

光纤系统中的普适弱调制传输矩阵 及其在噪声演化分析中的应用

蒋 志, 范崇澄

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文在总结文献中已有工作的基础上, 给出了光纤传输系统中普适的频域弱强度/相位调制的传输矩阵 H , 包含了光纤中各阶色散、非线性和光纤损耗的影响. 指出奇数阶色散仅对矩阵分量的幅频特性产生影响, 而偶数阶色散仅对矩阵分量的相频特性产生影响. 因此, 对弱强度/相位调制(噪声)而言, 只有奇数阶色散才起作用. 基于 H 矩阵, 定量计算了分别用于强度探测系统、相位探测系统和光谱仪测量的强度噪声谱、相位噪声谱和光场噪声谱.

关键词: 弱调制; 强度噪声; 相位噪声; 色散; 非线性

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1257-05

A Generalized Weak Modulation Transmission Matrix in Optical Fiber Systems and Its Application to Noise Evolution Analysis

JIANG Zhi, FAN Chong-cheng

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A generalized frequency domain weak modulation transmission matrix H in optical fiber systems is presented in this paper. Simultaneous interaction of loss, nonlinearity and all order of dispersion in the fiber are taken into account. It is found that the odd-and even-order dispersion terms only change the amplitude-and phase-frequency response respectively, while the intensity and phase noise are only infected by the odd-order dispersion terms. Quantitative calculations of intensity, phase and optical field noise spectra are presented for intensity-detection, phase-detection and optical spectrum analyzer applications.

Key words: weak modulation; intensity noise; phase noise; nonlinearity

1 引言

光纤通信系统中, 强度/相位噪声是限制系统最终性能的重要因素之一^[1]. 特别是带有掺铒光纤放大器(EDFA)的长距离传输系统, 多级 EDFA 积累的噪声会严重恶化系统性能. 同时, 光纤的传输效应(如色散, 非线性, 损耗等)不但会对信号产生影响, 也会对噪声产生不可忽视的作用. 由于噪声是叠加在光信号上的随机抖动, 因此光纤对于光信号的弱强度/相位调制的传输函数是分析光纤系统中噪声演化的有力工具. 考虑到光纤中的各种传输效应, 这方面的工作已日趋完善. 文献 [2]、[3] 和 [4, 5] 分别给出了存在一阶色散 (β_2)、二阶色散 (β_3) 以及同时存在 β_2 和 β_3 时, 光纤中的强度与相位传递函数. 随着信号功率和光纤传输距离的增加, 光纤非线性对强度/相位传递函数的影响引起了广泛的兴趣^[6-12]. 特别是在文献 [9, 10] 中给出了包含 β_2 、非线性 (γ) 和光纤损耗 (α) 诸效应的解析表达式. 本文将给出更加普适的弱调制频域传输矩阵, 它同时包含了光纤的各阶色散、非线性和损耗. 从该弱调制传输矩阵出发, 研究了强度/相位噪声在光纤传输系统中的演化,

定量计算了强度噪声谱、相位噪声谱和光场噪声谱. 该矩阵可方便地用于由不同参数光纤段组成的色散管理系统.

2 强度/相位调制的频域传输矩阵

光场在光纤中的传输特性由非线性薛定谔方程^[13]描述. 在单信道、弱调制、连续波假定下*, 设 $P_2(z, t)$ 和 $\Phi(z, t)$ 分别是归一化的弱强度调制和相位调制, 其傅立叶变换 $\tilde{P}_2(z, \omega)$, $\tilde{\Phi}_2(z, \omega)$ 经复杂推导^[15]满足传输矩阵

$$\begin{bmatrix} \tilde{P}_2(z, \omega)/2P_0 \\ \tilde{\Phi}_2(z, \omega) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \tilde{P}_2(0, \omega)/2P_0 \\ \tilde{\Phi}_2(0, \omega) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \text{P} \rightarrow \text{P} & \Phi \rightarrow \text{P} \\ \text{P} \rightarrow \Phi & \Phi \rightarrow \Phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 P_0 是连续波功率, 弱调制传输矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \exp \left(-i \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_{2k+1} \omega^{2k+1}}{(2k+1)!} \right) z \right)$$

* 即将单信道看成是连续波(信号带宽远小于光频), 而将强度相位噪声看成是角频率为 ω 的弱调制.

