

# DWDM 系统中光纤的非线性仿真分析

王国忠, 施社平, 古 渊, 赵 智, 周伟勤, 罗来荣, 武成宾  
(中兴通讯股份有限公司, 北京 100085)

摘 要: 本文分析了 DWDM 系统中 XPM 和 FWM 效应随信道间距变化的关系, 并提出了大容量长距离 DWDM 系统仿真的解决方案. 严格的数值计算表明, 在信道间距为 50GHz 的 DWDM 系统中, 当信道数大于 9 (in SMF) 和 15 (in NZDSF) 时中心信道的 Q 值基本不再随信道数增加而变化. 这一结果对于大容量长距离 DWDM 系统的实验设计有重要的指导意义.

关键词: 交叉相位调制; 四波混频; 密集波分复用系统

中图分类号: TN929 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2004) 12A-066-03

## Simulation Analysis of Fiber Nonlinear in DWDM System

WANG Guo zhong, SHI She ping, GU Yuan, ZHAO Nai zhi, ZHOU Wei qin, LUO Lai rong, WU Cheng bin  
(ZTE Corporation, Beijing 100085, China)

Abstract: The relation between channel spacing and effect of XPM and FWM in DWDM system was analyzed, and a new solution for simulation of high speed and long haul DWDM system was derived. In further numerical calculation, it was demonstrated that Q of center channel wasn't sensitive to increase of channel number when channel number is larger than 9 (in SMF) and 15 (in NZDSF) in DWDM system with 50GHz channel spacing. This result can be used in experimental design of DWDM system.

Key words: XPM; FWM; DWDM

### 1 引言

随着光纤通信技术的迅猛发展, 大容量长距离密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 光纤通信系统成为可能. 由于系统中经常含有上百个信道, 加之传输长度可达数千公里, 使得光纤中色散和非线性及其相互作用变得异常复杂<sup>[1, 2]</sup>. 因而, 在系统设计之初相应的数值模拟成为必不可少的工作, 同时数值仿真也是大容量长距离密集波分复用光纤通信系统的重点研究课题之一. 对于多信道系统的数学处理方面, 传统的方法是将多信道信号看作宽频带的单信道信号, 然后将其代入非线性薛定谔方程中用分步傅立叶模型法进行计算<sup>[3]</sup>. 随着信道数的增多, 该方法需要的计算时间呈几何级数增长, 信道数达到 100 以上时, 精确仿真在时间上已经不可承受.

光纤中信道间的非线性效应主要包括交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)、四波混频(Four Wave Mixing, FWM)和受激 Raman 散射(Stimulated Raman scattering, SRS), 它们都和信道间距有关. SRS 效应的增益峰值在 13THz 左右; XPM 和 FWM 效应却是对相邻信道的非线性影响最强, 随着间距渐远影响逐渐减弱直至可以忽略. 因此我们认为, 如果能够确定 XPM 和 FWM 的影响范围, 以此来设计一个仿真系统, 在所关注的目标信道两侧该范围内用分布傅立叶方法精确计算各信道之间的相互影响, 而该范围外的信道只考虑 SRS 的

影响, 在保证仿真精度的前提下仿真效率将大大提高. 虽然仿真结果中只有所关注的目标信道充分考虑了各种非线性效应, 但该信道可以普遍代表 DWDM 系统中各信道的基本情况, 对系统设计中功率配置以及色散补偿方案等问题有重要指导意义. 本文分别在 SMF 和 NZDSF 两种光纤上针对 XPM 和 FWM 的影响范围做了数值模拟, 并给出了中心信道的 Q 值随系统信道数的变化.

### 2 理论分析

光纤中的光脉冲遵从麦克斯韦方程组, 在单模光纤内的多个信道情况下脉冲包络的演化趋势可以用下面的非线性薛定谔方程表示<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_i + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_i}{\partial T_i^2} + \frac{\beta_{t3}}{6} \frac{\partial^3 A_i}{\partial T_i^3} + \text{线性衰减} \quad \text{线性效应色散}$$

$$-j \gamma |A_i|^2 A_i - j \gamma B \sum_{k \neq i} |A_k(T_k)|^2 A_i + \text{自相位调制} \quad \text{交叉相位调制}$$

$$-j \gamma \sum_{l, m, n} S_{lmn} A_l(T_l) A_m(T_m) A_n^*(T_n) \exp(-j \Delta \beta_{lmn} z) + \text{四波混频}$$

