

文章编号: 0258-7025(2009)03-0592-05

多跨距非线性光纤链路中的小波去噪

邵群峰 漆晓琼 张晓萍

(兰州大学信息科学与工程学院现代通信技术研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要 在多跨距幅度调制光纤传输链路的接收端利用光滤波器对输出信号进行小波分解,并根据小波阈值去噪的原理,对输出信号在光域内进行小波去噪,以消除掺铒光纤放大器(EDFA)引入的放大自发辐射(ASE)噪声和光纤色散及非线性相互作用所产生的非线性噪声对信号的干扰。仿真模拟了三种不同光纤链路传输后输出信号的小波去噪,并在常见的色散补偿链路系统中与带通滤波去噪进行了比较。仿真结果说明了在光域内采用小波阈值去噪法的有效性和可行性,为提高全光通信系统的通信质量和容量提供了新的思路。

关键词 光通信;非线性噪声;小波阈值去噪;全光通信系统

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0592

Wavelet Denoising Applied in Multi-Span Nonlinear Fiber Links

Shao Qunfeng Qi Xiaoqiong Zhang Xiaoping

(Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract Optical wavelet decomposition was applied to the received amplitude-modulated signal transmitted through multi-span fiber links. Then the signal including nonlinear noise induced by the interaction of fiber nonlinearity and amplified spontaneous emission (ASE) noise was denoised in accordance with the theory of wavelet threshold denoise by means of optical filters. The procession mentioned above was simulated in three different fiber links and the signals after wavelet denoising and band-pass filter denoising respectively were compared in a common dispersion compensation system. The validity and feasibility of optical wavelet denoising was proved by the simulation results. It provides a novel solution to improve the quality and capacity of all-optic fiber communication systems.

Key words optical communication; nonlinear noise; wavelet threshold denoise; all-optic fiber communication

1 引言

高速长距离大容量光纤通信系统由于掺铒光纤放大器(EDFA)的出现和发展得以实现^[1],但是 EDFA 所产生的放大自发辐射(ASE)噪声在光纤色散和非线性效应的作用下与信号产生耦合并被放大形成非线性噪声,在多跨距级联系统中不断地积累,严重影响了光纤通信系统的通信质量和容量^[2,3]。J. P. Gordon 等^[4]分析了 ASE 噪声与非线性效应的相互作用对相移键控(PSK)系统的影响;为了消除非线性噪声,提出了基于最小均方根误差(MMSE)准则的线性非线性相位噪声补偿^[5],以及

最大似然序列估计(MLSE)等在电域内可实现的信号去噪的方法^[6]。虽然电域去噪的方法易于实现,但是电子电路处理速度瓶颈的存在以及光-电和电-光转换过程,使其无法应用于传输速度日益提高的光纤通信系统。如果采用光学滤波器,不需要进行光-电和电-光转换,直接在光域内实现去噪。文献^[7]提出了将维纳(Wiener)滤波的方法应用于消除非线性噪声,为提高光纤系统的容量提供了新的思路,但是其在光域内的实现仍然存在一定的难度。1999年,T. Olson 等^[8]提出在光纤通信中利用小波变换的时频分析特性对信号进行调制和复用的理

收稿日期:2008-05-28;收到修改稿日期:2008-08-03

基金项目:新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0981)资助项目。

作者简介:邵群峰(1982—),男,博士研究生,主要从事高速大容量光纤通信系统的非线性补偿的研究。

E-mail: shaoqf05@lzu.cn

导师简介:张晓萍(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信系统及光电技术的研究。E-mail: zxp@lzu.edu.cn

论,2005 年 G. Cincotti 等^[9,10]利用光学 Daubichies 滤波器实现光信号的小波分解并调制。本文将小波分析用于多跨距非线性光纤链路中的信号滤波,在链路的接收端,通过光学 Daubichies 滤波器实现对光信号的小波分解和高分辨率分析,并分别对不同的光纤链路采用基于小波阈值去噪的方法对接收端的信号进行去噪处理。研究结果表明小波去噪法可以有效地去除非线性噪声的影响,改善接收端信号的质量。

