

文章编号: 0258-7025(2007)11-1527-06

# 基于沃尔泰拉理论的集总光纤非线性噪声补偿

漆晓琼, 邵群峰, 张晓萍

(兰州大学信息科学与工程学院现代通信技术研究, 甘肃 兰州 730000)

**摘要** 通过沃尔泰拉(Volterra)级数理论求得了非线性薛定谔方程(NLSE)的半解析解,在考虑光纤损耗、色散及非线性效应的情况下,推出了长距离在线级联掺铒光纤放大器(EDFA)光纤通信系统中信号和自发辐射噪声(ASE)之间耦合串扰的半解析表达式,得到了多跨距传输接收端输出信号和发射端输入信号之间的关系式。根据维纳(Wiener)滤波理论的时域滤波原理,在多跨距传输系统接收端设计了对非线性乘性噪声有滤波作用的维纳滤波器,并对预集总色散补偿、后集总色散补偿、分布链路色散补偿系统及“一对三”跨距成比例平移对称的色散非线性同步补偿系统进行了仿真模拟研究。结果表明了提出的设计思路及方法的可行性,为进一步提高传输距离增大入纤功率提供了新的思路。

**关键词** 光纤通信;非线性乘性噪声;沃尔泰拉级数理论;维纳滤波器

**中图分类号** TN 929.11;TN 911.4 **文献标识码** A

## Lumped Fiber Nonlinear Noise Compensation Based on Volterra Theory

QI Xiao-qiong, SHAO Qun-feng, ZHANG Xiao-ping

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

**Abstract** The semi-analytical solution of nonlinear Schrödinger equation (NLSE) is obtained by Volterra series theory, and the semi-analytical expression of coupling crosstalk between the useful pulses and amplified spontaneous emission (ASE) induced by the combined effects of fiber loss, dispersions and nonlinearities is derived in a high-speed long-haul fiber-optic system, which is made up of multi-span with each including a transmission fiber and an erbium doped fiber amplifier (EDFA), and the relational expression between the output signal at the receiver and the input signal at the transmitter of multi-span transmission is also obtained. Based on the time-domain filtering method of Wiener filtering, a Wiener filter is designed at the receiver to filter the multiplicative crosstalk noise mentioned above. Its applications in pre-, post-lumped and distributed dispersion compensation system, as well as “one-for-three” compensation fiber spans transmission lines with scaled translational symmetry are proved feasible by numerical simulations, which provide a novel solution to improve fiber input power and nonlinear channel capacity.

**Key words** optical fiber communication; nonlinear multiplicative noise; Volterra series theory; Wiener filter

## 1 引言

掺铒光纤放大器(EDFA)的出现与发展使得高速长距离光纤通信成为可能,然而大容量通信系统所要求的大入纤功率将引起光纤非线性效应的显著增长,不仅导致密集波分复用(DWDM)系统信道间

以及单信道内的脉冲畸变<sup>[1,2]</sup>,在线级联掺铒光纤放大器所产生的自发辐射噪声(ASE)还将与传输有用信号在非线性效应作用下发生耦合串扰,导致信号谱反常展宽<sup>[3]</sup>。Gordon及Mollenauer研究了差分相移键控(DPSK)调制方式下中继长距离传输中所存在的问题<sup>[4]</sup>,Antonio Mecozzi在各阶色散为

收稿日期:2006-12-12;收到修改稿日期:2007-07-02

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:漆晓琼(1982—),女,甘肃人,博士研究生,主要从事高速大容量光纤通信及非线性效应补偿的研究。

E-mail: qixiaoqiong2002@yahoo.com.cn

导师简介:张晓萍(1961—),女,教授,甘肃人,博士生导师,研究方向为高速大容量光通信及光电技术。

E-mail: zxp@lzu.edu.cn

零的条件下研究了非线性效应和在线掺铒光纤放大器的自发辐射噪声对相干检测大容量光纤通信系统的限制<sup>[5]</sup>,然而由于考虑所有光纤效应时非线性薛定谔方程(NLSE)不能解析求解,上述系统均作了简化处理。本文通过沃尔泰拉(Volterra)级数理论推导出在综合考虑长距离光纤通信系统中受链路的损耗、色散、非线性效应和级联掺铒光纤放大器所带来的自发辐射噪声的影响下输出端信号和接收端信号的关系式,并根据维纳(Wiener)滤波原理设计在了多跨距传输系统的接收端用于滤去乘性噪声的维纳滤波器,并对加入滤波器的预集总色散补偿、后集总色散补偿、分布链路色散补偿系统及“一对三”跨距成比例平移对称的色散非线性同步补偿系统<sup>[6]</sup>进行了仿真模拟研究。

