

# 有损色散非线性光纤中考虑泵浦自相位调制效应下的交叉相位调制传递函数

熊 杰, 罗 斌, 潘 炜, 严云富, 李宜峰

(西南交通大学光通信研究所, 四川成都 610031)

**摘 要:** 采用小信号分析方法研究了色散和非线性共同作用下的光信号传输, 导出了损耗、色散、自相位调制及交叉相位调制作用下反映交叉相位调制过程的频域传递函数, 通过该传递函数给出了在强度调制直接检测系统中确定任意泵浦信号下的探测波时域波形的解析方法, 发现泵浦波自相位调制一定程度上增大了频域传递函数, 且增大程度随着调制频率、输入信号平均功率及传输距离的提高而逐渐变大, 解析结果和数值仿真能较好吻合。

**关键词:** 非线性光学; 频域传递函数; 自相位调制; 交叉相位调制; 群速度色散

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)05-0879-04

## XPM Transfer Function in Loss Dispersive Nonlinear Fiber with Pump Wave SPM Effect

XIONG Jie, LUO Bin, PAN Wei, YAN Yun fu, LI Yi feng

(Institute of Optical Communication, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The transmission of optical signal under the effect of dispersion and nonlinearity is investigated by small signal analysis. Frequency domain transfer function (FDTF) is given which include loss, dispersion, self phase modulation (SPM) and cross phase modulation (XPM) and reflects XPM process. The analytical method to determine the time domain shape of probe wave when arbitrary pump wave is inputted is confirmed in intensity modulation direct detection system. We find that the SPM in pump channel increases FDTF to some extent and the increased extent is enhanced with the increase of modulation frequency, average power of input signal and transmission distance. The analytical result agrees well with numerical simulation.

**Key words:** nonlinear optics; frequency domain transfer function; self phase modulation; cross phase modulation; group velocity dispersion

### 1 引言

为进一步提高波分复用(WDM)光纤传输系统总传输容量,一个主要方法是通过减小信道间隔,实现超密集型WDM<sup>[1]</sup>.但随着信道间隔的不断减小,信道间相互作用如交叉相位调制(XPM)不断增强,成为限制WDM系统容量的重要因素.通常从非线性薛定谔方程(NLSE)组出发,采用泵浦探测波结构研究信道间的这种相互作用<sup>[2,3]</sup>,但由于群速度色散(GVD)和非线性(自相位调制SPM和XPM)的共同作用使得NLSE难以得到一般形式的精确解析解.

到目前为止,对色散和非线性共同作用下的光脉冲传输情况进行研究的最基本方法是采用数值仿真,如文献[4]采用分步傅叶法对光纤中色散和非线性的相互作用进行了研究.从解析法角度,一种比较可行的方法是从NLSE出发,在小信号分析的前提下将非线性问题以传递函数形式表示出来或转化为线性微分方程<sup>[5-7]</sup>.比如对于单信道系统,最初在文[5]中给出了忽略非线性的色散线路中强度调制(IM)和相位调制(PM)相互转换的传递函数矩阵;之后,文献[6]给出了GVD和

SPM共同作用下的频域传递函数;文献[7]将NLSE转化为线性常微分方程组,通过对该微分方程求解,进而得到了强度调制到强度调制转换(IM-IM)和相位调制到强度调制转换(PM-IM)的传递函数.对于WDM光纤传输系统,通常在泵浦探测波结构中对光脉冲传输情况进行研究,例如文[2]以PM为研究对象给出了衡量XPM过程的频域传递函数,文[3]针对强度调制直接检测波分复用系统(IM-DD WDM),以强度调制率为研究对象,给出了衡量XPM强弱的频域响应函数.文献[2,3]考虑了线路GVD,但均略去了泵浦波信道中的SPM.

