

doi:10.3788/gzxb20154401.0106003

相干光 OFDM 系统中基于导频辅助的 采样时钟频率偏差估计和补偿算法

李宝,余建军,何晶,陈明,陈林

(湖南大学 信息科学与工程学院,长沙 410082)

摘 要: 基于导频辅助法,对相干光正交频分复用系统中采样时钟频率偏差进行估计和补偿,并研究了导频的插入位置对该算法补偿效果的影响,通过对五种不同的导频插入位置进行分析和比较,得到最优导频插入位置. 仿真结果表明:本文算法即使在较大的频率偏移情况下也有较好的补偿效果,并且采用该方法得到的光信噪比损耗不到 1 dB,可以有效地降低系统成本;不同导频插入位置对算法的补偿效果会产生影响,在较小采样频率偏移范围内时,导频平均插入方式为最优. 如果采样频率偏移量较大,在导频平均插入不能很好地补偿的情况下,导频应尽量插在低频位置.

关键词: 光通信技术;相干光;导频辅助;采样时钟频率偏差;正交频分复用;导频;估计;补偿

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0106003-5

Estimation and Compensation of Sampling Clock Frequency Offset in Coherent Optical OFDM Systems with a Pilot-aided Method

LI Bao, YU Jian-jun, HE Jing, CHEN Ming, CHEN Lin

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The pilot-aided method was adopted for estimation and compensation of sampling clock frequency offset in CO-OFDM systems to improve the system's performance. And the pilot arrangements were simulated and discussed by comparing with five different location of pilots inserted, the optimal location of pilot inserted was obtained. The simulated results show that the method can work quite effectively even with large sampling clock frequency offsets, and the loss of optical signal-to-noise ratio is less than 1 dB. Therefore, it can reduce the cost of system; the location of pilots will impact the performance of the algorithm, the average insertion of pilots is optimal. With increasing sampling frequency offset, if the method can not work well, the pilots should be inserted at the low frequency sub-carriers.

Key words: Optical communication; Coherent optics; Pilot-aided; Sampling clock frequency offset; Orthogonal frequency-division multiplexing; Pilots; Estimation; Compensation

OCIS Codes: 060.1660; 060.4510; 030.1640; 060.4230

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统利用各子载波之间的正交性能够拥有更高的频谱利用率,及良好的抗多径性能,被广泛应用于有线和无线通信系统. 各子载波的正交

性能够提高频谱的利用率,同时 OFDM 系统的正交调制和解调能够通过数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)实现,提高系统的灵活性. 随着社会的信息化发展,数据量越来越大,传输速率的要

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61307087, 61377079)、湖南省自然科学基金项目(No. 12JJ3070)和中央高校基本科研业务费资助

第一作者: 李宝(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信相关技术. Email: lb837023792@gmail.com

导 师: 何晶(1978-), 女, 博士, 主要研究方向为光无线通信、相干光通信. Email: jhe_hnu@163.com

收稿日期: 2014-03-24; **录用日期:** 2014-06-30

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

求越来越高,相干光 OFDM 系统能够很好地适应现代化的通信要求,构建出大容量、高速率、低成本和高质量的通信系统^[1-6,16-18].

相干光 OFDM 通信系统在发射机和接收机要用到数字到模拟转换(Digital-to-Analog Converter,DAC)和模拟到数字转换器(Analog-to-Digital Converter,ADC)实现数模转换.在相干光 OFDM 系统的发射机中,经过 IFFT 调制后的数字 OFDM 信号经过 DAC 转换成模拟 OFDM 信号.在接收端通过模数转换器 ADC 将基带信号转换为数字信号,输入到 FFT 中进行解调.由于 ADC 和 DAC 的时钟不可能完全相同,将导致信道间干扰(Inter-Carrier Interference,ICI)和经过 FFT 过后子载波的相位旋转^[7-8],从而严重影响系统的性能,因此需要对采样的时钟进行同步.

文献[9]是在时域空间做采样点的重采样,利用插入一些采样点,在接收端对这些点进行重新采样;文献[10-11]将传输得到的确定时钟信号作为接收端采样的时钟,但需要更多的环路来实现,系统的复杂度和成本较高;文献[12]利用导频信号估计采样时钟频率偏差(Sampling Clock Frequency Offset,SCFO)并直接反馈一个信号到接收机的振荡器,以满足采样时钟频率的同步,但是这种方法在 SCFO 很小的情况补偿误差会很大.在无线 OFDM 频域中对采样时钟频率偏差的估计和补偿算法主要是利用导频信号和采样时钟频率偏差经过 FFT 后引起的子载波相位旋转之间的线性

关系,直接在频域进行补偿^[13-15].