## 2 单跨距非线性噪声的数学描述

典型的高速长距离光纤传输系统由多个跨距组成,每个跨距包含一段传输光纤和一个掺铒光纤放大器,如图1所示。前一个跨距中掺铒光纤放大器产生的自发辐射噪声将在后续各跨距光纤非线性效应的作用下与有用传输信号以及后续掺铒光纤放大器产生的自发辐射噪声发生耦合串扰<sup>[4]</sup>。图1中Tx,Rx分别表示发射机和光接收机。

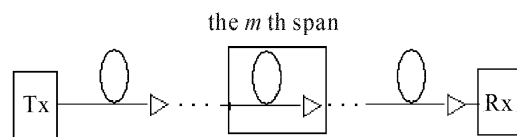


图1 长距离多跨距光纤通信系统示意图  
Fig. 1 Sketch of long-haul multi-span optical fiber communication system

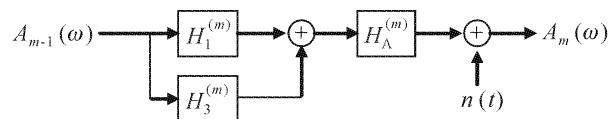


图2 单跨距传递函数方框图  
Fig. 2 Sketch for single span transfer function

为研究多跨距系统输入输出脉冲之间的关系,首先取图1系统中任一(第m个)跨距作为研究对象。为计算方便,以下推导均在频域进行,设输入第m跨距的信号为 $A_{m-1}(\omega)$ ,其输出信号为 $A_m(\omega)$ ,单跨距传递函数可表示为图2所示方框图,其中, $H_1^{(m)}, H_3^{(m)}$ 为采用沃尔泰拉级数描述非线性色散光纤作用时的核函数。

根据沃尔泰拉级数理论,对于任意解析的非线性系统,设输入为 $X(\omega)$ ,则输出 $Y(\omega)$ 可描述为输入函数的沃尔泰拉泛函级数形式<sup>[7]</sup>

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) + \sum_{n=1}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} H_N(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \prod_{i=1}^{N-1} x(\omega - \omega_i) d\omega_i, \quad (1)$$

式中 $H_N(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 称为频域N阶沃尔泰拉核函数(或N阶传递函数)。由于光纤材料的对称性,其沃尔泰拉偶数阶级数为0;以40 Gbit/s传输光脉冲,光纤各参数取常规单模色散光纤(SMF)标准值,脉冲峰值功率为20 mW,传输距离为80 km的光纤为例,其三阶沃尔泰拉级数解析解与分布傅里叶数值解之间的误差仅为0.0529。因此,根据式(1),对于损耗为 $\alpha$ ,群速色散为 $\beta_2$ ,非线性系数为 $\gamma$ 的光纤,在传输点 $z$ 处的输出 $A(\omega, z)$ 与输入 $A_0(\omega) = A(\omega, 0)$ 之间的关系可表示为

$$A(\omega, z) = H_1(\omega, z)A(\omega) + \iint H_3(\omega_1, \omega_2, \omega - \omega_1 + \omega_2, z) A_0(\omega_1) A_0^*(\omega_2) A_0(\omega - \omega_1 + \omega_2) d\omega_1 d\omega_2, \quad (2)$$

将(2)式代入频域非线性薛定谔方程

$$\frac{\partial A(\omega, z)}{\partial z} = G_1(\omega)A(\omega, z) + \iint j\gamma A(\omega_1, z) A^*(\omega_2, z) A(\omega - \omega_1 + \omega_2, z) d\omega_1 d\omega_2, \quad (3)$$

