

# 基于交叉复用技术的 OFDM-WDM 光传输系统的性能分析

梁有程<sup>1</sup>, 陈海涛<sup>1</sup>, 张豪杰<sup>2</sup>

(1. 广州民航职业技术学院, 广东 广州 510403;

2. 中国移动通信集团广东有限公司广州分公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 基于正交频分复用(OFDM)与波分复用(WDM)的基本原理, 构建了一套基于 OFDM 技术的 WDM 传输系统的系统模型, 并对其相关系统性能进行了理论分析。基于维纳相位噪声模型, 文章对 OFDM 系统中相位噪声引起的公共相位误差和子载波间干扰进行了分析, 在此基础上深入分析了基于交叉复用 OFDM 技术的 OFDM 子载波间干扰的消除方法, 降低相位噪声对系统性能的影响。最后结合理论分析结果对系统模型的相关性能进行模拟计算, 分析结果表明: 采用交叉复用 OFDM 技术在降低相位噪声对 OFDM 系统性能的影响的同时, 提高了系统的信号处理能力。

**关键词:** OFDM; 交叉复用; WDM; 光传输系统

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0721-04

## Analyzing of WDM optical transmission systems based on interleaved OFDM technology

Liang Youcheng<sup>1</sup>, Chen Haitao<sup>1</sup>, Zhang Haojie<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China;

2. China Mobile Group Guangdong Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Based on orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) and wavelength division multiplexing (WDM) principle, a model of OFDM-WDM transmission system was designed. The common phase error and inter-carrier interference in OFDM system caused by the phase noise were analyzed using Wiener phase noise model. In order to suppress the phase noise, a general inter-carrier interference suppression scheme was provided based on the interleaved OFDM technology. The analytical and numerical results show that this interleaved OFDM technology effect in reducing inter-carrier interference on the performance of OFDM system, at the same time, the signal processing ability of the system.

**Key words:** OFDM; interleave; WDM; optical transmission system

收稿日期: 2014-06-12; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 教育部精品资源共享课建设项目(20130569)

作者简介: 梁有程(1981-), 男, 硕士, 主要从事光纤通信与光纤传感技术方面的研究。Email: liangyoucheng@caac.net

## 0 引言

OFDM 技术是一种将高速数据流转换到低速正交的子信道上并行传输的多载波调制技术,已广泛应用于无线通信系统中<sup>[1-2]</sup>。近年来,OFDM 在传统的单载波调制的优点也逐步应用于长距离光传输系统中,将 OFDM 技术应用于光通信中,可以构造出高速率、大容量、低成本的光正交频分复用(O-OFDM)传输系统<sup>[3]</sup>。根据光检测方式的不同,O-OFDM 又可分为直接检测光正交频分复用(DDO-OFDM)和相干光正交频分复用(CO-OFDM)<sup>[4-5]</sup>。

虽然 OFDM 系统具有抗干扰能力强、频带利用率高等诸多特点,但是由于其各子载波间相互正交,对相位噪声特别敏感。相位噪声会破坏 OFDM 各子载波间的正交性,造成信号间的互相干扰<sup>[6]</sup>。相位噪声引起的子载波干扰(Inter-Carrier Interference, ICI)是一个随机变量,在无线 OFDM 领域消除 ICI 的方法主要有:自消除法、时域加窗、频偏补偿技术等。在光 OFDM 领域中消除 ICI 的方法有导频辅助法,数据相关法,导频辅助法等<sup>[7-8]</sup>。

文中通过理论推导,深入分析了 OFDM-WDM 系统的相位特性及相位噪声对系统性能的影响,在此基础上提出了基于交叉复用技术的子载波间干扰的抑制方法,进而改善传输系统的性能参数。

## 1 OFDM-WDM 传输系统模型

基本的 OFDM-WDM 光传输系统结构类似于传统的 WDM 系统,两者的区别在于 OFDM-WDM 系统的发射机和接收机采用 OFDM 技术来实现信号的调制与解调。OFDM-WDM 光传输系统结构图如图 1 所示,该传输系统主要包括 OFDM 发射机,光复用器,光链路,光解复用器和 OFDM 接收机。在发送端,OFDM 发射器先将不同的 OFDM 副载波信号调制到光载波上形成光信号,再通过光复用器将多个 OFDM 发射机调制后的光信号导入光纤链路进行传输;在接收端,光解复用器先将光纤链路过来的多路信号分离开来,再通过 OFDM 接收器将接收到的光信号转换为频率信号,解调后得到原数字信号。OFDM 技术的主要思想是在频域内将所给信道分成许多正交子信道,在每个子信道上使用子载波进行调制。