由于SPM也对光信号在光纤中的传输产生重要影响,但同时考虑GVD和SPM的作用时会使数学上的处理更加复杂,这可能是前期工作如文献[2,3,8]仅考虑GVD的原因之一,但是为了全面准确地反映XPM过程中的物理规律,同时考虑SPM和GVD的作用是必要的.因此,本文由基本物理过程出发在文献[3]的基础上引入了泵浦波信道中的SPM,在理论分析部分,首先推导了反映XPM过程的频域传递函数并结合系统典型参数对其进行了简化,然后给出了当泵浦波信道中输入为任意信号时确定探测波时域波形的理论解析方法;在结

果与讨论部分,利用所得解析结果分析了泵浦波 SPM 在 XPM 过程中所起的作用,发现 SPM 在一定程度上加大了频域传递函数,从而增强了 XPM 作用.所得解析结果和数值仿真在小信号分析前提下能较好的吻合.

## 2 理论分析

考虑极化状态相同的两信道(泵浦-探测波结构)光传输系统,为表述方便称探测波信道、泵浦波信道分别为信道一和信道二.

### 2.1 推导反映 XPM 过程的频域传递函数 $H(\omega)$

如图 1 所示,考虑泵浦波信道 SPM、GVD 共同作用时,推导反映 XPM 过程的频域传递函数  $H(\omega)$  的过程,可以分为以下四步:

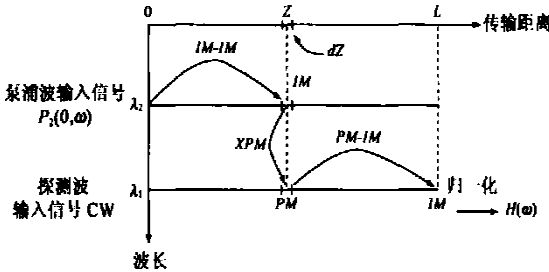


图 1 泵浦探测波结构中频域传递函数  $H(\omega)$  推导过程

(a) 在泵浦波信道中,对于输入的任意调制信号  $P_2(0, t)$ , 求出经过距离  $Z$  传输后信号的频域表达式  $\tilde{P}_2(Z, \omega)$ .

(b) 在探测波信道的  $Z$  处微段  $dZ$  内,由于 XPM 的作用,确定泵浦波调制信号  $\tilde{P}_2(Z, \omega)$  对探测波信道中 PM 的贡献  $d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega)$ .

(c) 在探测波信道中, XPM 产生的  $d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega)$  通过 GVD 的作用转化为强度调制  $d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega)$ , 总的强度调制  $\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega)$  通过对  $d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega)$  从 0 到  $L$  积分后得到.

(d) 以泵浦波输入信号对  $\tilde{P}_{1XPM}(L, \omega)$  归一化即得频域传递函数  $H(\omega)$ .

结合这四个步骤,下面进行具体推导并给出关键量的表达式.首先,以小信号调制为前提,并假定初始泵浦波信号无外加相位调制,当泵浦波调制信号传输到  $Z$  处时,其 IM 频域表达式是<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_2(Z, \omega) &= \tilde{P}_2(0, \omega) H_2(Z, \omega) \\ &= \tilde{P}_2(0, \omega) (\cos(qZ) + \Pi_2(Z, \omega)) \end{aligned} \quad (1)$$

这里,  $\tilde{P}_2(0, \omega)$  为  $P_2(0, t)$  的傅里叶变换,  $H_2(Z, \omega)$  是考虑 SPM、GVD 共同作用下的泵浦波调制信号频域传递函数,其中  $\cos(qZ)$ , 为线性项,反映的是泵浦波信号 GVD 的贡献,  $\Pi_2(Z, \omega)$  而非线性项,对应泵浦波信号的 SPM 的贡献,且

$$\begin{aligned} \Pi_2(Z, \omega) &= \gamma_2 \tilde{P}_2(0) \left\{ \frac{1}{\alpha^2 + (2q)^2} [\alpha \sin(qZ) (1 + e^{-\alpha Z}) - 2q \right. \\ &\quad \left. \cdot \cos(qZ) (1 - e^{-\alpha Z})] + \frac{1}{\alpha} \sin(qZ) (1 - e^{-\alpha Z}) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $q = \lambda_2^2 D_2 \omega^2 / (4\pi c)$ ,  $\lambda_2, D_2, \gamma_2$  分别为信道二的光波长、以及在该波长处光纤的色散参量和非线性系数,  $c$  为光速,  $\alpha$  为损耗系数,  $\tilde{P}_2(0)$  为信道二输入端平均光功率.