式中  $i$  表示信道序号

$$A_j(T_j) = A_j(T_j + \tau_j), \quad j = l, m, n, k$$

$$\tau_j = z \left[ \frac{1}{v_{gi}} - \frac{1}{v_{gj}} \right] \approx \frac{1}{2} (D_i + D_j) (\lambda_i - \lambda_j)$$

表示信道  $i$  滞后于信道  $j$  的时间. 非线性系数,

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} = \frac{3 \omega_0}{8 c n_{core} A_{eff}} R(X^{(3)})$$

有效纤芯面积:  $A_{eff} = \pi w_{eff}^2$

在大容量超长 DWDM 系统中随着信道数的增多, 上述方程组的求解变得异常复杂, 精确仿真在计算时间上已经不可承受. 分析光纤中的 XPM 效应, 我们可以用一个简单的两步法替代复杂的非线性运算<sup>[4]</sup>: 首先, 信道间的 XPM 效应集中在每一中继段光纤的第一个走离长度内, 每个信道都影响其他信道的相位, 而幅度不发生变化. 光纤的走离长度定义为  $L_w = T_r / d_{ij}$ ,  $T_r$  对应于 NRZ 脉冲上升/下降沿 (10% ~ 90%) 时间,  $d_{ij}$  是信道间群时延差,

$$d_{ij} = (v_{gk})^{-1} - (v_{gj})^{-1} \approx (D_k + D_j)(\lambda_k - \lambda_j) / 2 \approx D \Delta \lambda \quad (2)$$

其中  $D$  是光纤的色散,  $\Delta \lambda$  是信道间距; 第二步, 在接下来的光纤里信号线性传输, 只有色散把相位的影响转化为强度调制, 引起信号畸变.

XPM 引起的相对强度干扰可以用下式所示<sup>[5]</sup>:

$$M(t) = |e^D e^{i\alpha \theta}|^2 - 1 \quad (3)$$

其中  $D$  是色散和损耗操作符<sup>[3]</sup>, 信号的相位表示为

$$\Phi(t) = \frac{2\gamma}{D \Delta \lambda} \int_{-\infty}^t e^{-\alpha(D \Delta \lambda)(t-\zeta)} P(\zeta, 0) d\zeta \quad (4)$$

式中  $\gamma$  是光纤的非线性系数,  $\alpha$  是光纤衰减系数,  $P$  是信号入纤的光功率.

从式 (2) ~ (4) 可见, 信道的间隔决定各信道相对走离长度的大小, 进而决定对相位的影响, 因此可以从信道间隔的变化粗略估计 XPM 的影响范围, 如图 1 所示:

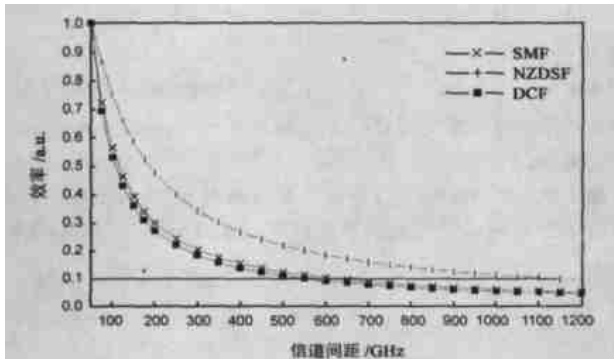


图 1 光纤中 XPM 效应的效率随信道间距的变化

仿真所用的光纤的具体参数如表 1 所示:

表 1 光纤参数

光纤种类	$\alpha$ (dB/km)	$D$ (ps <sup>2</sup> /nm/km)	$S$ (ps <sup>2</sup> /nm <sup>2</sup> /km)	$A_{eff}$ ( $\mu$ m <sup>2</sup> )	$n_2$ ( $\epsilon$ 20nm <sup>2</sup> /W)
SMF	0.2	17	0.08	80	2.6
NZDSF	0.2	4	0.08	50	2.6
DCF	0.5	-85	-0.21	20	3.0

图中数据相对于间距 50GHz 的时候归一化, 我们可以看到, 随着信道间距的增加, 信道间 XPM 的影响呈指数递减趋势. NZDSF 光纤色散最小, 信道间走离速度慢, 因此有更多信道参与 XPM 作用. DCF 光纤的插损比较严重, 虽然色散值最

大, 但 XPM 影响范围和 SMF 光纤类似.

