

文章编号: 1001-3806(2009)01-0005-03

## 波分复用光网络中4波混频影响的实验研究

管爱红, 张庆辉, 傅洪亮

(河南工业大学 信息学院, 郑州 450001)

**摘要:** 为了抑制光纤中4波混频(FWM)效应引起的信道间非线性串扰, 采用了实验的方法, 对高非线性光纤中FWM效应的影响进行了研究, 测量了产生FWM的效率与信道间隔以及信号强度的关系, 比较了等信道间隔和非等信道间隔情况下FWM效应的影响。结果表明, FWM的效率随着信道间隔的增加而减小, 随信号光功率的增加而线性增加。等信道间隔情况下, FWM效应对中间信道的影响最大, 与非等信道间隔相比, FWM效应引入了1.5dB的功率代价。这些结果对有效抑制光纤中的FWM串扰是有帮助的。

**关键词:** 光通信; 非线性串扰; 4波混频; 眼图; 功率代价

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A

### Experimental study of four-wave mixing influence in WDM optical networks

GUAN Ai-hong, ZHANG Qing-hui, FU Hong-liang

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The impact of four-wave mixing(FWM) crosstalk on wavelength division multiplexing systems in high nonlinear fiber was studied experimentally. Results showed that the generated wave efficiency decreased with increasing channel spacing and input signal power. The influence of FWM on signal was compared when the channels were arranged equal and unequal. It was shown that 1.5dB larger penalty was introduced in the case of equal channel spacing than in the case of unequal channel spacing.

**Key words:** optical communication; nonlinear crosstalk; four-wave mixing; eye diagram; power penalty

### 引言

大容量长距离系统在满足日益增长的通信需求方面显示出越来越重要的作用, 高速的长距离的密集波分复用系统目前吸引了大量研究人员的目光<sup>[1-5]</sup>, 在高速长距离的波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)系统中, 光纤的传输容量主要受到放大器的自发辐射噪声和光纤非线性效应的限制, 非线性效应的影响主要来自信道间的交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)和4波混频(four-wave mixing, FWM), 而信道间的XPM可以通过适当的色散管理有效减少, 所以在长距离高速的WDM系统中FWM成为主要的限制因素。FWM造成信道能量损失, 同时新产生的FWM分量落到同时传输的其它信道, 对该信道形成同频串扰, 而且这种附加的FWM信号是不可能用任何方法消除的, 并且随着信道数的增多, 产生的新光频以 $(N^3 - N^2)/2$ 几何方式增加( $N$ 为信道数)<sup>[6]</sup>, 其影响更加严重, 因此必须事先防范。

作者简介: 管爱红(1973-), 女, 副教授, 主要从事波分复用光网络中的线性串扰和非线性串扰方面的研究。

E-mail: guanaihonghust@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-10-15; 收到修改稿日期: 2008-06-20

对于FWM引起的信道间串扰, 由于日本铺设了大量的色散位移光纤, 所以在这方面做了很多研究<sup>[7-9]</sup>, 然而, 大多数研究都停留在复杂的理论分析以及数值模拟方面, 对FWM影响的实验研究很少。作者对高非线性光纤中FWM效应引起的信道间串扰进行了实验研究, 实验测量了产生FWM的效率与信道间隔以及信号强度的关系, 实验比较了等信道间隔和非等信道间隔情况下FWM效应的影响。

### 1 理论分析

FWM引起的信道间串扰的物理起源和导致的系统性能下降可以理解为: 只要有频率为 $\omega_i, \omega_j$ 和 $\omega_k$ 的3个波同时在光纤中传播, FWM就能在频率 $\omega_{jk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$ 处产生新的波, 新产生的FWM分量落到同时传输的其它信道上, 形成该信道的同频串扰, 从而降低系统性能。这里只考虑频率为 $\omega_1, \omega_2$ 的两个光子湮灭, 同时产生两个频率为 $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 的新光子的情形, 对于3个光子合成1个光子的情形, 新光子的频率为 $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$ 。通常, 要满足其相位匹配条件, 在光纤中高效地实现这些过程是很困难的, 因此这里不予考虑。