接下来,考虑在光纤  $Z$  处的微段  $dZ$  内,由泵浦波引起的

探测波微量相移(相位调制)  $d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega)$ , 它和泵浦波  $\tilde{P}_2(Z, \omega)$  通过以下表达式相关联:

$$d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega) = 2\gamma_1 \tilde{P}_2(Z, \omega) e^{-\alpha Z} e^{-j\omega Z/v_{g2}} dZ \quad (3)$$

式中  $\gamma_1$  为信道一(探测波信道)对应的光纤非线性系数,  $v_{g2}$  为和信道二相对应的群速度.

由于光纤 GVD 的存在,以上  $d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega)$  经过从  $Z$  到输出端这段距离的传输将被转化为强度调制  $d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega)$ , 由小信号分析可得<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega) &= 2\tilde{P}_1(Z) e^{-\alpha(L-Z)} e^{-j\omega(L-Z)/v_{g1}} \\ &\quad \cdot \sin(b(L-Z)) d\tilde{\Phi}_{1XPM}(Z, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $L$  为光纤长度,  $\tilde{P}_1(Z) = (\tilde{P}_1(0) e^{-\alpha Z})$  是信道一中  $Z$  处的平均光功率,  $\tilde{P}_1(0)$  是该信道的平均输入光功率,  $v_{g1}$  为信道一对应的群速度,  $b = \lambda_1^2 D_1 \omega^2 / (4\pi c)$ ,  $\lambda_1, D_1$  分别为信道一的光波长、以及在该波长处光纤的色散参量.

式(4)中的  $d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega)$  代表的只是泵浦波在  $Z$  处  $dZ$  距离内引起的探测波相位调制对总的探测波信道输出端 IM 的贡献,因此,对于传输长度为  $L$  的光纤,需要对式(4)从 0 到  $L$  积分来计算总的 IM, 即:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{1XPM}(L, \omega) &= \int_0^L d\tilde{P}_{1XPM}(Z, \omega) \\ &= 2\gamma_1 \tilde{P}_1(0) \tilde{P}_2(0, \omega) e^{-\alpha L} e^{-j\omega L/v_{g1}} A \end{aligned} \quad (5)$$

通过较为繁复的运算,我们得到式(5)中的  $A$  表达式:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{j=1}^2 \frac{1}{a_j^2 + (b+q)^2} [a_j \sin(bL) - (b+q) \cos(bL) + [a_j \sin \\ &\quad (qL) + (b+q) \cos(qL)] e^{-a_j L}] + \frac{1}{a_j^2 + (b-q)^2} [a_j \sin(bL) \\ &\quad - (b-q) \cos(bL) + [-a_j \sin(qL) + (b-q) \cos(qL)] \\ &\quad e^{-a_j L}] [(2-j) + (-1)^j 2Bq] + \sum_{k=1}^2 \frac{1}{a_k^2 + (b+q)^2} [a_k \cos \\ &\quad (bL) + (b+q) \sin(bL) + [-a_k \cos(qL) + (b+q) \sin(qL)] \\ &\quad e^{-a_k L}] + \frac{1}{a_k^2 + (b-q)^2} [-a_k \cos(bL) - (b-q) \sin(bL) + \\ &\quad [a_k \cos(qL) + (b-q) \sin(qL)] e^{-a_k L}] [B\alpha - (-1)^k \\ &\quad \frac{\gamma_2 \tilde{P}_2(0)}{\alpha}] \end{aligned} \quad (6)$$

在  $A$  的表达式中,两信道间的走离参量  $d_{12} = (v_{g1}^{-1} - v_{g2}^{-1}) \approx D_1(\lambda_1 - \lambda_2)$ , 其他变量定义为

$$a_1 = \alpha - j\omega d_{12}, a_2 = 2\alpha - j\omega d_{12}, B = \gamma_2 \tilde{P}_2(0) / (\alpha^2 + 4q^2).$$

