

基于小波降噪和改进ISFA的CO-OFDM信道估计方法

刘剑飞 石慧敏 曾祥焯 卢 嘉 王蒙军 刘蓓蕾 魏春歌

河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

摘要 提出了一种基于小波降噪与改进的符号内频域平均(ISFA)联合的相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统信道估计方法。该方法利用最小二乘(LS)方法进行信道估计,并对估计后的结果进行小波去噪处理,最后采用Kaiser窗函数改进ISFA算法对小波处理结果进行ISFA,完成联合去噪。仿真结果表明,该方法可以有效地提高信道估计精度。当光信噪比(OSNR)为17 dB时,该算法的误码性能(BER)比ISFA算法的误码性能提高将近一个量级。

关键词 光通信; 相干光正交频分复用; 信道估计; 小波变换; 符号内频域平均

中图分类号 TN911.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1205002

Channel Estimation Method Based on Wavelet and Improved ISFA for CO-OFDM Systems

Liu Jianfei Shi Huimin Zeng Xiangye Lu Jia Wang Mengjun Liu Beilei Wei Chunge

School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract A joint method of coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) channel estimation based on wavelet denoising and improved intra-symbol frequency domain average (ISFA) is proposed. This method can be divided into three steps. Firstly, channel estimation is performed by least square (LS) method; secondly, the wavelet denoising processing is made for the results of estimation; finally, ISFA algorithm improved by Kaiser-window function is applied to the wavelet processing results. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the precision of channel estimation. When the optical signal-tonoise ratio (OSNR) is 17 dB, bit error rate (BER) performance of the proposed method can be improved nearly one order of magnitude than that of ISFA method.

Key words optical communications; coherent optical orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; wavelet transform; intra-symbol frequency domain averaging

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.4510; 070.2615

1 引 言

正交频分复用(OFDM)作为一种多载波调制技术,其性能优越,能够有效地对抗符号间干扰(ISI)和信道间干扰(ICI),具有频谱效率高、对光纤链路的色散和偏振模色散抵抗性强、信号调制强和处理灵活等优点,因而OFDM技术被应用到光纤传输系统^[1-3]。OFDM技术结合相干检测技术后,还可大幅提高接收灵敏度,易于实现有效的信号均衡^[4]。为了在接收端更加准确地恢复发送数据,在相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统中进行信道估计是非常重要的。在CO-OFDM系统中,大多采用的是基于导频的最小二乘(LS)和线性最小均方误差(LMMSE)两种常规的信道估计算法。文献[5]指出,LS算法虽然简单,但是忽略了系统的噪声项;LMMSE算法比LS算法的误码率要低,但是算法的复杂度却比LS算法高很多。为提高LS信道估计算法的抗噪声能力,大多文献在LS算法的基础上,对其估计出的信道传输矩阵进行处理,以减小噪声对信道估计准确

收稿日期: 2015-05-07; 收到修改稿日期: 2015-07-02

基金项目: 天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)、河北省自然科学基金青年项目(F2014202036, F2015202331)、河北省高层次人才资助项目(C2013001048, C2013001048)

作者简介: 刘剑飞(1968—),男,博士,教授,主要从事光纤通信技术方面的研究。E-mail: jfliu@hebut.edu.cn

性的影响。陈颖等^[6]首次提出了在LS的基础上用滤波器降噪的估计方法,并用Blackman窗函数对这种估计方法进行了验证,但是其算法的主要思想是对信道冲激响应前后对调,然后再用整个窗函数去滤波,实现过程复杂。许义等^[7]提出了一种冲激响应加窗(IRW)的信道估计算法,该算法在算法复杂度提高并不大的前提下,系统误码率(BER)比LS算法降低了近1个数量级,但该方法只能滤除信道冲激响应以外的噪声。文献[8]在IRW方法的基础上,设计了一种相位噪声分析补偿算法,使用IRW算法滤除冲激响应长度以外的噪声后,对CO-OFDM系统相位噪声进行分析和估计,进一步补偿信道冲激响应长度以内的相位噪声,得到更为准确的信道传递函数。时域平均方法(TDA)^[1]和符号内频域平均算法(ISFA)^[9]是两种经典的改进LS算法。TDA可以有效地降低噪声对信道估计的影响,提高系统的抗噪声能力,但需要发送较多的训练序列,造成系统开销较大。ISFA算法可以减少系统的开销,但这种算法在色散、偏振模色散大的情况下,性能会严重降低,为改善这种情况,文献[10-11]对ISFA算法进行了改进。文献[10]提出了一种新的联合降噪方案,即基于多小波去噪和符号内频域平均去噪的联合降噪方案,此方法在不需大量导频的情况下能取得较好的估计结果。文献[11]是通过利用Kaiser窗改善了ISFA算法的信道估计性能。