2 多跨距光纤链路中的非线性噪声

一个典型的多跨距光纤传输链路模型如图 1 所示,它由多个单跨距传输单元组成, T_x 为发送端, R_x 为接收端;其中每个单元包含一段传输光纤和一个掺铒光纤放大器;每一个 EDFA 所产生的 ASE 噪声将与有用信号在下一个传输单元内,在光纤的色散和非线性的作用下产生耦合,噪声功率将被有用信号放大。设 $A_m(t)$ 为第 m 个跨距的输出,同时也是第 $m+1$ 个跨距的输入,根据微扰理论,可得递推公式

$$A_m(t) = GA_{m-1}(t) \otimes h_d(t, L) + n(t) - i\gamma \int_0^L |GA_{m-1}(t)|^2 [GA_{m-1}(t)] \otimes h_d(t, z) dz, \quad (1)$$

式中

$$h_d(t, z) = F^{-1} \left[\exp \left(-\frac{j}{2} \omega^2 \beta_2 z + \frac{j}{6} \omega^3 \beta_3 z - \frac{\alpha}{2} z \right) \right],$$

β_2 为光纤的二阶色散参数, β_3 为三阶色散参数, α 为光纤的衰减, z 表示传输的距离, L 为每个跨距内光纤的长度, γ 为光纤的非线性系数; G 为 EDFA 的增益, $n(t)$ 为其引入的 ASE 噪声。按照(1)式从输入信号 $A_0(t)$ 向输出端递推,将会在迭代的过程中产生包含 $|GA_m(t)|^2 n(t)$ 的项,它表示的正是在光纤非线性作用下, ASE 噪声与信号耦合,并被信号放大产生非线性噪声的这一过程。由于在传输过程中,非线性效应不断累积,同时经过多个 EDFA 后, ASE 噪声不断地被加入,非线性噪声也将不断地累积增加,经 N 个跨距后输出的信号 $A_N(t)$ 将包含有用信

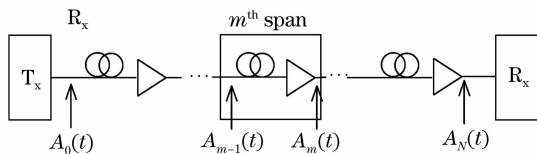


图 1 多跨距光纤传输链路模型

Fig. 1 Module of multi-span fiber transmission system

号以及非线性乘性噪声。

3 多跨距光纤链路中小波去噪的实现

为了在接收端将有用信号从 $A_N(t)$ 中恢复出来,对信号 $A_N(t)$ 采用基于小波多分辨率分析的小波去噪以去除非线性噪声。小波变换因为它的低熵性、多分辨率特性、去相关性以及选基的灵活性在图像、信号去噪领域内受到了越来越多的关注。小波阈值去噪方法是最早被提出的,它是一种基于小波变换多分辨率分析的实现简单而效果较好的去噪方法。设 $h(n)$ 和 $g(n)$ 是用来实现信号小波分解的一对正交镜像滤波器的传递函数,它们满足 $g(n) = (-1)^{1-n}h(1-n)$ 。设 $A_{N,0}(n)$ 为 $A_N(t)$ 的离散化表示,则对信号进行 j 层小波分解可用递推公式表示^[11]

$$A_{N,j}^c(n) = \sum_k A_{j-1}^c(k)h(2n+k), \quad (2)$$

$$A_{N,j}^d(n) = \sum_k A_{N,j-1}^c(k)g(2n+k), \quad (3)$$

$A_{N,j}^c(n)$ 为逼近信号, $A_{N,j}^d(n)$ 为细节信号, $A_{N,0}^c(n) = A_{N,0}(n)$ 。在小波分析中 $h(n)$ 又称为尺度滤波器,与其对应的 $g(n)$ 用来构造小波母函数,最常用的是由数学家 Daubichies 所提出的 Daubichies 小波。图 2 是 K. Jinguji 和 M. Oguma 在 2001 年提出,用级联的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)制成用于光域内的二阶 Daubichies 数字滤波器,用以实现对光信号在光域内进行如(2)和(3)式所表示的三层小波分解^[9],即 $j=1,2,3$ 。图 2 中共有三个滤波器,用以实现三层小波分解;每个滤波器由两个 MZI 以及 3 dB 耦合器和相移器构成, $\Delta\tau$ 表示 MZI 两臂上的单位路径时延。

对于很大一类信号而言,它们的能量高度集中在信号小波分解后的逼近信号中,而噪声由于其随机性能量大部分被包含在细节信号中。小波阈值去噪就是对小波分解后的细节信号的系数进行抑制处理,然后通过处理后的细节信号和逼近信号反变换重构出去噪后的信号^[11]。对于在幅度调制-直接检测(IM-DD)的光纤通信系统中传输的初始高斯脉冲信号而言,幅度是连续变化的,在没有非线性和噪声的作用时不存在信号的阶跃和突变,所以在对接收端受到干扰的脉冲信号去噪时,可以采取将其所有的细节信号 $A_{N,j}^d(n)$ 置零,然后在进行信号重构时只使用其逼近信号的办法来达到去除信号噪声的目的,其重构的递推公式为