由式(5),以泵浦波输入信号对  $\tilde{P}_{1XPM}(L, \omega)$  归一化可得反映 XPM 过程的频域传递函数:

$$H(\omega) = \tilde{P}_{1XPM}(L, \omega) / (\tilde{P}_2(0, \omega) e^{-\alpha L} e^{-j\omega L/v_{g1}}) = 2\gamma_1 \tilde{P}_1(0) A \quad (7)$$

至此,我们已经将影响泵浦探测波信道中频域传递函数的诸多参量如:调制频率、泵浦波功率、探测波功率、走离参量、色散参量、非线性系数、光纤长度及光纤损耗等,通过式(6)和式(7)表达出来.由于式(6)的复杂性,下面我们将结合实际系统参数,对式(6)进行合理的简化.

### 2.2 频域传递函数解析式简化推导

一般情况下光纤通信系统的信道间隔远小于工作波长

(如 100G DWDM 系统相邻信道间隔约 0.8nm, 工作波长在 1530~1565nm 范围), 因此, 探测波和泵浦波信道中的两个重要参量  $b$  和  $q$  相差并不大。其次, 对于传输码率高达 10Gb/s 到 40Gb/s 这样的光波系统, 大多采用 G. 655 低色散光纤, 以该种光纤典型参数(损耗系数  $\alpha = 0.23\text{dB/km}$ , 色散系数  $D = 0.5\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ) 进行计算, 可以发现  $b^2 \ll \alpha^2$ 、 $q^2 \ll \alpha^2$  这一条件在 40Gb/s 传输码率以内可以得到很好的满足。最后考虑到光纤传输线路至少数十公里, 所以有  $e^{-\alpha L} \ll 1$ 。综合考虑以上三个条件, 式(6)将大大简化:

$$A \approx \frac{2}{a_1} \left[ \sin(bL) - \frac{b}{a_1} \cos(bL) \right] + \frac{4b\gamma_2 \bar{P}_2(0)}{a_1 a_2} \cdot \left[ \sin(bL) + \frac{(a_1 + a_2) b \cos(bL)}{\alpha a_2} \right] \quad (8)$$

这样, 式(8)的物理意义已非常直观, 它的第一部分为忽略泵浦波幅度变化时, XPM 效应和探测波信道中的 PM-IM 效应对探测波输出端 IM 的贡献, 第二部分对应泵浦波信道中 SPM 通过 XPM 和 PM-IM 后对探测波输出端 IM 的贡献。由三角函数的周期性可以预测, 通过式(8)反映的频域传递函数的模  $|H(\omega)|$  会随参量  $b$  出现极大与极小交替变化的波动现象, 考虑到  $b$  与传输码率的平方成正比, 这种变化的周期是随传输码率的增长而变得越来越短的。然而, 传输码率不能够无限增长, 它的上限应由信道间距决定, 不能超过信道所许可的传输带宽, 否则会引起信道间的直接串扰。所以, 在许可的传输码率范围内, 是否会出现这种波动和参量  $L$  有很大的关系。

由于在 IM-DD 系统中主要是归一化强度传递函数  $|H(\omega)|$  (即传递函数的模)起作用; 同时, 在式(8)中第一部分占主导地位, 下面我们给出该部分对应的强度传递函数。当调制频率与走离参量乘积较小时满足  $\alpha \gg \omega^2 d_{12}^2$ , 另外, 在低频条件下有  $\sin(bL) \approx bL$ ,  $\cos(bL) \approx 1$ , 此时强度传递函数为

$$|H(\omega)| \approx \gamma_1 \bar{P}_1(0) \frac{(\alpha L - 1) \lambda_1^2 D_1 \omega^2}{\pi \alpha^2} \quad (9)$$

