

# 级联光纤中色散与自相位调制的相互作用

郑光金<sup>1</sup>, 陈福深<sup>1</sup>, 战丽丽<sup>2</sup>, 李纯丹<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054; 2. 中国海洋大学信息科学与工程学院 山东 青岛 266003)

**【摘要】**对不同光纤色散系数、任意光纤条数、任意长度组成的多级联光传输系统, 推导了由自相位调制引起的光功率传递函数, 并对此进行了仿真计算。结果表明, 自相位调制引起的功率变化与系统的光纤损耗、色散系数、非线性系数、调制频率等参数有关, 并且随调制频率增加成波动性变化, 从而证明了理论分析的正确性。

**关键词** 自相位调制; 多级联光纤传输系统; 色散; 光纤通信系统

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

## Interaction with Chromatic Dispersion and Self-Phase Modulation in Cascaded Optical Fibers

Zheng Guangjin<sup>1</sup>, Chen Fushen<sup>1</sup>, Zhan Lili<sup>2</sup>, Li Chundan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks UEST of China, Ministry of Education Chengdu 610054;

2. Information Science and Engineering College, Ocean University of China Shan dong Qingdao 266003)

**Abstract** The self-phase modulation induced optical power transfer function is analyzed in cascaded optical fiber communication system in terms of different chromatic dispersion, arbitrary fiber numbers and lengths. Computer simulations are also done. The results of simulations show that the power change of self-phase modulation (SPM) relates to fiber loss, nonlinear coefficient and modulation frequency of system and fluctuates with change of modulation frequency. The simulations are well accordance with the analytical result.

**Key words** self-phase modulation; cascaded optical transmission system; chromatic dispersion; optical communication system

光波分复用技术和无中继传输距离的增加可以有效地提高光通信系统的传输容量, 但这需要更大的光发射功率。而在高的光功率激励下, 光纤容易出现非线性现象。由于在强度调制下, 光信号的相位会受到自身光功率的调制——自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM), 再由群速度色散转换为强度调制, 现已有很多论文分析了无级联光放大器系统中光纤的SPM特性<sup>[1,2]</sup>。但实际的光纤通信系统可能级联多个光放大器, 并且两个放大器间的传输介质可以是不同长度、不同色散系数的光纤组成。本文推导了一种适用于分析放大器之间由任意光纤条数、任意长度及色散系数组成的光纤传输系统SPM效应的计算方法, 并对此作了分析和仿真计算。

## 1 理论分析

假设光纤传输系统由 $k$ 根光纤、 $k$ 个光放大器组成, 其中第 $k$ 根光纤的色散参数为 $D_k$ , 每一个放大器的增

收稿日期: 2004-06-09

作者简介: 郑光金(1979-), 男, 硕士生, 主要从事光纤色散技术方面的研究。

益正好能补偿前一段光纤的损耗。则第 $k$ 根光纤的入纤光场为

$$A_k(0,t) = \sqrt{P_k(0,t)} \exp\{j[w_c t + f_k(0,t)]\} = \sqrt{P_{k0} + P_{k2}(0,t)} \exp\{j[w_c t + f_k(0,t)]\} \quad (1)$$

式中  $w_c$  为光载波角频率,  $f_k(0,t)$  为第 $k$ 根光纤的入纤相位,  $P_{k0}$  为第 $k$ 根光纤入射端的平均光强,  $P_{k2}(0,t)$  为第 $k$ 根光纤入射端的调制光强, 它的傅里叶变换  $\tilde{P}_{k2}(0,\omega)$  包括两个部分, 线性部分和非线性部分

$$\tilde{P}_{k2}(0,\omega) = \tilde{P}_{k2N}(0,\omega) + \tilde{P}_{k2G}(0,\omega) \quad (2)$$

非线性部分表示入射到第 $k$ 根光纤时的由光纤的自相位调制引起的附加强度调制。线性部分是由光纤色散引起的, 其表达式为<sup>[3]</sup>

$$P_{k2G} = \cos(b(D_k L + \sum_1^{k-1} D_k l_k)) \tilde{P}_{12}(0,\omega) \exp(-aL) - 2P_{10} \sin(b(D_k L + \sum_1^{k-1} D_k l_k)) \tilde{F}_k(0,\omega) \exp(-aL) \quad (3)$$