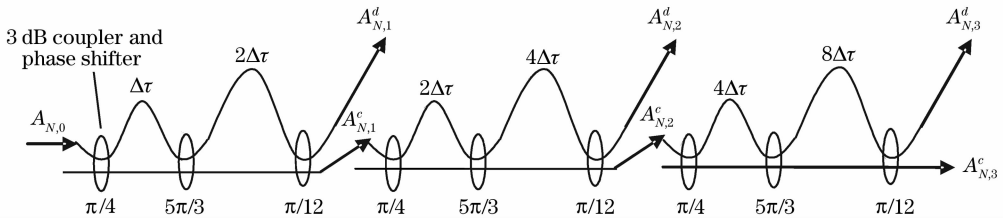


图2 用以实现三层小波分解的4阶 Daubichies 滤波器组的光学结构

Fig. 2 Optical architecture of 4th order Daubichies filters to realize 3-level wavelet decomposition

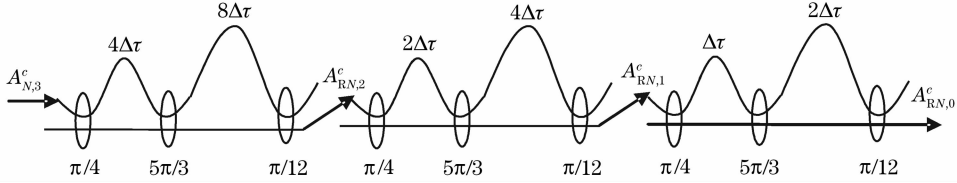


图3 用以实现三层小波重构的4阶 Daubichies 滤波器组的光学结构

Fig. 3 Optical architecture of 4th order Daubichies filters to realize 3-level wavelet reconstruction

$$A_{RN,j-1}^c(n) = \sum_k h(n-2k)A_{RN,j}^c(k), \quad (4)$$

重构时的初始信号 $A_{RN,3}^c(n) = A_{N,3}^c(n)$, 按(4)式递推, 就可以得到去噪后的信号 $A_{RN,0}^c(n)$ 。这一重构递推过程也可以由与图2类似的光学结构图3来实现。

4 接收端信号小波去噪的仿真结果

为了验证在光域内对色散非线性信道接收端的光信号进行小波去噪的效果, 对40 Gbit/s, 50 km × 10 传输距离的光纤传输链路在 VPI 内进行了模拟并对输出信号进行了小波去噪处理。设输入的初始脉冲 $A_0(t)$ 为三个相邻的高斯脉冲, 它们的 $1/e$ 强度点半峰全宽 $T_0 = 9$ ps, 峰值功率为10 mW; MZI 两臂上的单位路径时延差 $\Delta\tau = 9/16$ ps。下述各链路中光纤的参数如表1所示。

表1 各种光纤的参数

Table 1 Parameter of different type fibers

	Dispersion /(ps/(nm·km))	Dispersion slot /(ps/(nm ² ·km))	Effective area /μm ²
DSF	0	0.08	80
SMF	16	0.08	80
DCF	-80	0.21	30

DSF: dispersion shifted fiber; SMF: single-mode fiber;

DCF: dispersion compensate fiber.

首先, 为了弄清小波去噪对非线性噪声的作用, 先在不考虑光纤二阶和三阶色散的情况下进行模拟。此时光纤信道中只有非线性效应, EDFA 的 ASE 噪声及二者的相互作用对脉冲造成的影响, 模拟结果如图4所示, 图中实线为输入初始脉冲, 点线

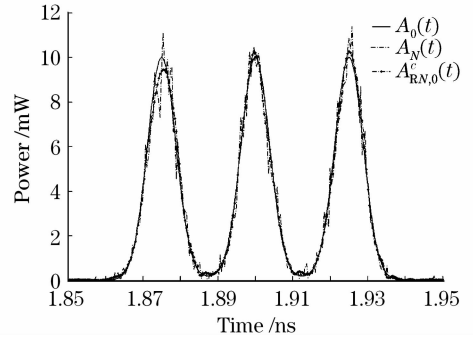


图4 初始脉冲与其在经过无色散光纤传输后的接收信号及经过小波去噪后的信号比较

Fig. 4 Comparison of input signal, signal before wavelet denoising and signal after denoising in the fiber links without any dispersion