本文将文献[13]利用导频信号估计 SCFO 和补偿的算法应用于相干光 OFDM 通信系统中,同时研究了导频插入位置对该算法性能的影响,为导频位置的准确插入提供参考.

1 理论分析

1.1 相干光通信系统

相干光正交频分复用系统(Coherent Optical OFDM,CO-OFDM)原理如图 1.首先发射机产生基带 OFDM 信号(包括伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence,PRBS)产生),作为测试系统的数据源.通过信道编码,提高通信系统的传输可靠性,克服信道中的噪声和干扰.然后将二进制数据流映射为 M-PSK/M-QAM 符号,用导频的插入估计和补偿接收机中的 SCFO 和共同相位误差,通过 IFFT 快速实现 OFDM 信号的调制.为了消除多径造成的 ICI 和符号间干扰(Inter Symbol Interference,ISI),可增加适当的循环前缀(Cyclic Prefix,CP).在传输的所有 OFDM 符号前面添加训练序列(The training Sequence,TS)以进行符号同步^[19-20]和信道均衡^[21-23].产生基带 OFDM 信号后经过 DAC 产生模拟信号,用低通滤波器(Low-Pass Filter,LPF)消除 DAC 带来的影响.通过光正交调制器产生光 OFDM 信号,经过光放大器(Optical Amplifier,OA)输入到光链路中传输.

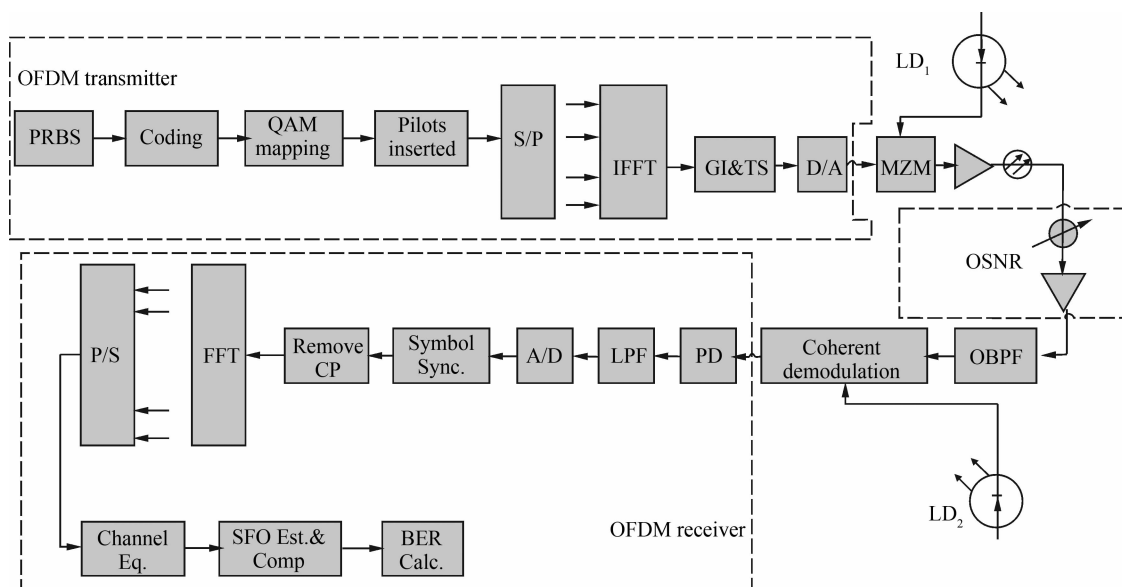


图 1 相干光通信系统原理框图

Fig. 1 The principle of coherent optical OFDM transmission system

接收机模块主要包括光信号的接收,光到电的相干检测并得到电 OFDM 信号,ADC 转换用来得到数字 OFDM 信号.