式(9)表明低频情况下 XPM 效应正比于波长的平方  $\lambda_1^2$ 、色散参数  $D_1$  及调制频率的平方  $\omega^2$  且和波长间隔  $\Delta\lambda$  无关。当调制频率与走离参量乘积较大满足  $\alpha^2 \ll \omega^2 d_{12}^2$  时, 此时强度传递函数为

$$|H(\omega)| \approx \frac{4\gamma_1 \bar{P}_1(0)}{\omega D_1 \Delta\lambda} \sin\left(\frac{\lambda_1^2 D_1 L \omega^2}{4\pi c}\right) \quad (10)$$

式(10)表明当调制频率较高时 XPM 效应随着波长的平方  $\lambda_1^2$ 、色散参数  $D_1$ 、传输距离  $L$  及调制频率的平方  $\omega^2$  的变化呈极大与极小交替变化的波动, 且波动时幅度与非线性系数  $\gamma_1$ 、信道一平均功率  $\bar{P}_1(0)$  成正比, 与信道间隔  $\Delta\lambda$ 、色散参量  $D_1$  及调制频率  $\omega$  均成反比。事实上, 此处通过对式(8)第一部分(忽略泵浦波幅度变化)作进一步简化得到的  $\alpha^2 \gg \omega^2 d_{12}^2$  和  $\alpha^2 \ll \omega^2 d_{12}^2$  两种情况下的近似表达式(9)、(10)和文献[3]中的结论完全一致, 这一方面说明了本文解析结论的正确性, 另一方面说明由于 SPM 的引入本文结论较文献[3]中的结论全面。

值得指出的是, 在上述两种情况下色散对于 XPM 效应起着不同的作用。在调制频率与走离参量乘积较小时, 由于 XPM 过程中探测波信道中 PM 到 IM 的转化近似正比于色散参量  $D_1$  (见式(4)及  $\sin(bL) \approx bL$ ), XPM 效应正比于色散参量

(见式(9)); 当调制频率与走离参量乘积较大时, 由于较强的走离效应, XPM 效应反比于色散参量(见式(10))。

### 2.3 任意泵浦信号下的探测波时域波形确定方法

泵浦波信道中输入任意调制信号时, 其光功率可表示为:

$$P_2(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{P}_2(0, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (11)$$

其中  $\tilde{P}_2(0, \omega)$  为  $P_2(0, t)$  的傅里叶变换。则该光波通过传递函数为  $H(\omega)$  的系统后在探测波信道的输出可表示为

$$P_1(L, t) = \bar{P}_1(0) e^{-\alpha L} + P_{1\text{XIM}}(L, t) \\ = \bar{P}_1(0) e^{-\alpha L} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \tilde{P}_2(0, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (12)$$

显然, XPM 过程可以等效为信号通过传递函数为  $H(\omega)$  的系统, 可以用  $H(\omega)$  来研究泵浦波信道输入为任意调制信号时的 XPM 情况。

## 3 结果及讨论

为了检验第二节中理论的正确性, 在色散位移光纤(DSF)中对本文解析结果和由耦合 NLSE 进行分步傅立叶法数值模拟的结果进行了比较, 参照文献[3, 8], 相关参量取值为: 信道一的光波长、色散系数及非线性系数分别为  $\lambda_1 = 1550\text{nm}$ ,  $D_1 = 0.5\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,  $\gamma_1 = 2.43\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , 色散斜率  $D_s = 0.044\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ , 损耗系数  $\alpha = 0.23\text{dB}/\text{km}$ , 传输距离  $L = 80\text{km}$ , 泵浦波信道、探测波信道平均功率  $\bar{P}_2(0)$ 、 $\bar{P}_1(0)$  除特殊声明外均为  $10\text{mw}$ 。