产生 FWM 的效率同样取决于信道间隔和光纤色散. 当二者较大时, 各频率分量的群速度相差大, 相位匹配条件不容易维持, FWM 效应变弱. 不考虑 FWM 引起的原有信道的功率变化, 由  $i, j, k$  三个功率相等的信道在长度为  $L$  的光纤中相互作用, FWM 的产生效率  $\eta$  可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$\eta = [a^2 / \{a^2 + (\Delta\beta)^2\}] \cdot [1 + 4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L) / \{1 - \exp(-\alpha L)\}]^2 \quad (5)$$

其中  $\Delta\beta L$  是由色散引起的总相移差

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_{ijk} \quad (6)$$

把式 (6) 代入式 (5), 考虑两信道情况下, 我们可以得到混频效率与信道间隔的关系. 从图 2 可见, 随信道间隔和色散的增加 FWM 的产生效率迅速下降. 色散系数不为零的 DWDM 系统中信道数很多, 在一个信号频率上叠有多个 FWM 分量, 其综合影响取决于各分量的相对相位<sup>[7]</sup>. 由于它们随机分布, 因而可以采用功率相加, 但仅相位失配最小的几个相邻信道的混频分量起主要作用.

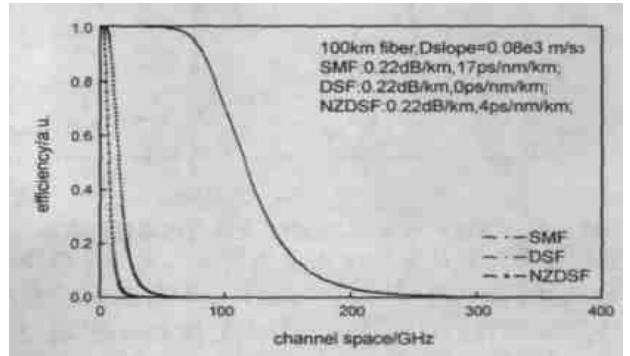


图 2 光纤中 FWM 效应的混频效率随信道间距的变化

### 3 数值模拟

在上面简单的理论分析中 XPM 和 FWM 效应都随信道间距的增加而指数下降. 为了确定 XPM 和 FWM 效应的作用范围, 需要利用分步傅立叶方法数值求解非线性薛定谔方程. 考虑色散和非线性效应之间的相互作用, 仿真模型包括了损耗、DVD、SPM、XPM、FWM、MI 和 SRS 等各种效应. 系统仿真结构如图 3 所示,

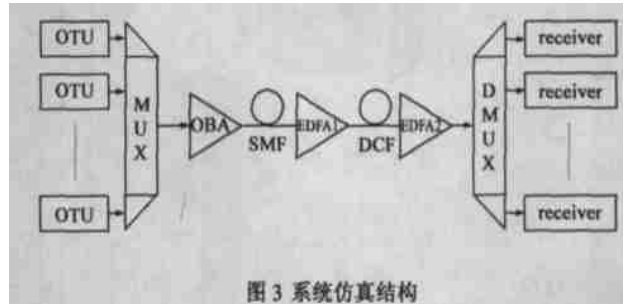


图 3 系统仿真结构

入纤功率设为 5dBm/channel 以加强非线性效应. 保持系统各项参数不变, 在中心信道 (193.1THz) 两侧等间距增加新的信道, 计算中心信道的 Q 值随信道数增加的变化. 信道间距 50GHz, 传输光纤 100km, 系统采用完全色散补偿. SMF 和 NZDSF 的结果分别如图 4、图 5 所示:

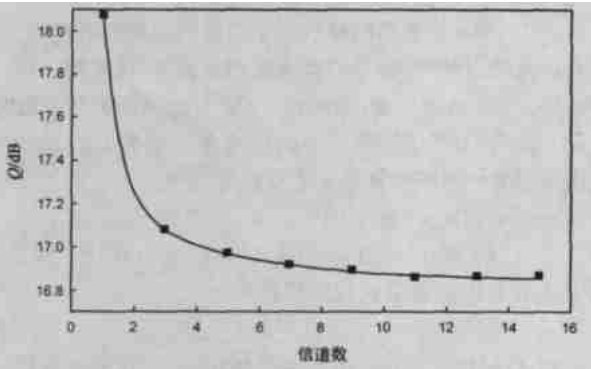


图 4 中心信道的 Q 值与 SMF 光纤中信道数的关系

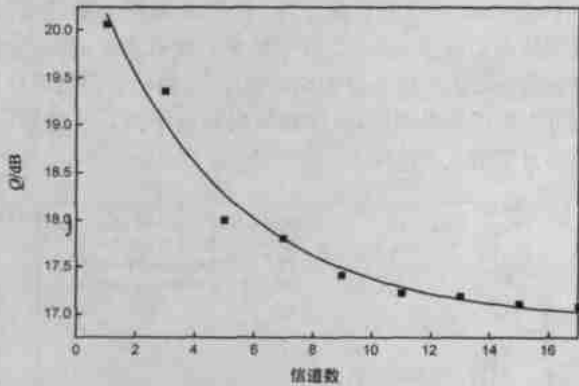


图 5 中心信道的 Q 值与 NZDSF 光纤中信道数的关系

数值结果表明对于 SMF 来说当信道数大于 9 时中心信道的 Q 值几乎不再变化,而在 NZDSF 中则需要 15 个信道以上。以此为基础我们设计了一个 DWDM 仿真系统,在所关注的目标信道两侧共 9(15) 个信道内采用分布傅立叶方法精确计算非线性效应,该范围外的信道只考虑对目标信道的 SRS 影响。对于 80 信道的 DWDM 系统,计算结果表明该方案和传统方法比较, Q 值差别小于 0.1 dB,而仿真速度大大提高。在大容量长距离 DWDM 系统的实验设计中同样可以采用该方案,在充分考虑 SRS 效应的情况下,通过精确地设计信道分布,不需要配置全部波长就可以得到满配置时的真实情况。该方案可以有效地节省资源和减少实验系统的复杂度。

## 4 结论

本文通过对 XPM 和 FWM 的分析给出它们在不同光纤中影响范围随信道间距变化的关系。在考虑多种非线性效应和色散的混合作用后,精确的数值仿真表明:在中心信道两侧以 50GHz 的间距添加信道,当信道总数大于 9(SMF)和 15(NZDSF)以后中心信道的 Q 值变化非常微弱。利用这一结论构建大容量长距离 DWDM 系统的仿真模型,其仿真效率将大大提高。该方法对系统实验的设计有重要指导意义。

## 参考文献:

- [1] Katsuhiko Shimizu, et al. 65 × 22.8 Gb/s WDM transmission over 8,398 km Employing Symmetrically Collided Transmission with Aeff Managed Fiber[C]. Anaheim: OFC2002, 2002, WX 4.
- [2] C. Hullin, et al. Ultra Long Haul 2500km Terrestrial Transmission of 320 Channels at 10Gb/s Over C+ L Bands with 25GHz[C]. Copenhagen: ECOC2002, 2002, 1.1.3.
- [3] Agrwal G.P. Nonlinear fiber optics (2nd Ed.) [M]. New York: Academic Press, 1995. 50-54.
- [4] M. Shtaif. Analytical description of cross phase modulation in dispersive optical fibers[J]. Optics Lett, August 1998, 23(): 1191-1193.
- [5] M. Shtaif, M. Eisele. Analysis of intensity interference caused by cross phase modulation in dispersive optical fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, July 1998, 10(): 979-981.
- [6] Nori Shibata, et al. Phase mismatch dependence of efficiency of wave generation through four wave mixing in a single mode optical fiber[J]. IEEE, JQE, July 1987, QE 23.
- [7] 范崇澄. 光纤中的非线性效应[M]. 北京:清华大学, 1999. Fan Chongcheng. Nonlinear fiber optics[M]. Beijing, Tsinghua University, 1999.

## 作者简介:

王国忠 男,1973 年生,毕业于北京大学物理系,目前在中兴通讯股份有限公司从事光纤通信系统研究工作。E-mail: wang.guozhong1@zte.com.cn.

施社平 男,1967 年生,毕业于北京邮电大学,目前在中兴通讯股份有限公司从事光纤通信系统研究工作。E-mail: shi.sheping@zte.com.cn.