1.2 采样频率偏移估计和补偿算法

将 N 点 IFFT/FFT 的 OFDM 系统子载波索引的

取值范围表示为 $[-N/2+1 N/2]$,由于采样时钟偏移经过接收端 FFT 而产生的相位旋转和子载波索引有线性关系^[13],即

$$\varphi_i = s_i k_i \quad (k_i \in p) \quad (1)$$

$$s_l = \frac{\sum_{i=1}^M k_i \cdot \varphi_i}{\sum_{i=1}^M k_i^2} \quad (2)$$

式中 φ_i 表示第 l 个 OFDM 符号的导频子载波索引为 k_i 的相位偏移, s_l 为第 l 个 OFDM 符号的相位旋转因子, p 是导频所在子载波索引. 利用最小二乘法 (Least Square, LS) 求出相位偏移因子 s_l , 其中 M 为插入导频的总数. 随着 OFDM 符号数的增加 s_l 不断增大, 但是当在一个 OFDM 符号最大索引的子载波相位旋转超过 $\pm\pi$, 即 s_l 大于 $2\pi/N$ 时, 可以通过提前或者延后一个或者多个采样点来消除采样时钟偏差引起的子载波相位旋转.

图 2 是采用 SCFO 估计和补偿算法的 DSP 运算流程. 通过求出 s_l 就可以利用式(1)估计出每个子载波的旋转相位, 直接对经过 FFT 后有采样时钟偏差的数据乘以相应的相位旋转因子 $\exp(-js_l k_i)$, $k_i \in [-N/2+1, N/2]$ 进行补偿.

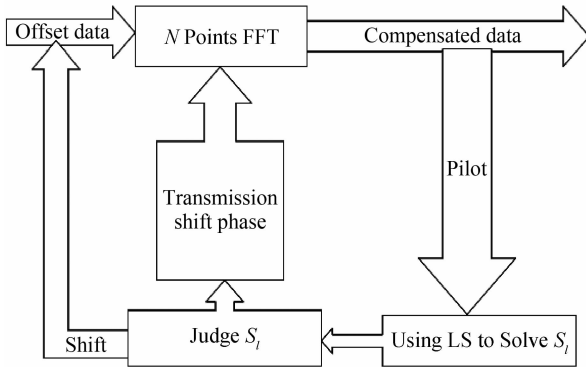


图 2 采样时钟偏差的估计和补偿

Fig. 2 Estimation and compensation of sample clock frequency offset

1.3 导频插入位置

利用导频信号估计子载波相位旋转后, 在频域空间进行相位补偿, 并对导频的位置进行了分析. 由于子载波索引的取值范围为 $[-N/2+1, N/2]$, 由式(1)可以知道旋转相位和子载波索引成线性关系, 由于 N 点 FFT 周期为 N , 所以理想的子载波旋转相位和子载波索引的关系图如图 3.

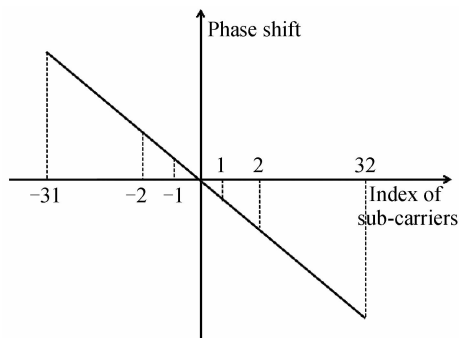


图 3 子载波相位旋转和索引的线性关系 ($N=64$)

Fig. 3 Phase shift versus index of sub-carriers ($N=64$)

将导频在两边对称插入, 分五种情况讨论导频的位置: 1) 导频插在子载波高频位置, 如图 4(a). 2) 导频插在子载波低频位置, 如图 4(b). 3) 从子载波低频到高频以导频数递增的形式插入导频, 如图 4(c). 4) 从子载波低频到高频以导频数平均插入, 所有子载波数分为导频数的平均等份, 导频插在每份的中心子载波位置, 如图 4(d). 5) 从子载波低频到高频以导频数递减的形式插入导频, 如图 4(e).