在WDM系统中功率为 $P_i, P_j, P_k$ 的3路信号相互

作用产生的 FWM 信号功率为<sup>[10]</sup>:

$$P_{ijk} = d_{ijk}^2 \gamma^2 L_{\text{eff}}^2 P_i P_j P_k \eta_{ijk} e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中,  $d_{ijk}$  为退化因子, 当发生简并 4 波混频时 ( $i=j$ ),  $d_{ijk}=1$ , 当发生非简并四波混频时 ( $i \neq j$ ),  $d_{ijk}=2$ ;  $P_m$  ( $m=i, j, k$ ) 是第  $m$  个信道的入射功率;  $L_{\text{eff}}$  为有效传输长度;  $\alpha$  为光纤的衰减系数,  $z$  为光纤长度,  $\gamma$  为非线性系数;  $\eta_{ijk}$  为 FWM 发生的效率; 后两个因数分别定义为:

$$\gamma = \left( \frac{2\pi n_2}{A_{\text{eff}} \lambda_0} \right)^2, \quad \eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha z} \sin^2(\Delta\beta_{ijk} z/2)}{(1 - e^{-\alpha z})^2} \right]$$

式中,  $n_2$  是光纤折射率的非线性部分,  $\lambda_0$  是波分复用波长的中心波长,  $A_{\text{eff}}$  是纤芯的有效面积,  $\Delta\beta_{ijk}$  是相位失配因子:

$$\Delta\beta_{ijk} = (f_i - f_k)(f_j - f_k) \left( \frac{2\pi \lambda_0^2}{c} \right) \cdot \left\{ -D + \frac{\lambda_0^2}{2c} \frac{\partial D}{\partial \lambda} [(f_i - f_0) + (f_j - f_0)] \right\} \quad (2)$$

式中,  $c$  是光速,  $D$  是光纤的色散系数,  $\partial D/\partial \lambda$  是色散斜率,  $f_i, f_j, f_k$  分别为同时传输的 3 个信道的频率,  $f_0$  是零色散频率。

图 1 中给出了在信道间距相等的时候, FWM 产生的新频率的分布情况。由图可见, FWM 产生的多个新频率分量会与信号光频率重合, 这不仅会引起光信道能量的损耗, 还会引起信道间的串扰。

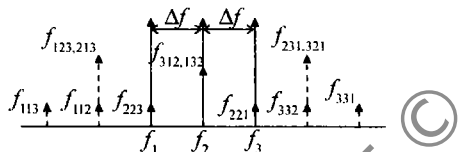


Fig. 1 New frequency produced with equally spaced channels

为了减少 WDM 系统中 FWM 效应的影响, 人们提出了非等间距配置信道的方法<sup>[11]</sup>。通过非等间距信道设计, 可以使 FWM 产生的新频率落在所有信道之外 (见图 2)。下面的实验证明了这一方法的有效性。

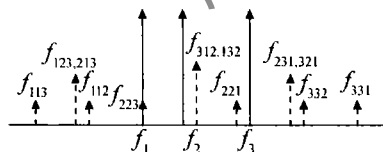


Fig. 2 New frequency produced with unequally spaced channels

## 2 实验装置

图 3 是考察 FWM 影响的实验装置图, 3 个分布反馈激光器 (distributed feed back, DFB) 产生的连续光经  $3 \times 1$  耦合器后, 由掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifiers, EDFA) 放大, 之后经过调制, 调制后的信号经过 10km 的单模光纤 (single mode fiber, SMF) 消除各信道码型的相关性, 为了提高各路信号的功率, 信号又一次经过 EDFA 放大, 放大后的信号输入 135m 的高非线性光纤 (high nonlinear fiber, HNLF), 经过高非线

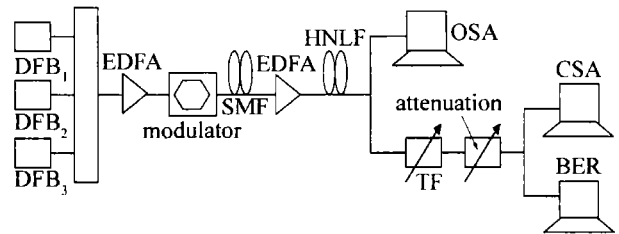


Fig. 3 Experiment setup

性光纤时信号之间发生 FWM 效应, 光谱分析仪 (optical spectrum apparatus, OSA) 用来观察高非线性光纤输出端光谱, 可调谐滤波器 (tunable filter, TF) 滤出其中一路考察, 可调衰减器调节输出信号的功率, 以测量不同输出功率条件下的误码率 (bit error rate, BER), 通信分析仪 (communication signal analysis, CSA) 和误码分析仪用来观察信号眼图和测量误码率。