收稿日期: 2002-05-23; 修回日期: 2002-07-29

$$\times \frac{\sinh(\pi\mu)}{\pi} \times \begin{bmatrix} s(L'_{\mu}(s)K_{\mu}(x) - K'_{\mu}(s)L_{\mu}(x)) & \mu(K_{\mu}(s)L_{\mu}(x) - L_{\mu}(s)K_{\mu}(x)) \\ \frac{sx}{\mu}(L'_{\mu}(s)K'_{\mu}(x) - K'_{\mu}(s)L'_{\mu}(x)) & x(K_{\mu}(s)L'_{\mu}(x) - L_{\mu}(s)K'_{\mu}(x)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

包含了各阶色散(β_k)、非线性(γ)和光纤损耗(α)的作用。 ω 是调制角频率(注意:不是载波角频率), $\mu = -\left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_{2k}\omega^{2k}}{(2k)!}\right) \frac{2}{\alpha}$, $s = 2\sqrt{-\left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta_{2k}\omega^{2k}}{(2k)!}\right) \frac{2\gamma P_0}{\alpha^2}}$, $x = s \cdot \exp(-\alpha z/2)$, $L_{\mu}(x), K_{\mu}(x), L'_{\mu}(x), K'_{\mu}(x)$ 是纯虚数阶的变型 Bessel 函数及其导数。式(1)最后一项对应矩阵各分量的物理过程:

$$\mathbf{H} = \exp\left(-i \frac{\beta_3 \omega^3 z}{6}\right) \cdot \frac{\sinh(\pi\mu)}{\pi} \times \begin{bmatrix} s(L'_{\mu}(s)K_{\mu}(x) - K'_{\mu}(s)L_{\mu}(x)) & \mu(K_{\mu}(s)L_{\mu}(x) - L_{\mu}(s)K_{\mu}(x)) \\ \frac{sx}{\mu}(L'_{\mu}(s)K'_{\mu}(x) - K'_{\mu}(s)L'_{\mu}(x)) & x(K_{\mu}(s)L'_{\mu}(x) - L_{\mu}(s)K'_{\mu}(x)) \end{bmatrix} \quad (2a)$$

比较本文和文献[9,10]的结果, β_3 的作用相当于在矩阵各项上同乘以一相位项。换言之,即使考虑了非线性, β_3 也只是引入与频率有关的固定相移,而不会对幅频特性或强度/相位噪声的演化带来任何影响。文献[4]在研究线性系统时,得出关于 β_3 的表达式为 $(1 - i\beta_3\omega^3 z/6)$,从而认为 β_3 会放大强度/相位噪声。事实上这是本文结果的不恰当的近似($x \ll 1$ 时 $\exp(-x) \approx 1 - x$),文献[3,5]在线性系统中已指出了这一问题,而本文则在非线性系统中得到了更加普适的结论。

容易证明(3)可以退化为文献[2-5,8-10]中的各种情况。由于 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 与 β_3 无关,因此 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 的特性与文[9,10]中只考虑 β_2 、非线性和损耗的结果相同。这里我们分析 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 四个分量中,非线性和一阶色散相互作用的物理过程。由于单信道光纤中的非线性表现为自相位调制(SPM):光场的强度调制通过非线性直接产生新的相位调制 $P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi$,而相位调制则通过一阶色散(GVD)直接产生强度调制 $\Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P$ 。因此 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 四个分量中,非线性和一阶色散最直接的相互作用转化过程可以表示为

$$\begin{pmatrix} P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P \\ P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

我们以 $\Phi \rightarrow P$ 为例说明,相位调制 Φ 首先通过色散(GVD)转化为强度调制 P ,它由于非线性(SPM)转化为相位调制 Φ ,又通过色散(GVD)转化为强度调制 P ,构成一次完整的 $\Phi \rightarrow P$ 转化,其余分量可以类似分析。注意式(3)只是给出了矩阵四个分量的一阶非线性过程,由于强度调制和相位调制会继续互相转化,会依次导致更高阶的非线性过程。例如 $P \rightarrow P$ 还可包括 $P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P$ 项等等。(2)中各相应项考虑了所有的高阶非线性过程。显然,转换的次数越多,其影响一般越弱。