式中 
$$G_1(\omega) = -\frac{\alpha}{2} + j\frac{\beta_2}{2}\omega^2 - j\frac{\beta_3}{6}\omega^3,$$

即可推得各阶核函数所满足的耦合非齐次线性方程,从而解得描述非线性色散光纤的解析模型。经推导

$$H_1(\omega, z) = \exp[G_1(\omega)z], \quad (4)$$

$$H_3(\omega_1, \omega_2, \omega - \omega_1 + \omega_2, z) = j\gamma \frac{\exp\{[G_1(\omega_1) + G_1^*(\omega_2) + G_1(\omega_3)]z\} - \exp[G_1(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)z]}{G_1^*(\omega_1) + G_1(\omega_2) + G_1(\omega_3) - G_1(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)}, \quad (5)$$

式中\*表示共轭。至此,图1所示的单跨距输入输出信号之间的关系可表示为

$$A_m(\omega, z) = (H_1^{(m)} + H_3^{(m)})A_{m-1}(\omega) + n(\omega), \quad (6)$$

$H_1^{(m)}, H_3^{(m)}$ 对信号 $A_{m-1}(\omega)$ 的作用如式(2)所示。

### 3 多跨距非线性噪声的数学描述

根据单跨距递推公式(6),可推出  $N$  跨距接收端输出信号  $A_N(\omega, z)$  和发射端输入信号  $A_0(\omega)$  之间的关系式为

$$A_N(\omega, z) = G^N \prod_{i=0}^N (H_1 + H_3)[A_0(\omega)] + \sum_{i=0}^{N-1} G^i \left\{ \prod_{j=1}^i (H_1 + H_3)[n(\omega)] \right\} + G(H_1 + H_3) \sum_{i=1}^{N-2} X(A_i) + X(A_{N-1}), \tag{7}$$

式中  $X(A_i) = \iint H_3(\omega_1, \omega_2, \omega - \omega_1 + \omega_2, z) A_i(\omega_1, z) A_i^*(\omega_2, z) A_i(\omega - \omega_1 + \omega_2, z) d\omega_1 d\omega_2$  表示  $A_i(\omega, z)$  各项的交叉混频项。不考虑非线性效应时,式(7)可变成  $\gamma = 0$  时非线性薛定谔方程的解析频域解

$$A_N(\omega, z) = G^N \prod_{i=0}^N H_1[A_0(\omega)] + \sum_{i=0}^{N-1} G^i \left\{ \prod_{j=1}^i H_1[n(\omega)] \right\}. \tag{8}$$

### 4 非线性噪声的维纳滤波补偿理论

由于自发辐射噪声与传输信号同频率,必须在时域进行波形恢复。借助图像处理中的维纳滤波原理,对接收端信号  $A_N(\omega, z)$  进行补偿处理,设维纳滤波器传递函数为  $h(n)$ ,则滤波器输出为

$$Y(n) = \sum h(i) A_N(n - i), \tag{9}$$

采用最小均方误差准则,令

$$e(n) = A_0(n) - Y(n), \tag{10}$$

则当  $\xi(n) = E[e^2(n)] = \min$ ,即

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial h(j)} = -2E[e(n)A_n(n - j)] = 0 \tag{11}$$

时,输出波形最接近输入波形。式(9),(10)代入式(11)中,可得

$$R_{A_0 A_N}(m) = \sum_{i=0}^{N-1} h(i) R_{A_N A_N}(m - i), \tag{12}$$

$$(m = 0, 1, \dots, N - 1)$$

式中  $R_{A_0 A_N}(m) = E[A_0(n)A_N(n + m)]$ ,  $R_{A_0 A_N}(m) = E[A_N(n)A_N(n + m)]$  分别为  $A_0(n)$  与  $A_N(n)$ ,  $A_N(n)$  与  $A_N(n)$  的互、自相关函数。式(12)即为求解最佳维纳滤波冲击响应的标准方程。