为了进一步改善噪声性能,本文采用小波与窗函数改进的ISFA相结合的方式对CO-OFDM系统信道估计。该方法首先利用LS方法进行信道估计,然后对估计后的结果进行小波去噪处理,最后采用改进ISFA算法对小波处理结果进行符号内频域平均,完成联合去噪。

2 CO-OFDM 系统结构

CO-OFDM系统的结构如图1所示,由射频OFDM发送端、光I/Q调制、光传输链路、相干检测、射频OFDM接收端五部分组成。图中S/P、P/S为串并转换和并串转换,RF为射频信号。IFFT和FFT分别表示快速逆傅里叶变换和快速傅里叶变换,GI为保护间隔[采用循环前缀(CP)实现],DAC和ADC为数模转换器和模数转换器。LPF为低通滤波器,PD为光电探测器,MZM为马赫-曾德尔调制器。

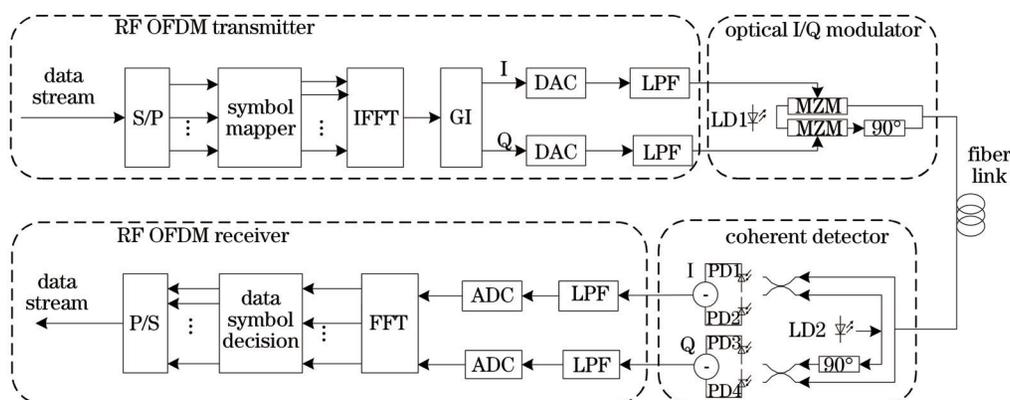


图1 CO-OFDM系统原理结构图

Fig.1 Schematic diagram of the CO-OFDM system

在接收端,收到的基带信号可以记为

$$r(t) = \exp(j\omega_{\text{off}}t)s(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 和 $r(t)$ 分别表示发送和接收的信号, ω_{off} 是光载波和本振光的频率差, $\exp(j\omega_{\text{off}}t)$ 是由发送端和接收端相位不同步产生的相位噪声, $h(t)$ 表示整个信道的冲激响应, $n(t)$ 表示噪声信号。

假设发送端和接收端的频差为0,即没有相位噪声,由于OFDM是通过IFFT/FFT实现的,接收端和发送端的信号可以由它的取样符号代替,即

$$c'_{ki} = c_{ki} \cdot h_{ki} + n_{ki}, \quad (2)$$

式中, c_{ki}/c'_{ki} 分别表示发送端/接收端第 k 个载波上的第 i 个取样符号, h_{ki} 表示第 k 个子信道上的第 i 个取样值。信道估计就是求得信道的冲激响应或者传递函数,然后在接收端通过接收信号和信道估计值恢复发送端的数据。显然,信道估计的质量决定着通信系统的性能。

3 理论分析

3.1 Kaiser窗改进的ISFA算法

OFDM系统模型可表示为

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{X}_p \mathbf{H} + \mathbf{W}_p, \quad (3)$$

式中 \mathbf{H} 为信道响应, \mathbf{X}_p 为已知的导频发送信号, \mathbf{Y}_p 为接收到的导频信号, \mathbf{W}_p 为在导频子信道上叠加的噪声矢量。