式中  $b = l^2 \omega^2 / (4\delta c)$ ,  $\sum_1^{k-1} D_k l_k$  为第 $k$ 根光纤以前的色散距离乘积的总长度,  $L$  为距离第 $k$ 根光纤开始时的长度,  $\tilde{P}_{12}(0,\omega)$  为第一根光纤开始时的调制光功率,  $\tilde{F}_k(0,\omega)$  为第 $k$ 根光纤开始时, 外加相位调制的相位傅里叶变换,  $P_{10}$  表示第一根光纤开始时的平均光功率,  $a$  为衰减系数。

本文暂不讨论外加相位调制对强度调制的影响, 可以得到第 $k$ 根光纤 $z$ 到 $z + dz$ 时的相位增长

$$dF_{spm}(z,t) = -g[P_{k0} \exp(-az) + \tilde{P}_{k2}(z,t)] dz \quad (4)$$

式中  $g$  为非线性系数,  $\tilde{P}_{k2N}(0,\omega)$  远小于  $\tilde{P}_{k2G}(0,\omega)$  的影响, 可以忽略其作用。根据自相位调制的定义, 频域中近似有

$$d\tilde{F}_{spm}(z,\omega) = -g[P_{k0} \exp(-az) 2\delta d(\omega) + \tilde{P}_{k2}(z,\omega)] dz \quad (5)$$

因为  $dF_{spm}(z,t)$  很小, 可以用小信号的相位调制——强度调制转换关系分析

$$d\tilde{P}_{k2N}(L,\omega) = -2P_{k0} \exp(-aL) \sin[b(L-z)] \exp[-a(L-z)] d\tilde{F}_{spm}(z,\omega) \quad (6)$$

由前面假定可知, 第 $k$ 根光纤开始处的平均光功率与第一根开始处的平均光功率是相等的, 即  $P_{k0} = P_{10}$ 。如果只考虑频率为  $f$  时, SPM的作用效果, 对上式进行积分可得由自相位调制所引起的强度变化

$$\tilde{P}_{k2N}(L,\omega) = \int_0^L d\tilde{P}_{k2N}(L,\omega) = \tilde{P}_{12}(0,\omega) \exp(-aL) [\cos(b \sum_1^{k-1} D_k l_k) \prod_{p1}(\omega) - \sin(b \sum_1^{k-1} D_k l_k) \prod_{p2}(\omega)] \quad (7)$$

式中

$$\prod_{p1}(\omega) = gP_{10} \left\{ \frac{1}{a^2 + (2bD_k)^2} \left[ a \sin(bD_k L)(1 + e^{-aL}) - 2bD_k \cos(bD_k L)(1 - e^{-aL}) \right] + \frac{1}{a} \sin(bD_k L)(1 - e^{-aL}) \right\} \quad (8)$$

$$\prod_{p2}(\omega) = -gP_{10} \left\{ \frac{1}{a^2 + (2bD_k)^2} \left[ a \cos(bD_k L)(1 - e^{-aL}) + 2bD_k \sin(bD_k L)(1 + e^{-aL}) \right] - \frac{1}{a} \cos(bD_k L)(1 - e^{-aL}) \right\} \quad (9)$$

则在 $L$ 处可以得到频率为  $f$  时的光功率

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{k2}(L,\omega) = & \tilde{P}_{12}(0,\omega) \exp(-aL) [\cos(b(D_k L + \sum_1^{k-1} D_k l_k)) + (\cos(b \sum_1^{k-1} D_k l_k) \\ & \prod_{p1}(\omega) - \sin(b \sum_1^{k-1} D_k l_k) \prod_{p2}(\omega)) + \tilde{P}_{\Sigma k 2N}(L,\omega)] \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\tilde{P}_{\Sigma k 2N}(L,\omega)$  表示在第 $k$ 根光纤以前由SPM产生的附加强度在 $L$ 处的影响。最后, 得到在 $L$ 处SPM总的附加功率

$$\Delta P(f) = \frac{1}{2} [(\tilde{P}_{k2}(L,\omega))^2 - (\tilde{P}_{12}(L,\omega) \cos(b(D_k L + \sum_1^{k-1} D_k l_k)))^2] \quad (11)$$