## 3 实验结果与分析

首先, 考察了两路信号情况下产生的新频率的强度相对于信号的比例与波长间隔的关系。实验中只用到两个 DFB 激光器, 调制器输出 10Gbit/s 的非归零码 ( $2^7 - 1$ ), 两路信号波长和功率分别为:  $\lambda_1 = 1561.9\text{nm}$ , 功率为 9.13dBm;  $\lambda_2 = 1563.4\text{nm}$ , 功率为 10.72dBm。高非线性光纤参量见表 1。

Table 1 Definition of high nonlinear fiber

parameter	HNDS1332AB-9-3
length	135m
zero dispersive wavelength	1552nm
dispersive coefficient	$-0.07\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$
dispersive slope	$0.031\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$
effective area	$11\mu\text{m}^2$
attenuation	0.51dB/km
connect attenuation	0.6dB/splice
polarization dispersive	$0.05\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$
nonlinear coefficient	$20\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$

在高非线性光纤的输出端, 由光谱分析仪测量输出信号功率和产生的新频率功率, 定义  $P_s = P_s^{(1)} + P_s^{(2)}$ ,  $P_{\text{FWM}} = P_{\text{FWM}}^{(1)} + P_{\text{FWM}}^{(2)}$ ,  $P_s^{(1)}, P_s^{(2)}$  为两路输入信号功率,  $P_{\text{FWM}}^{(1)}, P_{\text{FWM}}^{(2)}$  为产生的两个新频率, 产生 FWM 的比例由下式给出:

$$R_{\text{FWM}} = P_{\text{FWM}}/P_s \quad (3)$$

图 4 中给出了产生 FWM 的比例  $\eta$  与信道间隔  $\Delta\lambda$  的关系, 由图可见, 产生 FWM 的比例随着信道间隔的增加而减小。由于所用的高非线性光纤色散系数和色散斜率都很小, 非线性系数大, 产生 FWM 的比例高, 并且 FWM 比例随波长间隔下降缓慢, 当信道间隔达十几个纳米时, FWM 的比例仍然很高 ( $-30\text{dB}$ )。

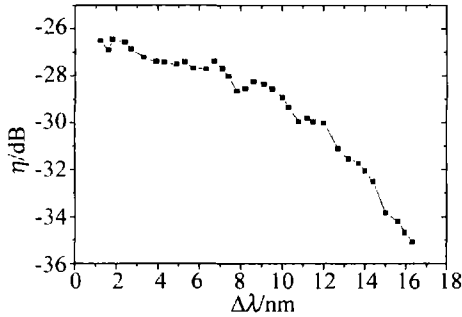


Fig. 4 FWM efficiency  $\eta$  versus channel spacing  $\Delta\lambda$

图 5 中给出了产生 FWM 的比例与信号光功率的关系。由图可见,产生 FWM 的比例随信号光功率的增加而线性增加。

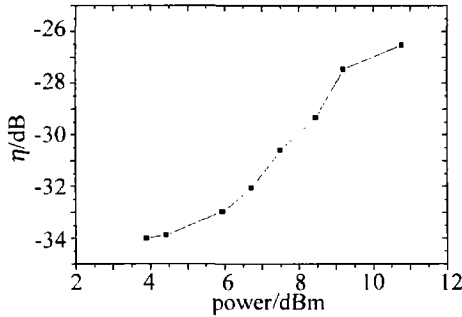


Fig. 5 FWM efficiency  $\eta$  versus signal power

其次,考察了等信道间隔和非等信道间隔情况下 FWM 的影响。等信道间隔情况下,3 路信号的波长和功率分别为: $\lambda_1 = 1554.72\text{nm}$ , 功率为  $7.89\text{dBm}$ ;  $\lambda_2 = 1559.04\text{nm}$ , 功率为  $8.93\text{dBm}$ ;  $\lambda_3 = 1563.36\text{nm}$ , 功率为  $8.78\text{dBm}$ ; 调制器输出  $10\text{Gbit/s}$  的非归零码 ( $2^7 - 1$ )。图 6 是等信道间隔情况下输出信号光谱图,由输出

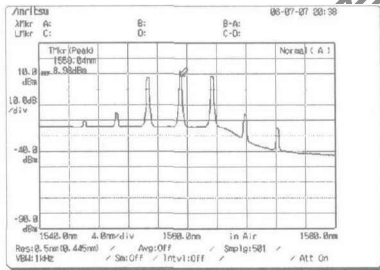


Fig. 6 Output signal spectrum when equally spaced channels

光谱可见,3 路信号产生的 FWM 新频率有 4 路落在信道之外,其余新频率由于落在信号上而无法看出。图 7 是对应的 3 路信号的眼图,图 7a ~ 图 7c 分别对应图