### 5 非线性噪声的维纳滤波补偿仿真结果

为验证维纳滤波方法对非线性色散光纤信道中非线性乘性噪声的滤波作用,对40 Gbit/s,500 km(每个跨距由50 km传输光纤和一个掺铒光纤放大器组成,如图1所示)传输距离的光纤传输系统作数值模拟。设初始发送脉冲  $U_0$  为三个连续高斯脉冲,其  $1/e$  强度点半峰全宽  $T_0 = 5$  ps,输入功率  $P_0 = 30$  mW,取  $\beta_2 = -2.125$  ps<sup>2</sup>/km;非线性系数  $\gamma = 1.3$  km<sup>-1</sup> · W<sup>-1</sup>,自发辐射噪声的大小可描述为:  $n_0$

$= N_{sp} h\nu(G - 1)B$ ,其中,  $N_{sp} = 2$  为自发辐射因子,  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J · s 为普朗克常数,  $\nu = 193.1$  THz 为信号中心频率。 $G$  为放大器增益,其值刚好能补偿前段光纤的损耗,  $B = 1$  THz 为信号带宽。

为清楚地看出维纳滤波对非线性噪声的补偿作用,首先在不考虑光纤色散的情况下进行模拟。图3为初始发送脉冲  $U_0$  (实线),经非线性效应及自发辐射噪声互作用下接收端脉冲(点线)及再经维纳滤波后脉冲(点划线)的频谱比较图。从该图可以看出,光纤非线性乘性噪声引起的同频光波分裂可以由维纳滤波得到较好的滤除。此时对应色散位移光纤(DSF)作为传输光纤的情况。

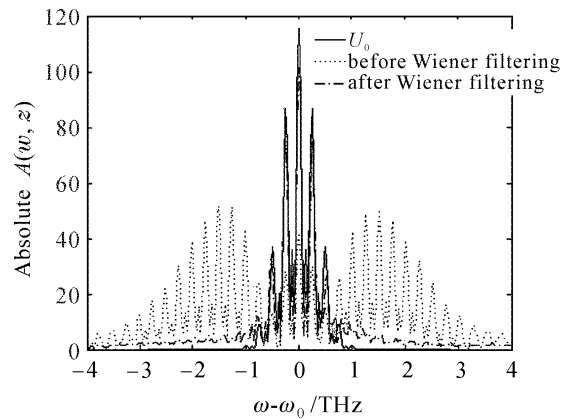


图3 初始脉冲、无色散光纤(非线性效应和自发辐射噪声)传输接收端信号及再经过维纳滤波后信号的频谱比较图

Fig. 3 Comparison of input pulse, the pulse at receiver after non-dispersion (nonlinearity and ASE) optical fiber transmission and then after Wiener filtering in frequency domain

常规单模色散光纤的色散值非零,预集总补偿、后集总补偿及链路分布补偿等多种色散补偿方案可用于补偿色散对光脉冲的影响,不同的色散补偿方

案对非线性效应有不同程度的抑制作用<sup>[8,9]</sup>,但在接收端考虑维纳滤波后,其抑制效果更好。为比较维纳滤波前后脉冲波形与初始发送脉冲的接近程度,引入归一化能量偏差(NED)<sup>[10]</sup>,用  $d_{\text{NED}}$  表示为

$$d_{\text{NED}} = \frac{\int |A(t, z) - U_0(t, z)|^2 dt}{\int |U_0(t, z)|^2 dt}, \quad (13)$$

其中  $A(t, z)$  为接收端滤波前后脉冲,  $U_0(t, z)$  为初始发送脉冲。分别对采用了预集总色散补偿、后集总色散补偿及分布链路色散补偿系统进行了接收端维纳滤波,与滤波前时域信号波形相比,滤波后脉冲与初始发送脉冲的归一化能量偏差分别减小了 0.3878, 0.5044 和 0.1854。图 4 是对采用了分布链路色散补偿的系统进行维纳滤波的数值模拟结果,其中实线为发送端初始脉冲  $U_0$  的频谱,点线为经链路分布色散补偿及非线性噪声作用下接收端脉冲频谱,点划线为再经维纳滤波后的脉冲频谱。