## 2 仿真计算

### 2.1 SPM试验仿真和比较

为了检验理论推导的正确性, 运用标准单模光纤(G.652)做了如图1所示的仿真试验, 试验中利用分步傅里叶法进行数值的模拟计算, 光接收机前端是功率控制放大器, 其入射到接收机上的功率恒等于检测信号调制后发出的光功率, 目的是消除传输线路中光纤损耗和光放大器增益的影响。为了简化计算, 假设各段

光纤的色散参数均为 $D = 16 \text{ ps}/(\text{km} \times \text{nm})$ ，光中继距离80 km，电吸收调制器的调制系数为 $2/3$ ，光纤的参考光频率为 $193.1 \text{ THz}$ ， $g = 1.3153 \text{ W}/\text{km}$ ， $a = 0.2 \text{ dB}/\text{km}$ ， $I = 1.552524 \text{ } \mu\text{m}$ ，调制信号的频率 $f = 2.5 \text{ GHz}$ ，激光器的输出功率为 $1 \text{ mW}$ 。

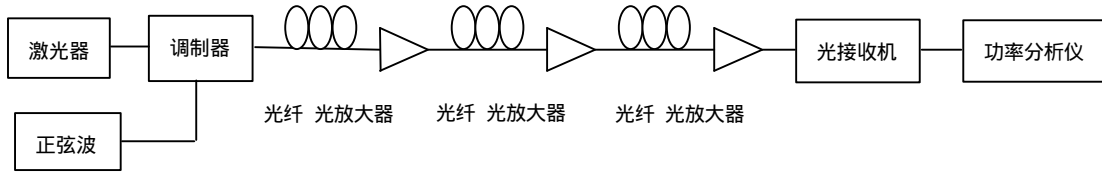


图1 SPM引起的单音功率的装置示意图

图1中，一个单音信号(角频率 $\omega_f$ )在经过一段色散光纤时，其电域功率随光纤长度按式(12)变化<sup>[4,5]</sup>

$$P(\omega_f) = \frac{1}{2}(i_0 A e^{-al} G \cos(bl))^2 \tag{12}$$

式中  $i_0$  表示平均光功率所产生的光电流。 $A$  为强度调制系数。 $e^{-al}$  为光纤的传输损耗。 $G$  为放大器增益。 $l$  为光纤的长度。但由于SPM的影响而使得式(12)出现了偏差。根据图1所示的仿真流程图，在480 km的距离长度上得到了如图2所示的仿真数据。

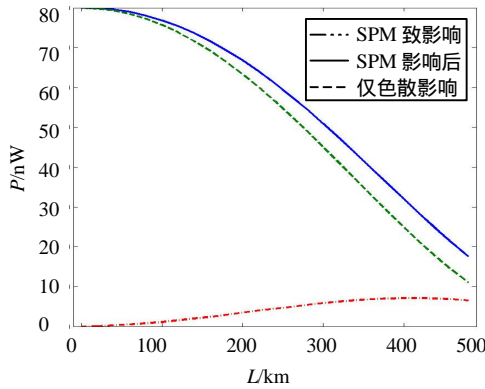


图2 480 km内的单音功率与长度的关系曲线

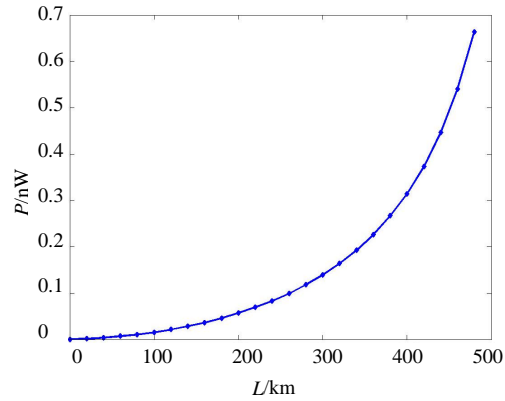


图3 SPM引起功率与长度的归一化关系曲线

图2中，曲线分别表示了仿真系统只有色散作用时、光纤色散和SPM共同作用时以及两者之间的差值曲线。从图3中，可以看出，SPM的影响随色散距离的增大愈加显著起来，在480 km处SPM的影响已接近单音色散功率的0.7%。

在图4中，两曲线分别是理论计算得到的SPM曲线和仿真试验得到的SPM引起的功率变化曲线。可见，在色散距离比较短时，两者得到的数据吻合的很好。但随着光纤传输长度的增大，两者的偏离稍有增加，这主要是由于忽略了整个推导过程中强度调制到强度调制影响的缘故。