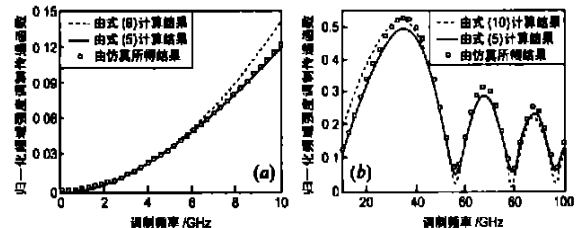


图 2 归一化频域强度调制传递函数  $|H(\omega)|$  随调制频率变化关系, 信道间隔 1.6nm

### 3.1 $|H(\omega)|$ 的解析解与仿真结果比较

为研究表征 XPM 的 IM 频域传递函数, 在探测波信道中输入正弦调制信号  $\bar{P}_2(0) + 0.1\bar{P}_2(0) \sin(\omega t)$ , 其中  $\bar{P}_2(0)$  为平均功率。图 2(a)、(b) 是具体结果, 其中实线、虚线分别是利用式(5)(9)(10)所得, 离散点为数值模拟结果, 其实质是反映了传输码率对 XPM 的影响, 图中实线(由式(5)所得)和虚线(由式(9)、(10)所得)之间的差异反映了泵浦波 SPM 的贡献。图 2 表明, 简化后的 IM 频域传递函数仍然具有较高的近似程度, 同时如 2.2 节所预言的, 当调制频率  $\omega$  较低时  $|H(\omega)|$  正比于  $\omega^2$  (见图 2(a)), 当  $\omega$  较高时  $|H(\omega)|$  随  $\omega$  出现极大与极小交替变化的波动现象, 且波动周期逐渐减小(见图 2(b))。图 2(b) 反映出的波动揭示出, 为减弱 XPM 效应, 应该通过合理选择系统参数, 使得传输码率处所对应的频域传递函数值尽可能避开波峰, 所以, 这对于系统设计有一定参考作用。

### 3.2 泵浦波 SPM 对 $H(\omega)$ 的贡献

为考察泵浦波 SPM 对 XPM 的影响, 定义  $J = (H(\omega) - H(\omega)_{\text{no SPM}}) / H(\omega)$ , 其中  $H(\omega)$  为考虑泵浦波信道 SPM 的频

域传递函数,  $H(\omega)_{no\_SPM}$  为忽略泵浦波信道 SPM 的频域传递函数, 以  $J$  值衡量泵浦波 SPM 对于频域传递函数的影响. 图 3 给出了  $J$  随调制频率的变化情况, 泵浦探测波输入与图 2 相同. 图中解析结果由实线表示, 仿真结果由方框表示. 由此可见, 考虑泵浦波 SPM 后频域传递函数得到不同程度的增大, 且随着调制频率、信道平均功率的升高泵浦波 SPM 对频域传递函数影响逐渐增大, 当输入信道平均功率为

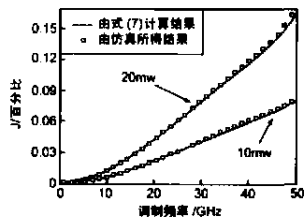


图 3  $J$  值随调制频率变化关系, 两信道平均功率分别为 10mw 和 20mw, 信道间隔 0.4nm

20mw 时, 泵浦波 SPM 对频域传递函数的贡献达到了 17%. 这是由于泵浦波 SPM 所致的频率啁啾  $\delta\omega$  展宽了信号频谱, 而  $\delta\omega$  正比于调制频率、平均功率; 同时, 由于  $\delta\omega$  正比于传输距离, 当传输距离增大时, 泵浦波 SPM 的贡献也将进一步提高.

### 3.3 通过 $|H(\omega)|$ 得到的时域结果

为了形象的说明问题, 下面给出时域结果. 在信道间隔为 0.4nm 的泵浦探测波结构中, 探测波信道中输入的是连续波 (CW), 泵浦波信道中输入为 20Gb/s 伪随机非归零 (NRZ) 矩形脉冲序列 (00100110), 调制深度 0.8, 如图 4 所示. 然后, 我们给出了通过解析和仿真手段得到的光纤输出端探测波时域波形图, 如图 5 所示. 此处, 时域抽样间隔取为 NRZ 信号脉冲宽度的 0.02 倍; 另外, 为了和实际情况相吻合, 在光纤输出端我们对探测波信号进行了滤波. 由图 5 可以得到两点结论, 第一, 输出信号除了在尖峰处 (高频分量) 有偏差外, 两者符合的较好, 事实上解析结果和仿真结果间的误差随着泵浦波调制深度、非线性效应的加大而加大, 这是因为理论部分式 (4) 的推导是以小信号分析为前提的; 第二, 泵浦波输入信号发生 “0” “1” 跃变时, 在探测波输出端会相应出现信号的极大极小值, 这是由于在泵浦波发生光功率跃变时, 在探测波信道对应点产生了相对较大的相位变化  $d\beta_{IXPM}$ , 通过 PM-IM 转化在输出端出现信号极值.