采用最小二乘(LS)算法对OFDM系统进行信道估计就是对(3)式中的参数 \mathbf{H} 进行估计,定义代价函数为

$$J = (\mathbf{Y}_p - \hat{\mathbf{Y}}_p)^H (\mathbf{Y}_p - \hat{\mathbf{Y}}_p) = (\mathbf{Y}_p - \mathbf{X}_p \hat{\mathbf{H}})^H (\mathbf{Y}_p - \mathbf{X}_p \hat{\mathbf{H}}), \quad (4)$$

即要求代价函数最小,则

$$\frac{\partial \left[(\mathbf{Y}_p - \mathbf{X}_p \hat{\mathbf{H}})^H (\mathbf{Y}_p - \mathbf{X}_p \hat{\mathbf{H}}) \right]}{\partial \hat{\mathbf{H}}} = 0, \quad (5)$$

式中 $\hat{\mathbf{Y}}_p = \mathbf{X}_p \hat{\mathbf{H}}$ 是经过信道估计后得到的导频输出信号, $\hat{\mathbf{H}}$ 是信道响应 \mathbf{H} 的估计值。由此可以得到LS算法的信道估计值为

$$\hat{\mathbf{H}}_{p,LS} = (\mathbf{X}_p^H \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{Y}_p = \mathbf{X}_p^{-1} \mathbf{Y}_p. \quad (6)$$

可见,LS估计只需要知道发送信号 \mathbf{X}_p ,不需知道参数 \mathbf{H} 、观测噪声 \mathbf{W}_p 以及接收信号 \mathbf{Y}_p 的其他统计特征,因此LS信道估计算法的最大优点是结构简单,计算量小,仅通过在各载波上进行一次除法运算即可得到导频位置子载波的信道特征。但是,LS估计算法由于在估计时忽略了噪声的影响,所以信道估计值对噪声干扰以及ICI的影响比较敏感。在信道噪声较大时,估计的准确性大大降低,从而影响数据子信道的参数估计。

采用ISFA算法能有效地降低噪声的影响,提高信道估计的精度。ISFA处理后,每个子载波的信道矩阵都是其本身和邻近子载波信道矩阵的平均。即对于第 q 个子载波,信道矩阵是子载波 q 和 m 个左邻以及 m 个右邻,总共 $2m+1$ 个邻近子载波信道矩阵的平均。ISFA处理后的第 q 个子载波的信道矩阵可表示为

$$\mathbf{H}(k') = \frac{1}{\min(k_{\max}, k' + m) - \max(k_{\min}, k' - m) + 1} \sum_{k'=m}^{k'+m} \mathbf{H}(K), \quad (7)$$

式中 k_{\max} 和 k_{\min} 分别是最大和最小子载波序号,式中右端求和中超出 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 的子载波不存在,他们的信道矩阵设置为零。

ISFA方法相当于采用矩形窗对LS信道估计结果进行加窗平滑,如果将矩形窗扩展为Kaiser窗,增加了一个可控参数,可以在窗长度和平滑效果之间进行有效的折中。

Kaiser窗的定义为

$$w(n) = \begin{cases} \frac{I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(\frac{n-m}{m} \right)^2} \right]}{I_0(\beta)}, & 1 \leq n \leq 2m+1 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $I_0(\cdot)$ 表示第一类零阶修正Bessel函数。Kaiser窗有两个参数,长度参数 $2m+1$ 和形状参数 β ,调整这两个参数就可以调整窗的长度和形状。

采用Kaiser窗改进后的符号内频域平均方法表示为

$$[\mathbf{H}(q)]_{\text{ISFA-K}} = \frac{\mathbf{H}(k') \cdot w(k' - q + m + 1)}{\sum_{n=1}^{2m+1} w(n)}, \quad (9)$$

式中右端求和中超出 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 的子载波不存在,他们的信道矩阵设置为零,相应位置的窗函数权值也置为零。

3.2 小波降噪

小波变换是一种在时域和频域均为局部变换的分析方法,通过伸缩运算和平移运算,在多尺度上对信号进行分析。经过小波变换后,可以认为幅值较大的小波系数(近似小波系数)主要是有用信号系数,幅值较

小的系数(细节小波系数)主要是噪声系数。因此,对LS算法得到的含噪信道估计值 $\hat{\mathbf{H}}_{p,ls}$ 进行小波变换,得到细节小波系数后,对其进行阈值处理,再进行逆小波变换进行信号重构即可达到去噪的目的。进行离散小波变换的公式如下:

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h^*(n-2k), \quad (10)$$

$$d_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} g^*(n-2k), \quad (11)$$

式中 $c_{j,k}$ 是近似小波系数, $d_{j,k}$ 为细节小波系数, j 是分解层次, $h(n)$ 和 $g(n)$ 是正交镜像滤波器组。相应的逆小波变换为

$$c_{j-1,n} = \sum_n c_{j,n} h(k-2n) + \sum_n d_{j,n} g(k-2n). \quad (12)$$

通过小波变换,可以对LS算法得到的信道估计值进行去噪处理,从而提高信道估计的精度。

3.3 联合处理

如前所述,首先采用LS算法得到导频处的信道估计值,然后进行小波去噪,再应用改进ISFA进行符号内频域平均,从而完成信道估计的联合去噪。由(9)式可知,对小波去噪后的信道响应 $\hat{\mathbf{H}}_{1,p}$ 进行符号内频域平均,可得信道矩阵为

$$[\mathbf{H}(q)]_{\text{ISFA-K}} = \frac{\hat{\mathbf{H}}_{1,p}(k') \cdot \mathbf{w}(k' - q + m + 1)}{\sum_{n=1}^{2m+1} \mathbf{w}(n)}. \quad (13)$$

在算法的复杂度上,联合算法和基本的ISFA算法相比较,多做了一次小波去噪和窗函数处理,算法增加的复乘次数仅在 N 的数量级上(N 代表数据大小),因此其复杂度提高并不大。

4 仿真结果与性能分析

在VPI仿真平台上搭建CO-OFDM仿真系统,结合Matlab进行数字信号处理,在没有进行色散预先补偿的情况下实现CO-OFDM系统信道估计。小波去噪采用小波基Daubechies9,对信号进行三层分解,阈值为 $\delta \sqrt{2 \ln N} / \exp[(j-1)/2]$ (N 为分解层数, j 表示分解尺度),并采用软阈值处理方式,插入导频为块状导频,仿真参数如表1所示,表示PN为伪噪声。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
PN sequence	$2^{17}-1$	Power /W	0.0035
Sample rate f_s /GHz	40	Emission frequency /THz	193.1
Bit rate /(Gb/s)	80	Attenuation /(dB/km)	0.22
Modulation mode	4QAM	Dispersion /[ps/(nm·km)]	17
Frame length N_{SPF}	32	Dispersion slope /[ps/(nm ² ·km)]	0.08
FFT number N_{FFT}	2048	PMD coefficient /[ps/km ^{1/2}]	0.2
Carriers number N_c	1280	Nonlinear index /[m ² /W]	2.6×10^{-20}
CP length N_{CP}	512	Gain /dB	22.52
Fiber length /km	1000	Responsivity /(A/W)	1.0

由ISFA算法原理可知,参数 m, β 的值不同,信道估计的精度不同。图2(a)~(e)为低光信噪比下系统在不同信道条件下采用ISFA估计算法得到的误码率随参数 m 的变化,从图可知,在不同的信道条件下, m 的最佳取值分别是{6, 5, 4, 6, 6}。

为确定改进ISFA算法中参数 β 的值,选定最佳窗函数长度 m 的值,在不同信道条件下通过仿真测试不同 β 值时改进ISFA信道估计的误码率性能。如图3(a)~(e)所示,在不同的信道条件下, β 的最佳取值分别是{2, 2, 1, 3, 2}。