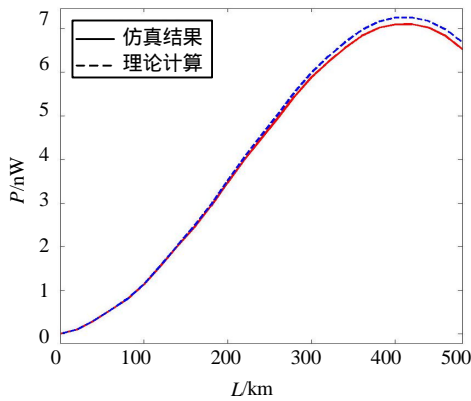


图4 SPM引起功率随长度变化的理论计算和仿真结果

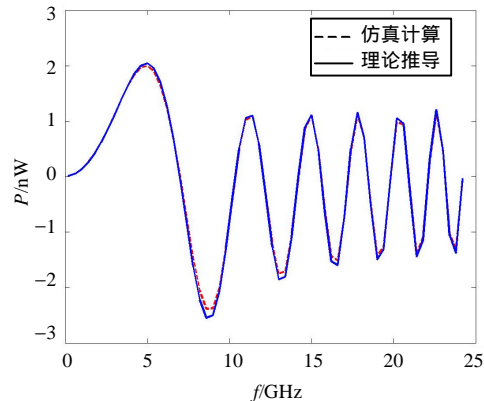


图5 SPM引起功率随频率变化的理论计算与仿真结果

## 2.2 不同调制频率的功率变化

以上分析是观测频率在2.5 GHz时, 功率随色散长度的变化关系。当频率变化时, 得到了在某一固定光纤长度处, 由SPM引起的功率随频率的关系曲线, 如图5所示。从图中可知, SPM引起的功率随频率的增大成波动性变化, 当功率值为正时, SPM在 $D>0$ 的反常色散区光纤中可以抵消色散引起的展宽效应; 当功率值为负时, SPM在 $D<0$ 的反常色散区光纤中与色散共同加剧脉冲的展宽。从图5中可见两者吻合得相当好。

## 3 结 论

本文从理论上分析了在多级联光纤传输系统中, 包含任意光纤长度、损耗和色散共同作用的自相位调制光功率传递函数, 并通过仿真试验论证了理论分析的正确性。分析表明, 在第 $k$ 根光纤中自相位调制引起的光功率不仅与非线性系数以及该段光纤的损耗、色散以及所选观测频率有关, 还与在先前所经光纤中产生的非线性光功率有关, 并且随观测频率的增加成波动性变化, 这对分析光纤模拟调制系统中的自相位调制影响和单音频率的光纤色散实时监测有很大的指导作用。

本文研究工作得到中兴通信科研基金资助, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Cartaxo A V. 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) : 178-190
- [2] 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
- [3] Wang Jiangmin, Petermann K. Small signal analysis for dispersive optical fiber communication systems[J]. J. Lightwave Technol, 1992, 10 (1) : 96-100
- [4] Youn C. Effects of SPM and PMD on chromatic dispersion monitoring techniques using pilot tones[C]. Optical Fiber Communications Conference, Atlanta, Georgia, 2003. 403-404
- [5] Park K J, Youn C J. Performance comparisons of chromatic dispersion-monitoring techniques using pilot tones[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15 (6) : 873-875

编 辑 孙晓丹

---

(上接第673页)

### 参 考 文 献

- [1] Lee H K, Ahn J T, Jeon M Y, *et al.* All-optical clock recovery from NRZ data of 10 Gb/s[J]. IEEE Photonics Technology Letters 1999, 11(6): 730-732
- [2] Lee H J, Kim H G, Choi J Y, *et al.* All-optical clock recovery from NRZ data with simple NRZ-to-PRZ converter based on self-modulation of semiconductor optical amplifier[J]. Electronics Letters 1999, 35(12): 989-990
- [3] Mao W, Li Y, Al-Mumin M, *et al.* All-optical clock recovery for both RZ and NRZ data[J]. IEEE Photonics Technology Letters 2002, 14(6): 873-875
- [4] Wenzel H, Bandelow U, Wunsche H J, *et al.* Mechanisms of fast self pulsations in two-section DFB lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics 1996, 32(1): 69-78

编 辑 孙晓丹