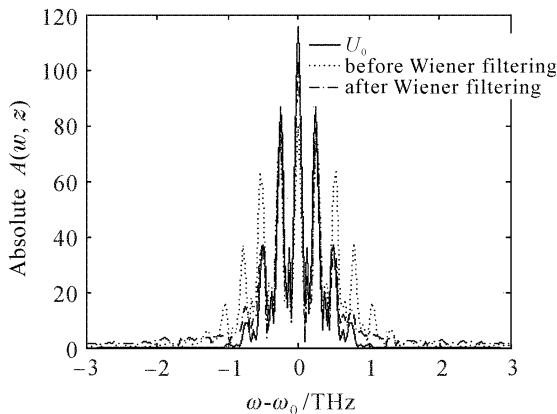


图 4 初始脉冲、分布色散补偿传输接收端信号及再经过维纳滤波后信号的频谱比较图

Fig. 4 Comparison of input pulse, the pulse at receiver after distributed dispersion compensation optical fiber transmission and then after Wiener filtering in frequency domain

从非线性薛定谔方程出发,利用一阶非线性效应随传输距离的线性可加性,提出了“一对多”跨距成比例平移对称的色散非线性同步补偿系统<sup>[6]</sup>,使具有高非线性系数的光纤跨距去补偿若干个具有低非线性系数光纤跨距的一阶非线性效应。该系统可方便实现色散和非线性效应的同步补偿:当光纤链路中使用光相位共轭(OPC)时,系统可实现包括高阶色散(至少到三阶)和一阶非线性效应同步补偿;当光纤链路中无光相位共轭时,通过合理的系统配置,“一对多”光纤跨距成比例平移对称系统能消除信道内交叉相位调制(IXPM)和四波混频(IFWM)

产生的脉冲定时抖动和振幅抖动。以单模色散光纤和反向色散光纤(RDF)组成的“一对三”跨距成比例光纤传输系统来观察维纳滤波对该系统的滤波作用,系统模型如图 5 所示。系统传输链路由单模色散光纤+反向色散光纤和反向色散光纤+单模色散光纤两种光纤跨距关于光相位共轭 1:3 对称排列组成,即一个反向色散光纤+单模色散光纤跨距和三个单模色散光纤+反向色散光纤跨距分别置于光相位共轭两边,构成一组非线性补偿对,以实现组内一阶非线性效应的补偿。每个跨距为 100 km,其他参数不变。数值模拟结果如图 6 所示,实线为发送端初始脉冲  $U_0$  的时域波形,点线为经“一对三”成比例平移对称色散非线性同步补偿链路传输后接收端脉冲波形,虚线为再经维纳滤波后的脉冲波形。可以明显看出维纳滤波方法对传送脉冲的波形重构作用,在一阶非线性效应基色度色散补偿的基础上,它可有效滤除残余非线性效应引发的参量放大噪声,减小脉冲抖动,并增大峰值处脉冲功率,减小脉冲间的交叉干扰,为进一步减小系统误码率、提高非线性光纤通信容量提供了一种新的理论指导。

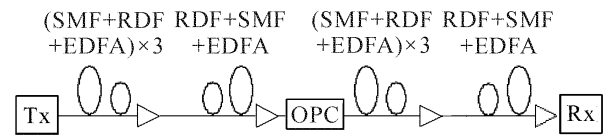


图 5 “一对三”成比例平移对称色散非线性同步补偿系统模型

Fig. 5 Sketch map of “one-for-three” scaled translation symmetry span with dispersion and nonlinearity compensation

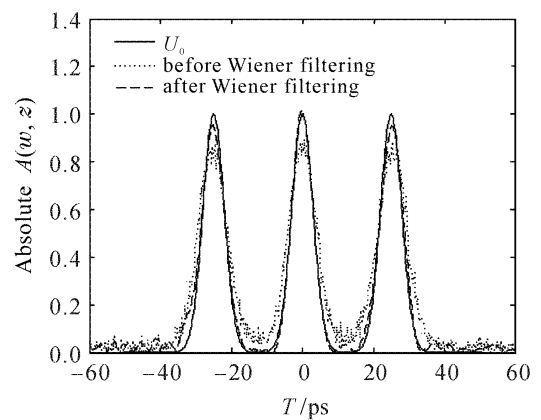


图 6 初始脉冲、一对多色散补偿传输接收端信号及再经过维纳滤波后信号的时域比较图

Fig. 6 Comparison of input pulse, the pulse at receiver after “one-for-three” compensation optical fiber transmission and then after Wiener filtering in time domain