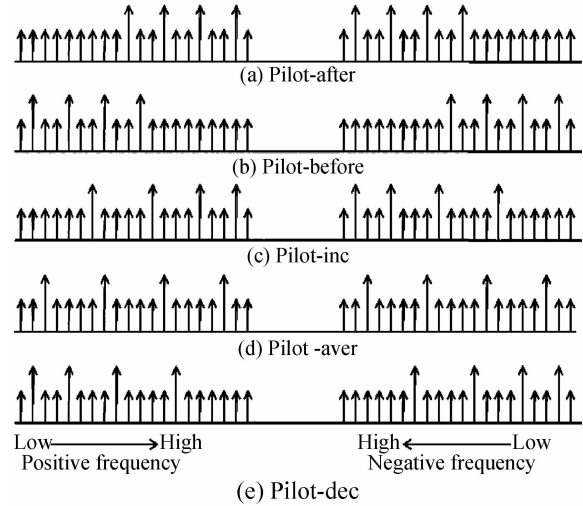


图 4 导频插入位置

Fig. 4 Pilot arrangements

2 仿真分析与讨论

为了验证算法估计和补偿的效果, 利用 Matlab 和 Optisystem 进行了联合仿真. 在发射端系统传输的 OFDM 帧由 160 个 OFDM 符号和两个训练序列组成, 每个 OFDM 符号包含 200 个数据子载波, 直流及高频子载波置零. 首先利用 Matlab 产生时域 OFDM 波形, 其中包括产生二进制伪随机序列, 然后映射 16-QAM 符号, 通过串到并的变换, 输入到 256 点的 IFFT, 最后插入循环前缀 1/8 IFFT 长度的 CP. DAC 时钟频率为 5 GHz, Optisystem 数据速率为 24 Gb/s. 将电域 OFDM 符号通过 I/Q 调制器调制到光载波上, 激光器输出波长为 1 550 nm, 线宽为 100 kHz. 光 OFDM 信号经过增益为 20 dB, 噪声因数为 4dB 的 OA 后输入到 100 km 的标准单模光纤 (Standard Single-Mode Fiber, SSMF) 链路中, 光纤色散系数为 16.75 ps/nm/km.

在接收端首先通过一个光衰减器和放大器获得不同光功率和光信噪比 (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) 的光 OFDM 信号, 然后经过光混频器和光检测器 (Photoelectric Detector, PD) 得到电基带 OFDM 信号. 得到电信号后进行 DSP 运算, 首先将得到的电信号通过线性 16 倍的插值^[13], 从中提取带有采样时钟偏差的数据; 然后利用训练序列进行符号同步和信道估计; 再经过 FFT 运算和其他补偿, 在频域空间进行采

样时钟偏差引起的子载波相位旋转的估计和补偿;最后解调和解映射得到二进制数据,计算误码率和比较不同导频插入位置对算法误码率表现的影响。

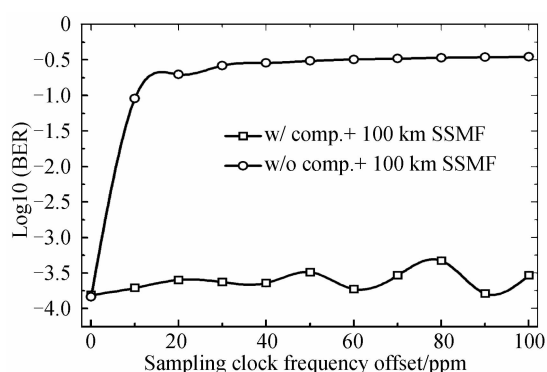


图5 传输100km 光纤链路后误码率与 SCFO 曲线
Fig. 5 BER versus SCFO, SSMF=100km

导频估计和补偿算法的仿真结果见图5.由图5可知,随着 SCFO 的不断增大,系统误码率也逐渐增大,通过算法补偿后的误码率可以稳定在 $10^{-3.5}$ 数量级。

图6中随着 SCFO 的增加,子载波相位的旋转越来越大,一个或者多个采样点就偏离了原来的位置,引起子载波间的串扰.采样时钟频率相差 100 ppm 即 ± 5 MHz 时,未对 SFO 补偿的解调信号星座图如图6(a)和6(b)所示,补偿后的星座图见图6(c)和6(d),补偿效果明显。