矩阵的表达形式可以立即推广到级联系统中。图1给出了3000km(60×50km)级联系统输出端 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 四个分量按(2)得到的解析结果(实曲线)与按分裂步傅利叶法得到的数值模拟结果(分立点)。为了突出 β_3 的作用,设传输光纤为色散位移光纤(DSF),其参数为:损耗系数 $\alpha = 0.20\text{dB/km}$,色散系数 $D = \pm 0.008\text{ps/nm/km}$,色散斜率 $dD/d\lambda = 0.085\text{ps/nm}^2/\text{km}$,非线性参数 $\gamma = 1.8/\text{W/km}$,工作波长 $\lambda = 1550\text{nm}$ 。光功率

$P \rightarrow P(\mathbf{H}_{11})$ 、 $\Phi \rightarrow P(\mathbf{H}_{12})$ 、 $P \rightarrow \Phi(\mathbf{H}_{21})$ 和 $\Phi \rightarrow \Phi(\mathbf{H}_{22})$ 分别表示强度到强度、相位到强度、强度到相位和相位到相位的转化。值得注意的是: $\mathbf{H}(\omega)$ 矩阵各元素的相位响应特性完全由偶数阶色散(β_2, β_4, \dots)决定,而矩阵的幅度响应则由奇数阶色散(β_2, β_4, \dots)、非线性和损耗共同决定。下面的讨论中我们考虑实际应用比较重要的 β_2 和 β_3 项,式(2)退化为

分别为0dBm和-3dBm。由图可见,在所有情况下解析式与数值模拟结果均符合很好,说明 β_3 对幅频特性确实不起作用。

由于传输系统的带宽有限,因此我们更关心调制的低频分量。尽管输入光功率较低,但由于传输距离很长,非线性积累非常明显,与线性情况有重大差别。其特征可由图1结合物理过程进行分析:理想情况下,信号无畸变传输,应有 $\mathbf{H}_{11} = \mathbf{H}_{22} = 1$, $\mathbf{H}_{12} = \mathbf{H}_{21} = 0$ 。非理想情况下有所偏离, \mathbf{H}_{11} 、 \mathbf{H}_{22} 呈现低通特性,而 \mathbf{H}_{12} 、 \mathbf{H}_{21} 则呈现带通特性。

图1(a)是强度调制 \rightarrow 强度调制的频率响应,调制频率 $< 20\text{GHz}$ 时呈低通特性。 $D > 0$ 时,随着输入光功率的增大,强度调制会受到明显的放大,对应于强度调制系统中的调制不稳定性(MI)对边频噪声的放大。 $D < 0$ 时,MI受到抑制。物理上很容易理解: $P \xrightarrow{\text{SPM}} \Phi \xrightarrow{\text{GVD}} P$ 中的两个强度调制 P 在 $D > 0$ 的光纤中相干相长,而在 $D < 0$ 的光纤中相干相消。