需要指出的是,维纳滤波方法需要知道接收端观测信号和估计信号之间的互相关函数或估计信号的自相关函数,即先验知识,叫作先验维纳滤波;若相关函数未知,可以采用一种基于观测信号代数运算的维纳滤波方法<sup>[11]</sup>,设接收端观测到的两个样本为  $x_0$  和  $x_1$ ,  $s$  为发送信号,  $n_0$  和  $n_1$  分别为两次样本中的噪声信号

$$x_0 = s + n_0, \quad x_1 = s + n_1, \quad (14)$$

分别计算其和、差

$$\begin{aligned} x_+ &= x_0 + x_1 = 2s + n_0 + n_1, \\ x_- &= x_0 - x_1 = n_1 - n_0. \end{aligned} \quad (15)$$

将其和样本送入所设计的维纳滤波器中进行滤波,使得滤波器(冲击相应为  $h(i)$ ) 输出信号最接近发送信号  $s$ ,即满足

$$\begin{aligned} y(i) &= \sum_{m=-M}^M h(m)x_+(i+m), \\ \langle [y(i) - s(i)]^2 \rangle &= \min, \end{aligned} \quad (16)$$

可解得

$$\begin{aligned} R_{++}(m)h_0 + \sum_{n=1}^M [R_{++}(m-n) + R_{++}(m+n)]h(n) = \\ \frac{1}{2}[R_{++}(m) - R_{--}(m)], \quad m \in [0, M], \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $R_{++}(m) = \langle x_+(i)x_+(i+m) \rangle$ ,  $R_{--}(m) = \langle x_-(i)x_-(i+m) \rangle$  分别为  $x_+$  和  $x_-$  的自相关函数。这种维纳滤波方法有三个优点:首先,不需要知道发送信号或乘性噪声的相关函数;其次,这种滤波器是针对接收端信号的自适应滤波;而且,作为一种乘性噪声滤波方法,已用于合成孔径雷达成像系统的乘性噪声处理中<sup>[12]</sup>。在这里用此方法来处理非线性色散信道中的乘性噪声,只要掺铒光纤放大器所产生的自发辐射噪声均值为 0 且与发送信号不相关,即可满足此方法的适用条件。仍以“一对三”成比例平移对称色散非线性同步补偿系统为例,求解方程(17)进行数值模拟,得到维纳滤波前(虚线)、后(实线)归一化能量偏差随输入脉冲峰值功率的关系曲线如图 7 所示。从图中可以看出随着初始脉冲峰值功率的增加,接收端信号(无论滤波前后)与初始发送脉冲之间的能量偏离先减小后增加,在 5 mW 处得到极小值。这与非线性信道容量随输入功率的变化规律一致<sup>[13]</sup>,且实线始终在虚线的上方,以证明维纳滤波方法对接收信号的滤波作用。

## 6 结 论

采用描述非线性系统的沃尔泰拉级数,推导出

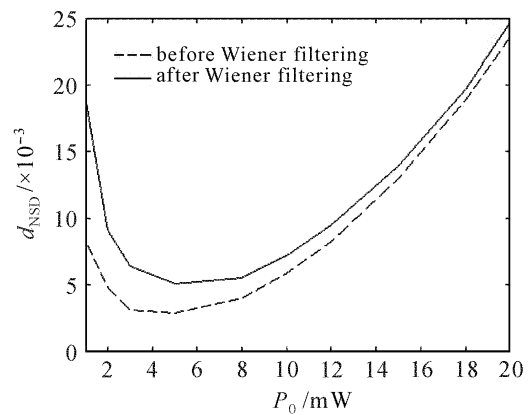


图 7 “一对三”成比例平移对称色散非线性同步补偿系统维纳滤波前(虚线)、后(实线)归一化能量偏差随输入脉冲峰值功率的关系曲线

Fig. 7 Relation curve of  $d_{\text{NSD}}$  and input peak pulse power before Wiener filtering (dashed line) and after Wiener filtering (solid line) for “one-for-three” scaled translation symmetry span with dispersion and nonlinearity compensation