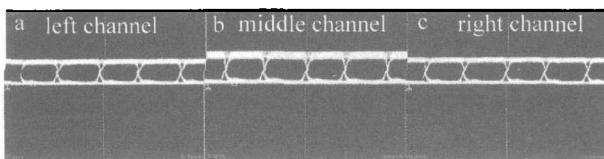


Fig. 7 Output signal eye diagrams when equally spaced channels

6 光谱图中的左边信号、中间信号和右边信号,由眼图比较可见,中间信道受到的影响最严重,因为有两个 FWM 新频率光落到中间信道,而两边信道分别只有 1

个 FWM 新频率与传输信号重合,所以受到的影响较小。

非等信道间隔情况下,3 路信号的波长和功率分别为: $\lambda_1 = 1554.72\text{nm}$ , 功率为  $7.89\text{dBm}$ ;  $\lambda_2 = 1556.4\text{nm}$ , 功率为  $8.93\text{dBm}$ ;  $\lambda_3 = 1563.36\text{nm}$ , 功率为  $8.78\text{dBm}$ ; 调制器输出  $10\text{Gbit/s}$  的非归零码 ( $2^7 - 1$ )。图 8 是非等信道间隔情况下输出信号光谱图,3 路信

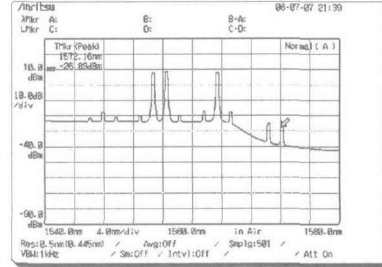


Fig. 8 Output signal spectrum when unequally spaced channels

号产生 9 个 FWM 新频率光,9 个频率都没有落到信号上,图 9 中给出了对应 3 路信号的眼图,图 9a ~ 图

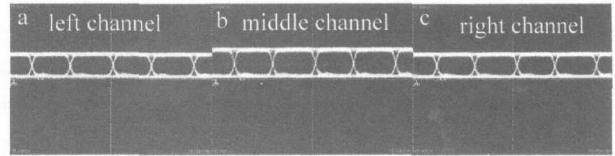


Fig. 9 Output signal eye diagrams when unequally spaced channels

9c 分别对应图 8 光谱图中的左边信号、中间信号和右边信号,可见 3 路信号都没有受到 FWM 效应的影响。比较图 7b 和图 9b 可见,等信道间隔的情况下,产生的 FWM 新频率落在信道上,对信号产生影响;非等信道间隔情况下,产生的 FWM 新频率落在信道之间,对信号不产生影响。

图 10 中给出等信道间隔和非等信道间隔情况下,测量的中间信道的误码率与接收光功率的关系,可见与非等信道间隔相比,等信道间隔情况下由于 FWM 效应,引入  $1.5\text{dB}$  的功率代价。

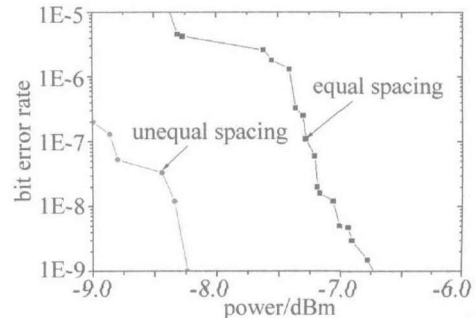


Fig. 10 BER versus output signal power

### 4 结论

在 WDM 系统中由不同信道相互作用产生 FWM 会把信号的相当部分能量转移到由 FWM 产生的新光

(下转第 31 页)

### 3 结 论

在重复频率激光负载下,电光晶体出现较大的温升、温度梯度、应变。温度梯度和应变会造成入射激光波前畸变,另外应变将导致电光开关严重的退偏损耗。作者建立了 DKDP 晶体的热传输、热弹性力学有限元模型。在此基础上,研究了晶体吸收系数、晶体厚度、光斑边界与晶体物理边界相对距离、功率密度分布状况对等离子体电光开关中温度场应变场分布的影响规律。数值计算结果和分析表明,晶体热沉积大小取决于晶体的吸收系数和厚度,而温度场分布不仅和入射激光功率密度分布有关,还与光斑边界和晶体边界相对距离密切相关。最后温度场分布和晶体热力学参量一起决定了晶体应变场大小及分布。在设计中,为降低电光开关的热效应,应选择吸收系数小的晶体,而且晶体在通光方向上应尽可能薄,对于入射激光,应尽量使其功率密度分布均匀,并使光斑边界尽可能靠近晶体边界。