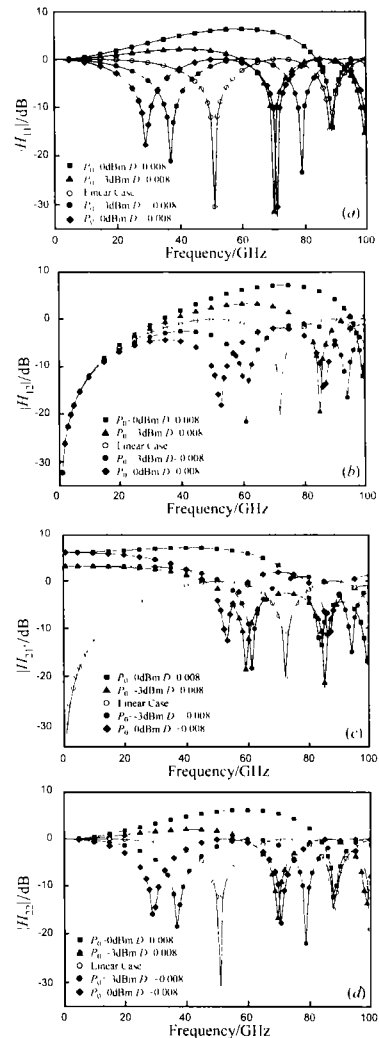


图1 60×50km系统传输矩阵 $|\mathbf{H}(\omega)|$ 。(a) $|\mathbf{H}_{11}|$;(b) $|\mathbf{H}_{12}|$;(c) $|\mathbf{H}_{21}|$;(d) $|\mathbf{H}_{22}|$ 。实线:解析结果。分立点:数值结果。Linear case:线性情况

图 1(b)是相位调制→强度调制的频率响应,呈带通特性.另一方面则与图 1(a)类似: $D > 0$ 时,随着输入光功率的增大,由相位调制转换而来的强度调制会明显受到非线性的放大.因此,传输系统中光信号的相位调制不但会由于光纤色散转换为强度调制,而且光纤非线性还会进一步把这种效应放大. $D < 0$ 时,这一转换效应也会受到抑制.

图 1(c)是强度调制→相位调制的频率响应.其特点是光纤非线性引起的自相位调制会产生相当强的相位调制低频分量(延续到直流),与线性情况明显不同.因此,传输系统中光信号的强度调制不但会由于光纤色散转换为相位调制,而且光纤非线性还会产生新的相位调制分量[与图 1(b)的放大效应相区别].更重要的是,这种效应与色散系数 D 的符号无关,与图 1(a)(b)有别.

图 1(d)是相位调制→相位调制的频率响应,其特征与(a)类似,可称为相位调制不稳定性: $\Phi \xrightarrow{GVD} P \xrightarrow{SPM} \Phi$ 中的两个相位调制 Φ 在 $D > 0$ 的光纤中相干相长,而在 $D < 0$ 的光纤中相干相消.

图 2 是 $H(\omega)$ 的相频特性,即 $\exp(-i\beta_3\omega^3z/6)$. 与 β_2 及非线性 γ 无关,并且 H 矩阵四个分量的相频特性相同.从时域来看, β_3 只会对强度调制/相位调制带来延时.注意到当 $H(\omega)$ 的幅频响应改变正负时,其相频响应会发生 π 相位突变.图 2 给出了 $H_{11}(\omega)$ 在线性情况下的相频特性.其余情况类似,只是相位突变的位置发生变化.

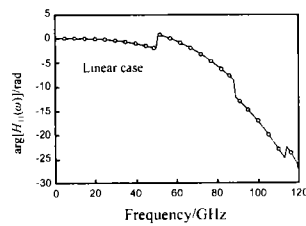


图 2 60 × 50km 系统传输函数相频特性 $\arg[H_{11}(\omega)]$. 实线:解析结果.分立点:数值结果. Linear case:线性情况

3 强度噪声与相位噪声分析

设输入端的强度噪声和相位噪声谱密度为 $W_{P2}(0, \omega)$ 和 $W_{\Phi}(0, \omega)$, 由式(1)立即可以得到输出端的强度噪声和相位噪声谱密度为 $W_{P2}(z, \omega)$ 和 $W_{\Phi}(z, \omega)$

$$\frac{W_{P2}(z, \omega)}{(2P_0)^2} = |H_{11}(\omega)|^2 \frac{W_{P2}(0, \omega)}{(2P_0)^2} + |H_{12}(\omega)|^2 W_{\Phi}(0, \omega) \quad (4)$$

$$W_{\Phi}(z, \omega) = |H_{21}(\omega)|^2 \frac{W_{P2}(0, \omega)}{(2P_0)^2} + |H_{22}(\omega)|^2 W_{\Phi}(0, \omega)$$

这里假定输入强度噪声和相位噪声相互独立,这一条件在实际级联光放大器系统中通常满足.根据(2)和(4)我们可以立即得出结论:即使在非线性色散光纤中, β_3 对强度/相位噪声的演化也没有任何影响.