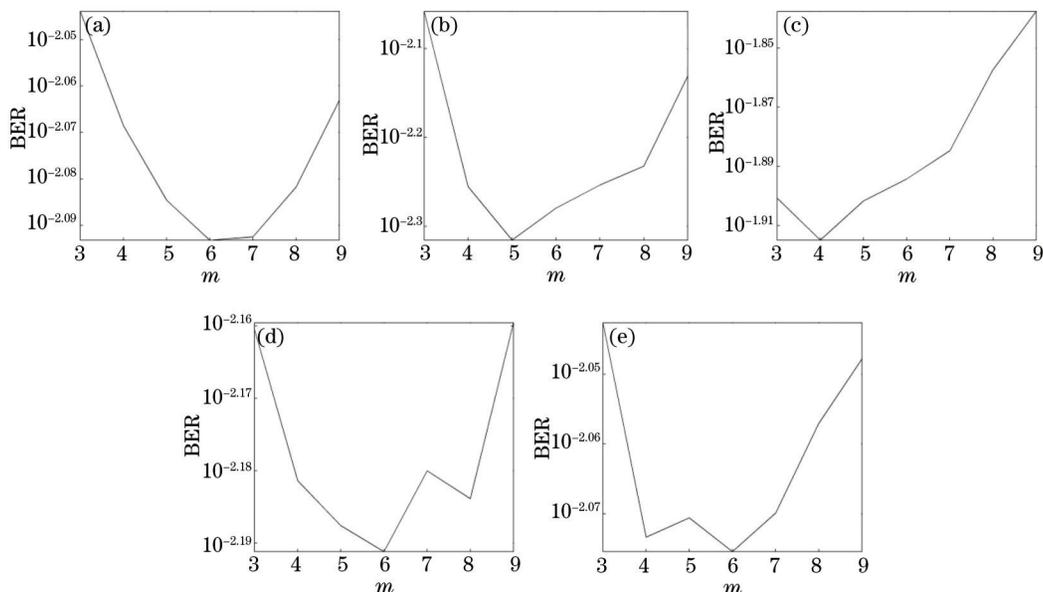


图2 不同信道条件下BER随参数 m 的变化。(a)色散(CD);(b)偏振模(PMD);(c)色散和偏振模;(d)非线性(NL);(e)色散、偏振模和非线性

Fig.2 BER curves versus m under different channel conditions. (a) CD; (b) PMD; (c) CD and PMD; (d) NL; (e) CD, PMD and NL

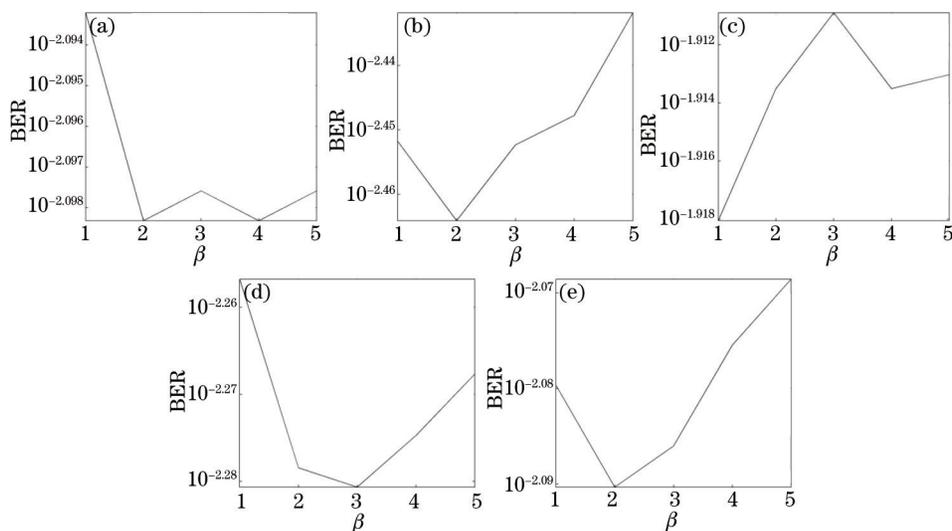


图3 不同信道条件下BER随参数 β 的变化。(a)色散;(b)偏振模;(c)色散和偏振模;(d)非线性;(e)色散、偏振模和非线性

Fig.3 BER curves versus β under different channel conditions. (a) CD; (b) PMD; (c) CD and PMD; (d) NL; (e) CD, PMD and NL