#### 参 考 文 献

[1] KHRISTOV P I, TOMOV I V, SALTIEL S M. Self-heating effects in e-

(上接第7页)

波上,这样的能量转移导致了对特定信道的功率损耗,同时新产生的 FWM 分量落到同时传输的其它信道造成串扰,从而降低系统性能。并且 FWM 效应一旦发生,产生的新频率是不可能用任何方法消除的,因此必须预先防范。作者对高非线性光纤中的 FWM 效应进行了实验研究,实验测量了产生的新频率相对与信号的比例与信道间隔和信号强度的关系,发现产生 FWM 的比例随着信道间隔的增加而减小,随输入光功率的增加而线性增加。实验比较了等信道间隔和非等信道间隔情况下, FWM 效应对中间信道的影响,发现与非等信道间隔相比,等信道间隔情况下 FWM 效应引入 1.5dB 的功率代价。

#### 参 考 文 献

[1] XU L, WANG T, CHOWDHURY A, *et al.* Spectral efficient transmission of 40Gbit/s per channel over 50GHz spaced DWDM systems using optical carrier suppression, separation and optical duobinary modulation [C]//OFC/NFOEC'2006. Anaheim, California: Optical Society of America, 2006: NTUC2.

[2] CHEN D Z, WELLBROCK G, PENTICOST S J, *et al.* World's first 40 Gbit/s overlay on a field-deployed, 10Gbit/s, mixed-fiber, 1200km, ultra long-haul system. [C]//Thomas Afferton OFC'2005. Anaheim, California: Optical Society of America, 2005: OTuH4.

lectro-optic light modulators [J]. Opt & Quantum Electron, 1983, 15 (6): 289-295.

- [2] KURTEV S Z, DENCHEV O E, SAVOV S D. Effects of thermally induced birefringence in high-output-power electro-optically Q-switched Nd:YAG lasers and their compensation [J]. Appl Opt, 1993, 32(3): 278-285.
- [3] ZHANG J, ZHANG X J, WEI X F, *et al.* Depolarized-loss analysis of the electro-optic crystal KDP in repetition frequency laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 229-233 (in Chinese).
- [4] WEAVER L F, PETTY C S, EIMERL D. Multikilowatt pockels cell for high average power laser systems [J]. Appl Phys, 1990, 68(6): 2589-2598.
- [5] YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. 3rd ed. Beijing: High Education Press, 1998: 334-336 (in Chinese).
- [6] CAO D X, ZHANG X J, ZHENG W G, *et al.* Simulation of thermodynamics of electro-optic switches for high average power [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1417-1422 (in Chinese).
- [7] PITTS D, SISSOM L. Schaum's outline of theory and problems of heat transfer [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 180 (in Chinese).
- [8] ZHANG K C, WANG X M. Nonlinear optic crystal material science [M]. Beijing: Science Press, 2005: 142-150 (in Chinese).

- [3] DAIKOKU M, YOSHIKANE N, MORITA I. Performance comparison of modulation formats for 40Gbit/s DWDM transmission systems [C]//Thomas Afferton OFC'2005. Anaheim, California: Optical Society of America, 2005: OFNI.
- [4] PILIPETSKII A N. Pulse propagation effects at high bit rates [C]//OFC/NFOEC'2006. Anaheim, California: Optical Society of America, 2006: OWJ7.
- [5] GUAN A H, SUN J Q. Impact of OXC architecture on the accumulation of intraband crosstalk in WDM optical networks [J]. Lasers Technology, 2006, 30(6): 653-656 (in Chinese).
- [6] TKACH R W, CHRAPLYVY A R, FORGHIERI F, *et al.* Four-photon mixing and high-speed WDM systems [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(5): 841-849.
- [7] SHIBATA N, BRAUN R P, WAARTS R G. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber [J]. IEEE J Q E, 1987, QE23(7): 1205-1210.
- [8] IINOUE K. Phase-mismatching characteristic of four-wave mixing in fiber lines with multistage optical amplifiers [J]. Opt Lett, 1992, 17(11): 801-803.
- [9] NEOKOSMIDIS I, KAMALAKIS T, CHIPOURAS A, *et al.* New techniques for the suppression of the Four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1137-1144.
- [10] AGRAWAL G P. Nonlinear optical fiber [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 2002: 36-40 (in Chinese).