利用(4)可以对光源相位噪声、光放大器 ASE 噪声、光节点处的上下信道引入的同频串扰等各种噪声源进行研究.本文具体研究了单信道长距离级联传输系统中的主要噪声源:掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射(ASE)噪声在传输系统中的演化.

EDFA 叠加的 ASE 噪声可以用实部和虚部相互独立的复

白色噪声很好刻画,等效为独立的强度和相位白噪声,其强度和相位噪声谱密度分别为 $W_{P2}(\omega) = 2P_0 \lfloor n_{sp} h\nu(G-1) \rfloor$ 和 $W_{\Phi}(\omega) = \lfloor n_{sp} h\nu(G-1) \rfloor / 2P_0$. 其中 h 是 Planck 常数, ν 是光频, G 是 EDFA 的功率放大倍数, n_{sp} 为自发辐射系数.注意在 N 级级联系统中,共叠加上 $(N+1)$ 级 EDFA 的噪声.下面的计算中仍是 60 段(每段 50km) DSF 光纤级联,光纤参数如前,入纤光功率 $P_0 = 0\text{dBm}$. EDFA 自发辐射系数 $n_{sp} = 1.5$,增益 $G = 10\text{dB}$ 完全补偿每一级的传输损耗(在超长距离传输中为减少 EDFA 积累噪声,要求短光纤段和低增益 EDFA).采用 DSF 做传输光纤是由于在计算中可以避免复杂的色散管理且不影响主要结论.在噪声的数值模拟中,图 3~图 5 中的每条曲折线都是 64 次结果的平均,而每次计算噪声谱时是在 120GHz 带宽内取 2^{10} 个采样点.

(1) 强度噪声

典型的强度调制系统包括数字 IM/DD 系统和模拟调制微波光通信系统等,决定系统性能(误码率)的是强度噪声(与电信噪比相联系).考虑到最后的电噪声谱是单边带噪声谱,经光电转换后的相对强度噪声谱密度为 $RIN(f) = \frac{2W_{P2}(\omega)}{(P_0)^2}$, $f = \omega/2\pi$. 由(4)可知其传输效应由 $|H_{11}(\omega)|^2$ 和 $|H_{12}(\omega)|^2$ 决定.图 3 给出了 $D > 0$, $D < 0$ 和线性情况下的 $RIN(f)$. 数值模拟(锯齿线)和解析结果(粗实线)很好符合. $D > 0$ 的情况下有所偏差,这是由于噪声的积累和放大使得小信号近似和泵浦不消耗的条件不能很好满足.这一偏差随着入纤光功率和传输距离的增加而加大,但在实际光通信系统感兴趣的调制频率范围内理论结果仍然是对噪声演化的很好估计.

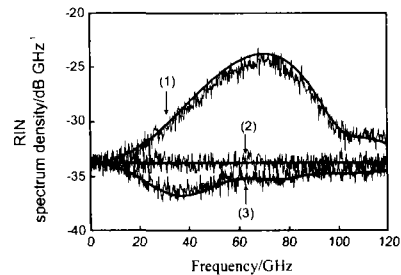


图 3 60 × 50km 系统相对强度噪声谱.实线:解析结果.折线:数值结果.输入光功率 $P_0 = 0\text{dBm}$, (1) $D = 0.008\text{ps/nm/km}$, (2)线性情况, (3) $D = -0.008\text{ps/nm/km}$

从图 3 可以看出,即使光功率不大,经过长距离传输后,一阶残余色散 β_2 仍然会与非线性发生较强作用,在 $D > 0$ 或 $D < 0$ 光纤中分别放大或抑制强度噪声.由于二阶色散 β_3 与噪声演化无关,因此这里的结果与只考虑一阶色散、非线性和损耗的情况类似^[11,12].