图4~图8为CO-OFDM系统在不同信道条件下不同算法的仿真结果。图中,Wavelet表示基于小波去噪

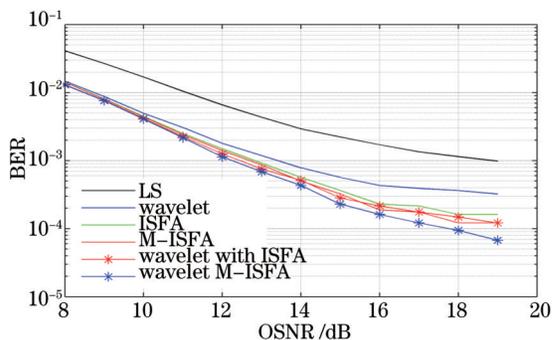


图4 CD条件下BER随OSNR的变化
Fig.4 BER curves versus OSNR under CD

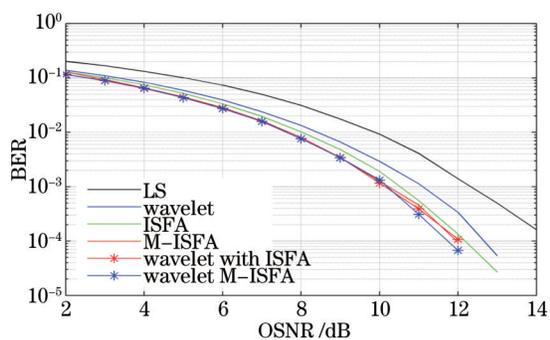


图5 PMD条件下BER随OSNR的变化
Fig.5 BER curves versus OSNR under PMD

的信道估计方法, M-ISFA 表示改进 ISFA 算法, Wavelet with ISFA 表示小波和 ISFA 联合算法, Wavelet with M-ISFA 表示小波和改进 ISFA 联合算法。

图 4 为系统在只有色散存在的条件下 BER 随光信噪比(OSNR)的变化。从图可知,当 BER 为 10^{-3} , Wavelet with M-ISFA 算法对系统信噪比的要求比 Wavelet with ISFA 算法低了 0.21 dB,比 M-ISFA 算法低了近 0.5 dB,比 ISFA 算法低了约 0.7 dB,且随着光信噪比的增大, Wavelet with M-ISFA 算法的性能越来越好。

图 5 为系统在只有偏振模色散存在的条件下 BER 随 OSNR 的变化。从图可知,当 BER 为 10^{-4} , Wavelet with M-ISFA 算法对系统信噪比的要求比 Wavelet with ISFA 算法低了 0.2 dB,比 ISFA 算法低了近 0.5 dB。

图 6 为系统在色散和偏振模色散同时存在的条件下 BER 随 OSNR 的变化。从图可知,当 BER 为 10^{-4} , Wavelet with M-ISFA 算法对系统信噪比的要求比 Wavelet with ISFA 算法低了 1.9 dB,比 M-ISFA 算法低了近 0.5 dB,比 ISFA 算法低了约 2.8 dB,且随着光信噪比的增大, Wavelet with M-ISFA 算法的性能越来越好。

图 7 为系统非线性效应存在的条件下 BER 随 OSNR 的变化。从图可知,当 BER 为 10^{-4} , Wavelet with M-ISFA 算法对系统信噪比的要求比 Wavelet with ISFA 算法低了 0.2 dB,比 M-ISFA 算法低了 0.25 dB,比 ISFA 算法低了约 0.5 dB。

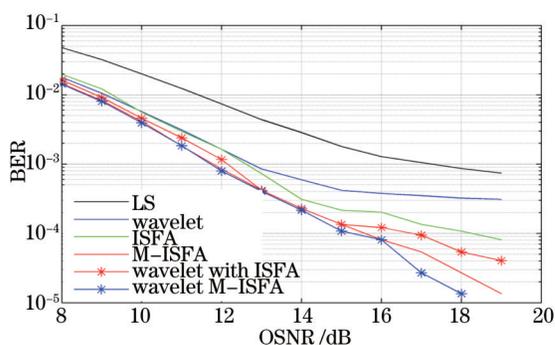


图 6 CD 和 PMD 同时存在条件下 BER 随 OSNR 的变化

Fig.6 BER curves versus OSNR under CD and PMD

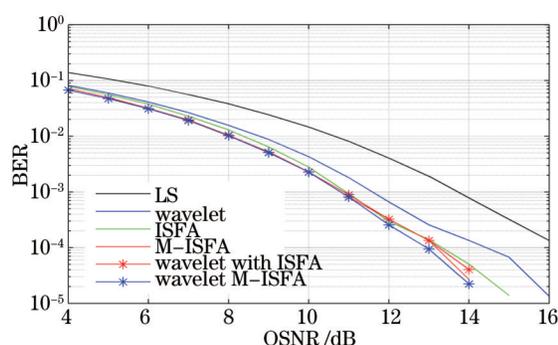


图 7 NL 条件下 BER 随 OSNR 的变化

Fig.7 BER curves versus OSNR under NL

图 8 为系统在色散、偏振模色散和非线性效应同时存在的条件下 BER 随 OSNR 的变化。从图可知,当 BER 为 10^{-4} , Wavelet with M-ISFA 算法对系统信噪比的要求比 Wavelet with ISFA 算法低了 1.7 dB,比 M-ISFA 算法低了近 2.1 dB,且随着光信噪比的增大, Wavelet with M-ISFA 算法的性能越来越好。