表示受到非线性与噪声影响的接收端脉冲 $A_N(t)$, 在光域内直接将 $A_N(t)$ 送入光滤波器, 经过了 Daubichies 小波的三层分解, 得到逼近信号 $A_{N,3}^c(t)$, 再将其送入光滤波器重构后得到去噪后的脉冲 $A_{RN,0}^c(t)$, 如图中点划线所示。从图4中可以看出, 小波去噪能够有效地平滑脉冲, 去除非线性噪声对脉冲的影响。用归一化能量偏差来定量地衡量去噪后的脉冲波形与初始脉冲逼近程度, 其定义为

$$d = \frac{\int |s(t) - s_0(t)|^2 dt}{\int |s_0(t)|^2 dt}, \quad (5)$$

式中 $s_0(t)$ 为初始信号波形, $s(t)$ 为待比较的信号波形。由(5)式可以分别求得在接收端小波去噪前后的接收信号与初始信号的归一化能量偏差为0.0127和0.0030, 去噪后比去噪前减少了0.0097。

其次, 考虑色散位移光纤(DSF)链路的情况, 此

时的光纤链路中不含二阶色散,但是包含有三阶色散,模拟结果如图 5 所示。由图 5 看到,由于 DSF 光纤的二阶色散为零,此时三阶色散的主要作用,是导致脉冲在中心位置的一侧产生了较为严重的拖尾和脉冲中心位置的抖动,又由于非线性噪声的作用使得后两个脉冲的峰值部位发生了分裂。经过小波去噪之后,脉冲被有效地平滑,并且后两个脉冲的峰值位置的分裂也被消除,但是脉冲的拖尾和中心抖动并没有得到较好的改善。此时,小波去噪前后的接收信号与初始信号的归一化能量差分别为 0.1173 和 0.0919,去噪后比去噪前减少了 0.0254。

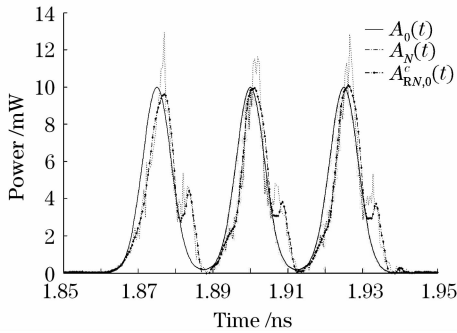


图 5 初始脉冲在经过 DSF 光纤传输后的接收端信号及经过小波去噪后的信号比较

Fig. 5 Comparison of input signal, signal before wavelet denoising and signal after denoising in the fiber links of DSFs

目前使用最广泛的光纤是常规单模传输光纤 (SMF),它的二阶色散和三阶色散均不为零,此时二阶色散起主要作用,随着传输距离的增加,光纤信道中的累积色散也随之增加,因此,通常采用色散补偿光纤 (DCF) 对其二阶色散进行分布式补偿。对一种常用的后补偿方案 (每个跨距为 SMF + DCF + EDFA) 进行模拟,对其接收端的信号进行小波去噪后得到如图 6 所示的结果。信号在经过色散补偿系统传输后,虽然色散得到补偿,但是非线性的影响却累积下来,再与每个传输单元的 EDFA 所引入的 ASE 噪声作用,导致了脉冲在时域内多峰,经小波去噪后,多峰的情况明显被消除,但是由于链路中存在三阶色散,所以峰值抖动的情况依然存在。此时,小波去噪前后的接收信号与初始信号的归一化能量差分别为 0.2770 和 0.2194,去噪后比去噪前减少了 0.0576。

为了进一步验证小波去噪的优越性和有效性,在上述色散后补偿系统中对接收端信号分别进行小波去噪和传统的带通滤波器去噪后的结果进行了比较,结果如图 7 所示。图 7 表明,经带通滤波后的信

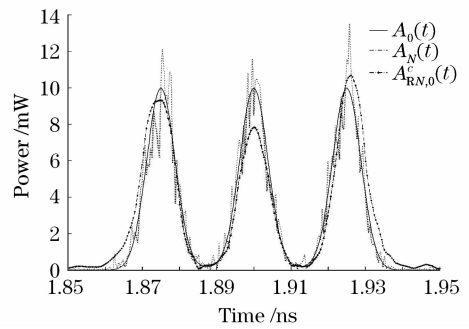


图 6 初始脉冲经过色散补偿链路后接收端信号及经过小波去噪后的信号比较

Fig. 6 Comparison of input signal, signal before wavelet denoising and signal after wavelet denoising in the dispersion compensation system