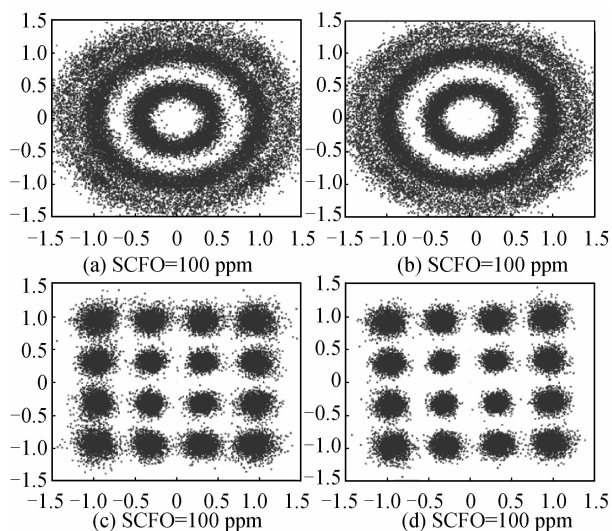


图6 星座图

Fig. 6 Constellation diagram

在偏移量为 100 ppm 的情况下,不同 OSNR 下系统误码率的表现如图7.经过 100 km 的光纤链路,当 SCFO = -100 ppm 时,效果差的原因是接收端 ADC 采样时钟频率小,在 FFT 周期内 OFDM 符号引入了一个 OFDM 符号的部分 CP,破坏了子载波之间的正交性,从而引入 ICI,导致系统性能下降.虽然可以通过添加循环后缀来避免这种情况,但是会增加系统成本.在采样频率偏移 ± 5 MHz 时经过算法补偿后系统误码

率表现和没有 SCFO 的系统误码率表现接近,在 $BER=10^{-4}$, SCFO = +5 MHz 下算法的系统 OSNR 损耗小于等于 1 dB.

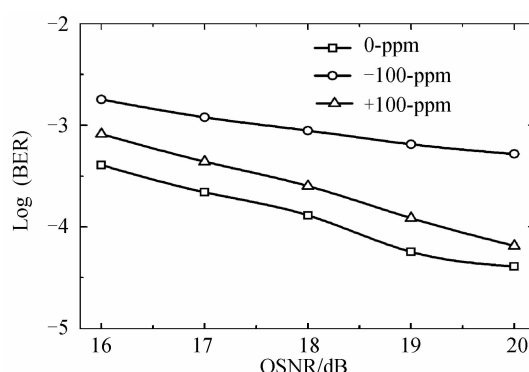


图7 误码率曲线
Fig. 7 BER versus OSNR

经过 100 km 的标准 SSMF 光纤传输后,算法在不同的导频插入位置情况下的系统误码率见图8.在 SCFO 小于 700 ppm 时,平均插入效果最好,达到了 10^{-4} 数量级,这是因为在每个 OFDM 符号的所有数据子载波里导频均匀分布,每个导频左右两边子载波数量一样,子载波相位旋转和子载波索引是线性关系,利用 LS 估计的 s_i 也较准确,补偿更好.但是随着 SCFO 的增加补偿效果反而变差,导频以递减的形式插入和插在低频位置的情况下,即使在 SCFO 很大时算法仍然能有不错的补偿效果.由于 CORDIC^[24] 算法的估计范围为 $(-\pi, \pi)$, 如果超过这个范围会引入更多的 ICI 或者 ISI, 因此可以通过提前或者延后一个采样点保证子载波相位旋转在 $(-\pi, \pi)$ 内.随着 SCFO 增大和系统噪声的影响,高频子载波相位的旋转就会超过这个范围,估计的 s_i 产生误差,系统性能下降.当 SCFO 增大到算法在导频平均插入的情况下不能有效补偿 SCFO 的时候,导频应尽量插在低频位置。

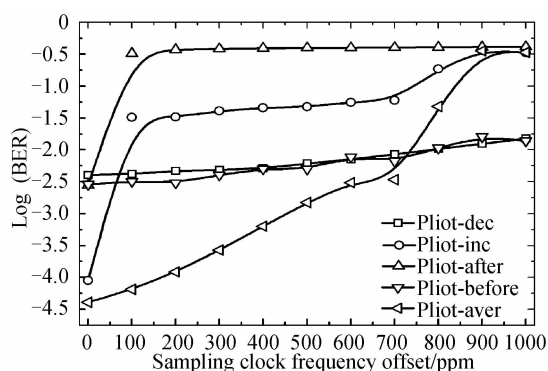


图8 不同导频插入位置下误码率与 SCFO 曲线
Fig. 8 BER versus SCFO with different pilot arrangements

3 结论

本文将无线通信里的利用导频进行采样时钟频率偏差的估计和补偿算法应用到相干光 OFDM 系统中,

只需要利用 DSP 技术进行处理就可以在频域直接对采样时钟频率偏差进行补偿,不需要额外的反馈环路,系统复杂度和成本都较低,可扩展性强.同时研究了不同导频插入位置时算法补偿效果.仿真结果表明本文的算法即使在较大的采样时钟频率偏差的情况下也能有较好的误码率表现,同时 $BER=10^{-4}$ 时 OSNR 损耗小于等于 1 dB.不同的导频插入位置会对算法补偿效果产生影响,在较小的 SCFO 情况下,导频平均插入相比其他插入方式下算法补偿效果要好,而将导频尽量插在低频位置能够补偿更大的采样时钟频率偏差.