了多跨距长距离在线级联掺铒光纤放大器光纤传输系统中,光纤非线性效应作用下,有用传输信号与各级掺铒光纤放大器产生的自发辐射噪声之间发生的耦合串扰公式,并结合同频信号优化——维纳滤波理论,对多跨距传输系统接收端滤波器进行了优化设计。数值模拟结果表明,维纳滤波可有效滤除多跨距光纤传输系统中的非线性乘性噪声,为进一步提高光纤通信系统容量,尤其是相位调制系统性能提供了新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 Song Kai, Fan Chongchen. Limitation of fiber nonlinearities on 10 Gb/s WDM systems using various dispersion compensation schemes [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4):519~523  
宋开,范崇澄. 光纤非线性效应对 10 Gb/s 波分复用色散补偿系统的限制[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4):519~523
- 2 Mingchia Wu, Winston I. Way. Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(6):1483~1498
- 3 D. Marcuse. Single channel operation in very long nonlinear fibers with optical amplifiers at zero dispersion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(3):356~361
- 4 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Phase noise in photonic communication systems using linear amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23):1351~1353
- 5 Antonio Mecozzi. Limits to long-haul coherent transmission set by the Kerr nonlinearity and noise of the in-line amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(11):1993~2000
- 6 Xiaoqiong Qi, Xiaoping Zhang, Haiqing Wei *et al.*. Linearity of nonlinear perturbations in fiber-optic transmission lines and its applications to nonlinear compensations [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10):2032~2039
- 7 M. Schetzen. The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear

- Systems [M]. New York: Wiley, 1989. 145~189
- 8 Guo Shuqin, Li Zhonghao, Xiao Yan *et al.*. Stable propagation of chirped picosecond optical pulse in optical fiber links under higher order dispersion managed [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7):587~591  
郭淑琴,李仲豪,肖 燕 等. 啁啾光脉冲在高阶色散控制光纤链中的稳定传输[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7):587~591
- 9 Bu Yang, Zhang Xiangyang, Wang Xiangzhao. Effects of chirped super-Gaussian pulses on optical communication system using midway optical phase conjugation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Suppl.):63~64  
步 扬,张向阳,王向朝. 啁啾超高斯脉冲对相位共轭通信系统的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(增刊):63~64
- 10 Bo Xu. Study of fiber nonlinear effects on fiber optic communication systems [D]. School of Engineering and Applied Sciences, University of Virginia, Charlottesville, 2003
- 11 R. Caprari, Non-parametric Wiener filter for reducing noise on reproducible pure signals [J]. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1999, **32**(17):3075~3094
- 12 Robert S. Caprari, Alvin S. Goh, Emily K. Moffatt. Noise and speckle reduction in synthetic aperture radar imagery by nonparametric Wiener filtering [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35):6633~6640
- 13 Partha P. Mitra, Jason B. Stark. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications [J]. *Nature*, 2001, **411**(6841):1027~1030

## 欢迎订阅 2008 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料专业委员会和中材人工晶体研究院联合主办、我国专门刊登人工晶体材料这一高新技术领域研究成果的学术性刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:光电子材料、半导体材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流活动及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所和省(市)图书馆、政府相关部门。本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文科技核心期刊,国内各主要科技文献数据库和美国“工程索引”(EI)、“化学文摘”(CA)、英国“科学文摘”(INSPEC)、日本“科技文献速报”(JICST)及俄罗斯“文摘杂志”(AJ)收录源期刊。全文被“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊网”收录。

《人工晶体学报》为双月刊,大十六开,每期约 30 万字,2008 年全年定价 300 元,欢迎单位和个人订阅。

订阅方式:直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

收款单位:北京中材人工晶体有限公司

开户银行:北京工商银行管庄分理处

帐 号:0200006809006830924

邮局汇款地址:

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部收

邮 编:100018

电 话:010-65492968;010-65491290

传 真:010-65493320

网 址:www.jtxb.cn

E-mail: tbgg@126.com