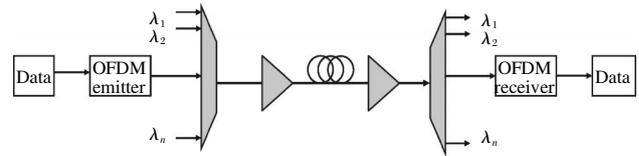


图 1 OFDM-WDM 系统结构图

Fig.1 Diagram of OFDM-WDM system

## 2 OFDM-WDM 传输系统的性能分析

OFDM 信号在光纤中传输时,色散效应、放大器相位噪声、滤波器相位噪声和克尔效应等非线性效应会导致信号的相位发生一定的偏移,人们将这种相位偏移称为 OFDM 系统的相位噪声。相位噪声是 OFDM 系统的一大缺陷,它会引起子载波间干扰或公共相位误差。OFDM-WDM 光传输系统中,激光器的相位噪声是其主要噪声源,所以研究相位噪声对 OFDM-WDM 系统的影响,提升传输系统性能是一个值得高度重视的问题。OFDM-WDM 传输系统中的任意一路波长信号的传递过程都可通过传统的 OFDM 技术来进行分析,下面先来分析 OFDM-WDM 传输系统的第  $n$  路波长信号  $\lambda_n$  的信号处理过程。

相位噪声干扰的 OFDM 系统的信号变换如图 2 所示,第  $k$  个子载波的调制信号  $c_k$  经 IFFT(傅里叶反变换)后再经过 D/A 变换和射频处理后形成发端信号  $S(t)$ ;接收信号  $r(t)$  经下变频和 A/D 变换后再经过 FFT(傅立叶变换)在频域判决得到解调信号  $\tilde{c}_k$ 。在图 2 中,相位噪声主要来自从 IFFT 调制到 FFT 解调之间具有频移特性的模拟振荡器件。相位噪声可用方差为  $2\pi\beta t$  的维纳模型来解析,即  $\sigma^2=2\pi\beta t$ 。其中  $\beta$  为相位噪声功率谱密度的 3dB 线宽。

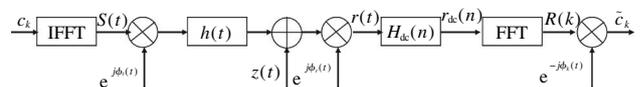


图 2 OFDM 信号变换原理图

Fig.2 Diagram of OFDM signal transformation

假设经逆傅里叶变换调制的 OFDM 子载波数为  $N$ ,频率区域为  $\Delta f$ ,子载波序号为  $k, f_k=k\Delta f$ 。则经过逆傅里叶变换后的第  $k$  个子载波  $c_k$  的可以表示为:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi f_k t) \quad (1 \leq t \leq T) \quad (1)$$

由 OFDM 技术的基本原理,可得出接收信号  $r(t)$ :

$$r(t) = \{ [s(t)e^{j\phi_r(t)}] * h(t) \} e^{j\phi_r(t)} + z(t) \quad (2)$$

式中:  $\phi_r$  和  $\phi_r$  分别表示发射器和接收器的相位噪声;  $z(t)$  表示 ASE 噪声;  $*$  表示卷积运算。

$r(t)$  经离散采样后的输出信号  $r_{dc}(n)$  为:

$$r_{dc}(n) = r(n) * h_{dc}(n) \quad (3)$$

经过 FFT 后第  $k$  个子载波的解调信号为<sup>[9]</sup>:

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} r(n) * h_{dc}(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = c_k I_k(0) + ICR(k) + Z(k) \quad (4)$$

式中:  $Z(k)$  为采样相位噪声  $z(n)$  的离散傅里叶变换;  $I(p)$

为相位噪声频谱,  $I(p) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j[\frac{2\pi pn}{N} + \phi(n) + \phi(n+D)]}$ ,  $D_k = T_k/T_s$ ,  $T_k$

对应于子载波色散参数,  $T_s$  为采样时间;  $ICR(k)$  为子载波间干扰, 令子载波干扰系数为  $I(l-k)$ , 则当  $l \neq k$  时,

$$ICR(k) = \sum_{l \neq 0, l \neq k}^{N-1} c_l I(l-k) = \frac{1}{N} \sum_{l \neq 0, l \neq k}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} c_l \varphi_l(n) e^{j\frac{2\pi pn(l-k)}{N}}$$

$ICR(k)$  是由其他  $N-1$  个子载波信号与  $I(l-k)$  相乘后的累加形式, 它将使子载波信号发生频谱偏移, 进而产生子载波干扰。

下面主要讨论功率变化及子载波干扰对 OFDM 系统的影响。假设子载波间干扰  $\sigma_{icl,k}^2$  与 ASE 相互独立且其分布形式遵循高斯分布, 则第  $k$  个子载波的信号干扰噪声功率比  $SINR_k$  可表示为<sup>[10]</sup>:

$$SINR_k = \frac{E_s E[|I(0) \cdot I(0)^*|]}{E[|ICI(k) \cdot ICI(k)^*|] + N_0} = \frac{\alpha_k}{\sigma_{icl,k}^2 + \frac{1}{\gamma_k}} \quad (5)$$