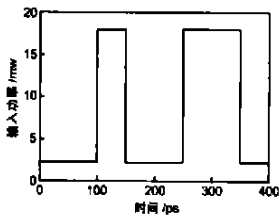


图 4 泵浦波信道时域输入功率波形: NRZ 的 PRBS (00100110), 传输速率 20Gb/s

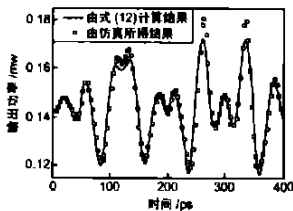


图 5 由 XPM 所致的探测波信道时域输出功率波形, 分别通过式 (12) 和仿真手段所得, 信道间隔 0.4nm

## 4 结论

本文在小信号分析前提下研究了泵浦探测波结构中群速度色散和非线性共同作用下的光信号传输情况, 推导了损耗、色散、自相位调制及交叉相位调制综合作用下可用于反映交叉相位调制过程的频域传递函数; 给出了在强度调制直接检

测系统中当泵浦波信道中输入为任意信号时确定探测波时域波形的理论解析方法, 发现泵浦波自相位调制一定程度上增大了频域传递函数, 且增大程度随着调制频率、输入信号平均功率及传输距离的提高而逐渐变大. 本文所得解析结果和数值仿真在小信号分析前提下能较好的吻合, 对于强度调制直接检测波分复用系统的设计和分析有一定参考作用.

### 参考文献:

- [1] BIGO S, FRIGNAC Y, CHARLET G, et al. 10.2 Tbit/s (256.42.7 Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100km Terabit fiber with 1.28 bit/s/Hz spectral efficiency [A]. Proc. OFC'01 [C]. Anaheim, USA: IEEE, 2001, PD25-1-PD25-3.
- [2] CHIANG T K, KAGI N, MARHIC M E, et al. Cross phase modulation in fiber links with multiple optical amplifiers and dispersion compensations [J]. Journal of Lightwave Technol, 1996, 14(3): 249-260.
- [3] CARTAXO A V T. Cross phase modulation in intensity modulation direct detection WDM systems with multiple optical amplifiers and dispersion compensators [J]. Journal of Lightwave Technol, 1999, 17(2): 178-190.
- [4] PYCOCK S, MULVEY M, BUTLER D, et al. Measurement of dispersion and nonlinearity in multi-amplifier systems [J]. Electron Lett, 1993, 29(25): 2212-2214.
- [5] WANG J M, PETERMANN K. Small signal analysis for dispersive optical fiber communication systems [J]. Journal of Lightwave Technol, 1992, 10(1): 96-100.
- [6] Jiang Z, Fan C C. A comparative study of XPM and SRS induced noise in cascaded IM-DD optical fiber transmission systems [J]. Journal of Lightwave Technol, 2003, 21(4): 953-960.
- [7] CARTAXO A V T, WEDDING B, IDLER W. Influence of fiber nonlinearity on the phase noise to intensity noise conversion in fiber transmission: theoretical and experimental analysis [J]. Journal of Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1187-1194.
- [8] THIELE H J, KILLEY R I, BAYVEL P. Influence of fibre dispersion and bit rate on cross phase modulation induced distortion in amplified optical fibre links [J]. Electron Lett, 1998, 34(21): 2050-2051.

### 作者简介:



熊杰男, 1975年9月出生于湖北松滋, 西南交通大学光通信研究所博士研究生, 主要从事光纤通信技术研究. E-mail: jxiong9664@sina.com.



罗斌男, 1968年出生, 1989年毕业于四川大学物理系, 现为西南交通大学计算机与通信工程学院教授, 博士生导师, 发表论文 50 余篇, 研究方向包括光纤通信有源器件、非线性光纤光学等.