由于在色散位移光纤(DSF)中一阶残余色散 D 非常小,因此在 $D > 0$ 光纤中强度噪声增益带宽非常宽(延伸到 100GHz).但是在低频区并没有受到明显的放大,而这一低频区涵盖了我们的信号谱宽(直到 $> 10\text{Gb/s}$),可以利用光滤波器滤除信号谱宽以外的噪声光.接收机端的电滤波器可以进一步滤除强度噪声.因此,在零色散区附近虽然强度噪声可能在相当宽的频率范围内会被传输非线性所放大,但信

号谱宽内的噪声基本保持不变.这与文[11,12]中一阶色散较大的光纤如常规单模光纤(SMF)和非零色散位移光纤(NZDSF)有明显的不同,色散较大时强度噪声在信号谱区内就会受到明显的放大,传输非线性会对信号造成较大的损伤.

(2) 相位噪声

典型的相位调制光通信系统包括差分相移键控(DPSK)和连续相位频移键控(CPSK)相干光通信系统^[1,14]等.决定此

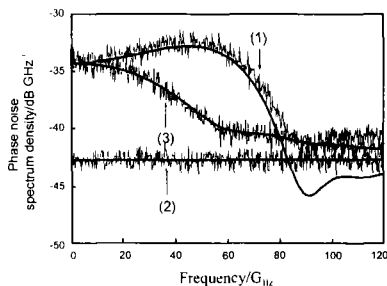


图4 60×50km系统相位噪声谱.实线:解析结果.折线:数值结果.

类系统性能的重要指标是传输后的相位噪声.图4给出了经60×50kmDSF传输后的相位噪声谱.可以看出:即使光功率不大,但经过长距离传输后,无论光纤色散正负,非线性的贡献 $H_{21}(\omega)$ 都会使相位噪声受到明显放大.同时在 $D > 0$ 光纤中由于还有相位调制不稳定性(对应 $H_{22}(\omega)$ 的贡献),使得相位噪声放大更为严重.与强度噪声不同,由于相位噪声的放大延续到零频(直流),因此这一效应不能被滤波器滤除.这也可能成为相位调制光纤传输系统的一个潜在限制.注意到 $D > 0$ 光纤中在频率大于80GHz后数值模拟和解析结果出现差异,原因尚有待进一步分析,在我们感兴趣的实际信号带宽内两者仍然符合很好.

(3) 光场噪声

光场噪声谱决定光信噪比,可以直接通过光谱仪进行测量,它便于监测传输过程中光信号的质量.经推导,归一化的光场噪声谱为 $W_{P2}(\omega)/(4P_0^2) + W_{\Phi}(\omega)$,分别对应强度噪声和相位噪声的贡献.图5给出了归一化的光场噪声谱,由于相位噪声的原因,光场噪声谱也受传输非线性的放大并延伸到零频分量.比较图3和图5可以看出:在光纤零色散区附近的强度调制系统中,光场噪声可能受到非线性放大,导致光信噪比(SNR_s)恶化,而在信号谱区内的强度噪声并没有受到明显的放大,因此决定强度调制系统性能的电信噪比(SNR_e)仍可

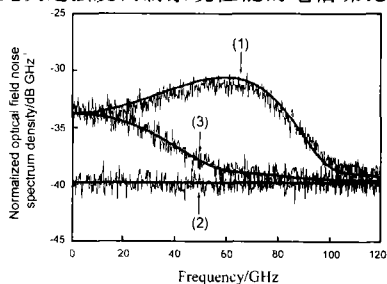


图5 60×50km系统归一化光场噪声谱.实线:解析结果.折线:数值结果

能满足系统要求.在光纤非线性相当严重的系统中光信噪比差不一定电信噪比差,这是值得注意的问题.

4 结论

本文在总结文献中已有工作的基础上,给出了光纤传输系统中,对应于弱强度/相位调制的普适的频域传输矩阵 H ,包含了光纤中的各阶色散,非线性和损耗.矩阵的四个元素分别代表了强度调制→强度调制、相位调制→强度调制、强度调制→相位调制以及相位调制→相位调制的转换.基于 H 矩阵,研究了弱强度/相位调制(噪声)在有损色散非线性光纤中的传输演化.定量计算了强度噪声谱,相位噪声谱和光场噪声谱.分析表明:

- 奇数阶色散(β_2, β_4, \dots)仅对矩阵分量的幅频特性产生影响;偶数阶色散(β_3, β_5, \dots)则仅对矩阵分量的相频特性产生影响而与强度/相位噪声的演化无关.