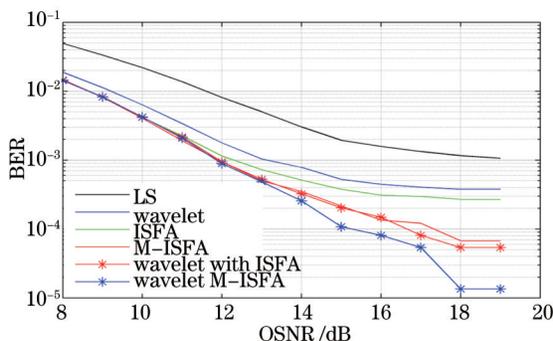


图 8 CD、PMD 和 NL 同时存在条件下 BER 随 OSNR 的变化

Fig.8 BER curves versus OSNR under CD, PMD and NL

5 结 论

本文提出了一种基于小波与窗函数改进的 ISFA 联合的 CO-OFDM 系统信道估计方法。该方法采用小波变换对 LS 算法的估计值进行降噪,并利用窗函数改进的 ISFA 做符号内频域平均,完成联合去噪。仿真结果表明在同等条件下的,通过小波和改进的 ISFA 联合算法提高了信道估计的精度,改善了系统性能,而运算复杂度并不大,因此该算法可用于 CO-OFDM 系统信道估计。

参 考 文 献

- 1 W Shieh, H Bao, Y Tang. Coherent optical OFDM: Theory and design[J]. Opt Express, 2008, 16(2): 841–859.
- 2 Li Yongzhi, Xiao Jiangnan, Chen Ming, *et al.*. Experiment for optical orthogonal frequency division multiplexing system peak to average power ratio reduction with a new scheme using dummy subcarriers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706020.
李勇志, 肖江南, 陈 明, 等. 基于虚拟子载波降低光正交频分复用信号峰均功率比新方法的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706020.
- 3 Lu Jia, Hu Yuanyuan, Liu Jianfei, *et al.*. All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization multiplexing OFDM signal in SOA[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205005.
卢 嘉, 胡园园, 刘剑飞, 等. 基于 SOA 的平行双抽运结构偏振复用 OFDM 信号的全光波长变换[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205005.
- 4 Wang Lingzi, Tang Xianfeng, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision-feedback in PDM-CO-OFDM systems[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305001.
王凌子, 唐先锋, 张晓光, 等. PDM-CO-OFDM 系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001.
- 5 Shieh W, Yi X, Ma Y, *et al.*. Coherent optical OFDM: Has its time come (Invited)[J]. Journal of Optical Networking, 2008, 7(3): 234–235.
- 6 Chen Ying. Channel Estimation Technology in PDM-CO-OFDM Systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011: 47–58.
陈 颖. 偏振复用相干光 OFDM 系统信道估计技术的研究及仿真[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 47–58.
- 7 Xu Yi, Li Li, Han Shan, *et al.*. Channel estimation for CO-OFDM system based on impulse response processed with window[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(10): 1901–1908.
许 义, 李 莉, 韩 珊, 等. 基于冲激响应加窗法的 CO-OFDM 系统信道估计研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10): 1901–1908.
- 8 Su Zhenzhen, Xu Yi, Dong Ying. Channel estimation based on analysis of phase noise compensation for CO-OFDM system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(11): 2135–2142.
苏真真, 许 义, 董 颖. 基于相位噪声分析补偿的 CO-OFDM 系统信道估计研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(11): 2135–2142.
- 9 Liu X, Buchali F. Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM[J]. Opt Express, 2008, 16(26): 21944–21957.
- 10 Liu J, Li J, Zeng X, *et al.*. Scattered pilot-based channel estimation with joint noise reduction for PDM-CO-OFDM system[J]. Optik, 2013, 124(22): 5422–5426.
- 11 Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Wang Jingyi, *et al.*. An improved ISFA channel estimation algorithm[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(8): 1481–1487.
曾祥焯, 刘剑飞, 王静宜, 等. 一种改进的 ISFA 信道估计算法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(8): 1481–1487.

栏目编辑: 王晓琰