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706004

- 5 邹书敏, 邵宇丰, 郑 曦等. 基于多边带调制产生全光正交频分复用信号的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706004
- 5 Wang Xin, Chen Lin, Cao Zizheng. Influence of modulation depth on optical subcarrier OFDM system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506002  
王 鑫, 陈 林, 曹子峥. 调制深度对副载波正交频分复用光传输系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506002
- 6 Chen Hongxian, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Experimental investigation for 60 GHz radio-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
- 7 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
- 8 Gao Lina, Liu Jianfei, Zeng Xiangye *et al.*. Joint phase equalization in optical orthogonal frequency division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0106004  
高丽娜, 刘建飞, 曾祥烨等. 一种光正交频分复用系统的联合相位均衡方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0106004
- 9 A. J. Lowery, S. Wang. Calculation of power limit due to fiber nonlinearity in optical OFDM systems [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13282~13287
- 10 M. Nazarathy, J. Khurgin, R. Weidenfeld. Phased-array cancellation of nonlinear FWM in coherent OFDM dispersive multi-span links [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(20): 15777~15810
- 11 X. M. Zhu, S. Kumar. Nonlinear phase noise in coherent optical OFDM transmission systems [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 7347~7360
- 12 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557  
陈 林, 曹子峥, 董 泽等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 554~557
- 13 Hao Yaohong, Li Yuquan, Wang Rong. Optimum design for optical modulator in coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305003  
郝耀鸿, 李玉权, 王 荣. 相干光正交频分复用系统中光调制的优化设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 030 5003
- 14 O. Bulakci, M. Schuster, C. A. Bunge *et al.*. Wavelet transform based optical OFDM [C]. OFC/NOFEC, 2009
- 15 A. Li, W. Shieh, R. S. Tucker. Wavelet packet transform-based OFDM for optical communications [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(24): 3519~3619
- 16 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 2001, 63~64, 389~397
- 17 E. Ip, J. M. Kahn. Compensation of dispersion and nonlinear effects using digital back-propagation [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(20): 3416~3425

栏目编辑: 李文洁