参考文献

- [1] CVIJETIC N, QIAN D, HU J. 100 Gb/s optical access based on optical orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, **48**(7):70-77.
- [2] QIAN D, CVIJETIC N, WANG T. Novel optical OFDM transceiver structures [C]. *Opto Electronics and Communications Conference*, 2010:470-471.
- [3] CVIJETIC N. OFDM for next-generation optical access networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4):384-398.
- [4] HU Shan-mei, CHEN Lin. A radio over fiber system with frequency sextuple optical millimeter-wave generation carrying OFDM signal utilizing phase modulator. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4):699-703.
胡善梅,陈林.基于相位调制器产生六倍频光毫米波的 OFDM 信号光传输系统研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4):699-703.
- [5] GAO Yang, CHEN Lin, YU Jian-jun. Research on performances of LDPC coded OFDM in long reach and multi-mode fiber access network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2):162-168.
高扬,陈林,余建军.长距离和多模接入网络中低密度奇偶校验-正交频分复用的性能研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2):162-168.
- [6] ZHANG Chao-li, CHEN Lin, SHAO Yu-feng, et al. An optical packet switching system with a novel scheme for using optical OFDM label signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1):84-88.
张超俐,陈林,邵宇丰,等.采用 OFDM 信号作为标记的光分组交换方案[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1):84-88.
- [7] QU Liang, SHI Zhi-guo, GU Yu-jie, et al. Easy-hardware-implementation algorithm of sampling frequency synchronization in OFDM systems [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, **41**(06):935-940.
曲亮,史治国,顾宇杰,等.易于硬件实现的 OFDM 系统采样频率同步算法[J]. *浙江大学学报*, 2007, **41**(06):935-940.
- [8] JIN X Q, TANG J M. First experimental demonstration of real-time optical OFDM synchronization with sampling clock offset compensation capability in 11.25 Gb/s IMDD systems [C]. *Asia Communications & Photonics Conference & Exhibition*, 2010, Postdeadline paper PD 4.
- [9] JANSEN S L, MORITA I, SCHENK T C W, et al. Coherent optical 25.8-Gb/s OFDM transmission over 4160-km SSMF [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(1):6-15.
- [10] GIDDINGS R, TANG J. World-first experimental demonstration of synchronous clock recovery in an 11.25 Gb/s real-time end-to-end optical OFDM system using directly modulated DFBs [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2011:OMS4.
- [11] GIDDINGS R P, TANG J M. Experimental demonstration and optimisation of a synchronous clock recovery technique for real-time end-to-end optical OFDM transmission at 11.25 Gb/s over 25km SSMF [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(3):2831-2845.
- [12] YI X, QIU K. Estimation and compensation of sample frequency offset in coherent optical OFDM systems [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(14):13503-13508.
- [13] SLISKOVIC M. Sampling frequency offset estimation and correction in OFDM systems [C]. *IEEE Electronics, Circuits and Systems*, 2001, **1**:437-440.
- [14] SLISKOVIC M. Carrier and sampling frequency offset estimation and correction in multicarrier systems [C]. *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2001, **1**:285-289.
- [15] SPETH M, FECHTEL S, FOCK G, et al. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study [J]. *IEEE Transactions Communications*, 2001, **49**(4):571-578.
- [16] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2009, **27**(3):324-327.
- [17] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10):587-589.
- [18] GUO Tian-guang, CHEN Lin, CHEN Ming, et al. Improved transmission performance for intensity modulation and direct detection baseband optical double side band orthogonal frequency division multiplexing systems with an pre-processing technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8):936-942.
郭天光,陈林,陈明,等.一种提高强度调制直接检测基带光双边带正交频分复用系统传输性能的预处理技术 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(8):936-942.
- [19] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. *IEEE Transactions Communications*, 1997, **45**(12):1613-1621.
- [20] ZOU W, YU J, XIAO J, et al. Direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing system with new training sequence [J]. *Frequenz*, 2012, **66**(1-2):27-32.
- [21] MINN H, AL-DHAHIR N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, **5**(5):1158-1168.
- [22] WANG X, YU J, CAO Z, et al. SSBI mitigation at 60GHz OFDM-ROF system based on optimization of training sequence [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9):8839-8846.
- [23] LAN M, YU S, LI W, et al. A LMMSE channel estimator for coherent optical OFDM system [C]. *Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2009:76321B.
- [24] ANDRAKA R. A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers [C]. *Sixth International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*, 1998:191-200.