式中:  $E_s$  为调制信号的方差;  $N_0$  为信道噪声方差;  $\gamma_k$  为第  $k$  个子载波的信噪比,  $\gamma_k = E_s/N_0$ 。

在相位噪声功率相对与系统功率较低的情况下, 载波信号的幅度衰减  $\alpha_k$  和子载波间干扰的方差  $\sigma_{icl,k}^2$  可表示为:

$$\alpha_k = E[|I(0) \cdot I(0)^*|] \approx 1 - \frac{\pi\beta T}{3} \quad (6)$$

$$\sigma_{icl,k}^2 = E[|ICI(k) \cdot ICI(k)^*|] \approx \frac{\pi\beta T}{3} \quad (7)$$

由公式(5)可知, 在维纳相位噪声的影响下, OFDM 系统性能与载波信号的幅度衰减、子载波干扰和信道信噪比都有关系。在信道信噪比一定的情况下, OFDM 系统性能随着子载波干扰的增大而降低。

图 3 为在不同的子载波信噪比影响下系统信号干扰噪声功率比与子载波间干扰  $\sigma_{icl,k}^2$  的关系图, 从图 3 可以看出, 当子载波间干扰小于  $10^{-5}$  时, 相位噪声对系统性能的影响特别小, 几乎可以忽略; 在子载

波间干扰为定值时,  $\gamma_s$  增大, 信噪比的下降数值也增大; 对于相同的  $\gamma_s$ , 系统性能随子载波间干扰的增大而下降。结合前面的推导可知, 相位噪声将引起 OFDM 系统的功率下降, 信号相位的旋转及子载波间的干扰。在一个 OFDM 信号内, 各子载波的持续时间相对较小, 子载波间的相位旋转的几乎是相同的。因此相位旋转可通过辅助导频的信道均衡技术加以纠正。因此, 如何降低子载波的干扰对系统性能的影响值得深入探讨。

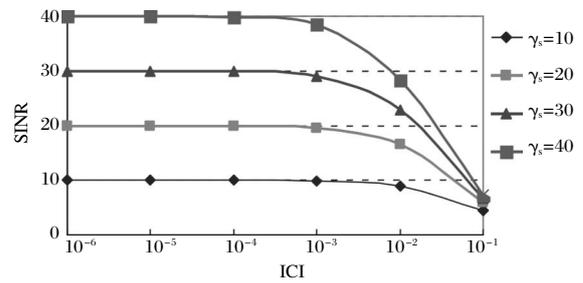


图 3 系统性能与子载波间干扰的关系图

Fig.3 Relationship between the system performance and ICI

### 3 OFDM-WDM 系统子载波干扰的分析

图 4(a) 为传统的 OFDM 信号处理示意图, 频域的载频电信号先经 IFFT 转换为时域的光信号, 该过程并不产生信号间的干扰, 但是子载波间的信号干扰会分布于接收到的每一个信号中, 使得系统的误码率升高。图 4(b) 为文中采用的交叉复用 OFDM 信号处理示意图, 信号只调制进偶数项的载波中, 而载波信号间的干扰原则上只分布于奇数项的载波中, 通过这种方式可降低载波信号间的干扰对载波信号的影响。下面分析这种基于交叉复用技术的子载波干扰消除法的理论基础。

在时域上, 将 OFDM 信号按时间先后顺序划分为前半周期  $S(t_1)$  和后半周期  $S(t_2)$ ,  $S(t_1)$  和  $S(t_2)$  可用以下公式来表述:

$$S(t_1) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi f_k t_1) \quad (1 \leq t_1 \leq T/2) \quad (8)$$

$$S(t_2) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi f_k t_2) \quad (T/2+1 \leq t_2 \leq T) \quad (9)$$

为简化计算, 把子载波信号的偶数项和奇数项系数分别用  $m$  和  $n$  来表示, 则上半周期和下半周期的 OFDM 信号可分别表示为:

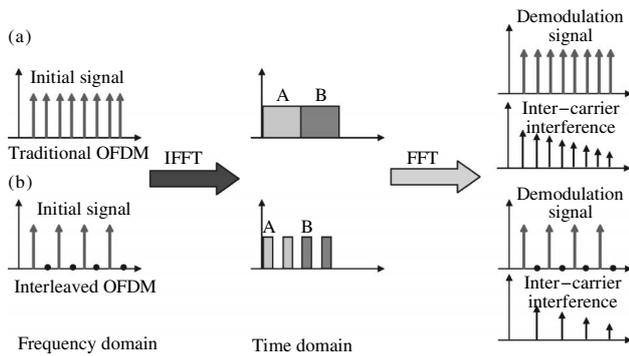


图 4 子载波干扰抑制方式示意图

Fig. 4 Diagram of inter-carrier interference suppression

$$S(t_1) = \sum_{m=0}^{N-2} c_m \exp(j2\pi f_m t_1) + \sum_{n=1}^{N-1} c_n \exp(j2\pi f_n t_1) \quad (1 \leq t_1 \leq T/2) \quad (10)$$

$$S(t_2) = S(t_1 + T/2) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k \cos(k\pi) \exp(j2\pi f_k t_1) \\ = \sum_{m=0}^{N-2} c_m \exp(j2\pi f_m t_1) + \sum_{n=1}^{N-1} -c_n \exp(j2\pi f_n t_1) \quad (1 \leq t_1 \leq T/2) \quad (11)$$

在交叉复用 OFDM 方案中,信号只调制到奇数项子载波中,偶数项的子载波的不携带信号,因此偶数项  $c_m$  的数值被设定为“0”。则上半周期和下半周期的 OFDM 符号可以简化为:

$$S(t_1) = \sum_{n=1}^{N-1} c_n \exp(j2\pi f_n t_1) \quad (1 \leq t_1 \leq T/2) \quad (12)$$

$$S(t_2) = \sum_{n=1}^{N-1} -c_n \exp(j2\pi f_n t_1) = -S(t_1) \quad (t_2 = T/2 + 1) \quad (13)$$

从公式(12)和(13)可知,某一 OFDM 信号的后半周期的信号可用前半周期的新在时域上的反相来表述。通过这种替换,该 OFDM 信号的时间长度可缩短为  $T/2$ ,在信号变换的过程中,系统保持了传统的 OFDM 信号的频谱效率。因此这种交叉复用 OFDM 技术具有与传统的 OFDM 信号相同的频谱效率,但数据处理速率却比传统的 OFDM 信号高了一倍。经过 FFT 解调后的子载波干扰只分布在奇数项子载波中,因此这种交叉复用 OFDM 方式在保证信号频谱效率的同时实现了子载波间干扰的消除。

## 4 结论

相位噪声是信号源在非理想因素条件下引入的

一种随机相位干扰,在 OFDM 系统中,相位噪声会引起 OFDM 信号的公共相位误差和载波间干扰。文中主要围绕相位噪声对 OFDM-WDM 光传输系统性能的影响来进行理论分析,基于傅里叶变换原理,推导了在维纳相位噪声影响下的 OFDM 系统的子载波干扰及系统性能参数表达式,并围绕子载波干扰对 OFDM 系统性能的影响进行深入分析。通过采用数字信号的反向传输技术补偿载波信号相移,实现子载波间干扰的消除。分析结果表明,基于交叉复用 OFDM 技术的 OFDM-WDM 系统在消除子载波干扰的同时降低了相位噪声对系统性能的影响。

## 参考文献:

- [1] Zhang Xiaofei, Xu Dazhuan. Blind channel estimation for multiple antenna OFDM system subject to unknown carrier frequency offset [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(5): 721-727.
- [2] Zhao Li, Ke Xizheng, Sun Linli. Research on reducing the PAPR for FSO-OFDM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1749-1753. (in Chinese)
- [3] Tang Liangrui, Zuo Qi, Cui Weixi. Synchronization scheme using four-dimensional chaotic system for OFDM [J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(1): 73-84. (in Chinese)
- [4] Li Tao, Rong Jian, Zhong Xiaochun. OFDM-ROF system simulation based on opti system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1154-1159. (in Chinese)
- [5] Wang C Y, Wei C C, Lin C T, et al. Direct-detection polarization division multiplexed orthogonal frequency-division multiplexing transmission systems without polarization tracking[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(24), 5070-5072.
- [6] Shieh W. Maximum-likelihood phase and channel estimation for coherent optical OFDM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(8): 605-607.
- [7] Kingwen Yi, William Shieh, Yah Tang. Phase estimation for coherent optical OFDM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(12): 919-921.
- [8] Sander L Jansen, Itsuro Morita, Noriyuki Takeda. Over 4160-km SSMF coherent optical 25.8-Gb/s OFDM transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(1): 6-15.
- [9] Peng W R. Analysis of laser phase noise effect in direct-detection optical OFDM transmission[J]. *Lightwave Technol*, 2010, 28(17): 2526-2536.
- [10] Wu S, Bar-Ness Y. OFDM systems in the presence of phase noise: consequences and solutions [J]. *IEEE Trans Commun*, 2004, 52(11): 1988-1996.