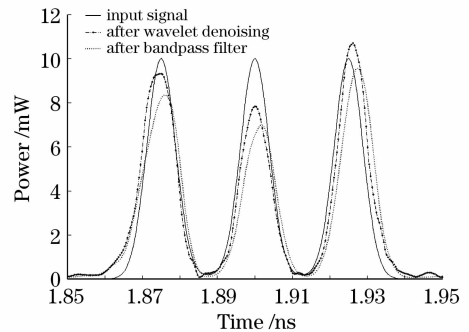


图 7 初始脉冲经过色散补偿链路后分别经小波去噪和带通滤波器去噪后的结果比较

Fig. 7 Comparison between signal after wavelet denoising and band-pass filter in the dispersion compensation system

号 (虚线) 的脉冲抖动明显大于小波去噪后信号 (点划线),这是由于小波去噪法可以更好地保留信号的细节变化;经过带通滤波去噪后脉冲的峰值也低于小波去噪后的信号,有利于增加信号的信噪比;通过计算经带通滤波器后的信号与初始信号的归一化能量偏差为 0.2362,大于小波去噪后的 0.2194,说明经小波去噪后的信号与经带通滤波后的信号相比更加逼近初始信号。

通过对三种光纤传输链路配合小波去噪的仿真结果可以看出,小波去噪能够有效地平滑 IM-DD 系统中受非线性噪声影响的信号波形并在一定程度上恢复接收信号;根据计算得到的 d 值来看,第一种链路即不考虑三阶色散和二阶色散时,恢复信号的效果最为理想,因为第一种链路中色散为零,不存在色散与非线性的相互作用,信号的失真在三种链路中最小。同时也模拟了四层和五层小波分解后的小波去噪,经比较三层分解的效果明显好于四层分解和五层分解,所以文中只给出了三层分解的结果。

5 结 论

应用级联马赫-曾德尔干涉仪实现的光学 Daubichies 滤波器,对幅度调制的光信号在不同的多跨距光纤链路中传输后在接收端进行 Daubichies 小波分解,并通过抑制其所有的细节信号来去除由光纤非线性和 EDFA 产生的 ASE 噪声相互作用所产生的非线性噪声对信号的影响。数值模拟结果表明,小波去噪法可有效地去除非线性噪声,同时与带通滤波器相比能更好地逼近初始信号,为改善光纤通信系统的质量和全光通信提供了新的思路,为研究消除非线性相位噪声对相位调制系统的影响打下了基础。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Fiber-Optic Communication System [M]. 3rd edn. Rochester NY: Wiley-Interscience, 2002. 310~313
- 2 Qin Xi, Chen Yong, Cao Jihong *et al.*. Influence of dispersion compensation scheme on phase noise of phase modulation system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):64~68
秦 曦,陈 勇,曹继红 等. 色散补偿方式对相位调制系统中相位噪声的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):64~68
- 3 C. C. Wen, J. Chen. Convergence of phase fluctuation induced by intra-channel four-wave mixing in differential phase-shift keying transmission systems via phase fluctuation averaging [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(10):1217~1219
- 4 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23):1351~1353
- 5 Keang-Po Ho. Phase-Modulated Optical Communication [M]. New York: Springer, 2005. 189~190
- 6 O. E. Agazzi, M. R. Hueda, H. S. Career *et al.*. Maximum-likelihood sequence estimation in dispersive optical channels [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2):749~763
- 7 Qi Xiaoqiong, Shao Qunfeng, Zhang Xiaoping. Lumped fiber nonlinear noise compensation based on Volterra theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1527~1532
漆晓琼,邵群峰,张晓萍. 基于沃尔泰拉理论的集总光纤非线性噪声补偿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1527~1532
- 8 T. Olson, D. Healy, U. Österberg. Wavelets in optical communications [J]. *Computing in Science & Engineering*, 1999, **1**(1):51~56
- 9 G. Cincotti, M. S. Moreolo, A. Neri. Optical wavelet signal processing and multiplexing [J]. *J. Applied Signal Processing*, 2005, **10**:1574~1583
- 10 K. Jinguji, M. Oguma. Optical half-band filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2):252~259
- 11 Cheng Lizhi, Wang Hongxia, Luo Yong. The Theory and Application of Wavelet [M]. Beijing: Science Press, 2004. 269~271
成礼智,王红霞,罗 永. 小波理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2004. 269~271