- 在强度调制系统(如数字IM/DD系统和模拟调制微波光通信系统)中,一阶色散和非线性相作用放大($D > 0$)或抑制($D < 0$)强度噪声.但在零色散区附近,由于在低频区噪声放大不明显,带宽相对较窄的信号不会受到噪声放大的影响.对此类系统,可能光信噪比已恶化,而电信噪比(即误码性能)尚能满足要求.

- 在相位调制光通信系统(如差分相移键控DPSK和连续相位频移键控CPSK相干光通信系统)中,无论色散 D 取值正负,相位噪声都受到传输非线性放大并延伸到零频分量,使系统性能恶化.

参考文献:

- [1] Agrawal G P. Fiber-optic Communication Systems (2nd edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [2] Wang J, Petermann K. Small signal analysis for dispersion optical fiber communication systems [J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(1): 96 - 100.
- [3] Cartaxo A, Morgado J. Intensity and frequency noise transmission along single-mode fibre at zero-dispersion wavelength [J]. IEE Proc -Optoelectron, 1998, 145(4): 211 - 216.
- [4] Crognale C. Small signal frequency response of a linear dispersive single-mode fibre transmission lines [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(3): 482 - 489.
- [5] Cartaxo A, Morgado J. Rigorous assessment of small-signal analysis for linear and dispersive optical communication systems operating near zero-dispersion wavelength [J]. J Lightwave Technol, 1999, 17(1): 86 - 94.
- [6] Hui R, Chowdhury D, Newhouse M, O'Sullivan M, Poettcher M. Non-linear amplification of noise in fibers with dispersion and its impact in optically amplified systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(3): 392 - 394.
- [7] Yu M, Agrawal G P, McKinstrie C J. Pump-wave effects on the propagation of noisy signals in nonlinear dispersive media [J]. J Opt. Soc Am 1995, B12(6): 1126 - 1132.
- [8] Cartaxo A, Wedding B, Idler W. Influence of fiber nonlinearity on the fiber transfer function: theoretical and experimental analysis [J]. J

Lightwave Technol, 1999, 17(10): 1806 - 1813.

- [9] Cartaxo A. Small-signal analysis for nonlinear and dispersive optical fibres and its application to design of dispersion supported transmission systems with optical dispersion compensation [J]. IEE Proc - Optoelectron, 1999, 146(5): 213 - 222.
- [10] Ramos F, Marti J. Frequency transfer function of dispersive and nonlinear single-mode optical fibers in microwave optical systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(5): 549 - 551.
- [11] Carena A, Curri V, Gaudino R, Poggiolini P, Benedetto S. On the joint effects of fiber parametric gain and birefringence and their influence on ASE noise [J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1149 - 1157.
- [12] Carena A, Curri V, Gaudino R, Poggiolini P, Benedetto S. New analytical results on fiber parametric gain and its effects on ASE noise [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(4): 535 - 537.
- [13] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics (2nd edition) [M]. San Diego, CA: Academic, 1995.
- [14] Ryu S. Signal linewidth broadening due to nonlinear Kerr effect in long-haul coherent systems using cascaded optical amplifiers [J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(10): 1450 - 1457.
- [15] 蒋志. 有损非线性色散光纤系统中噪声的演化分析[D]. 北京: 清华大学电子工程系硕士论文, 2002.

作者简介:



蒋 志 男, 1977 年生于重庆, 1999 年和 2002 年分别获清华大学电子工程系学士与硕士学位, 从事光纤通信系统与光纤非线性的研究工作。



范崇澄 男, 1937 年生于北京, 1958 年毕业于清华大学无线电系。现任中国通信学会光通信专业委员会副主任、清华大学电子工程系学术委员会主任、教授、博士生导师, 主要从事密集波分复用光纤通信系统与特性模拟、光纤非线性、光纤放大器、光纤光栅等方面的研究工作, 承担多项国家科委攻关任务、“863”计划重点课题及自然科学基金项目, 发表学术论文和报告百余篇, 是研究生教材“导波光学”的作者之一。