

四波混频在长距离相干光纤传输中的影响

顾玄业

(英国, 东伦敦大学, 电工及电子工程系和英国 BT 实验室海底系统)

提 要

本文研究光纤非线性现象之一的四波混频对长距离相干多路光纤传输系统的影响. 通过对一条长度为 550 km, 采用 9 个掺铒光纤放大器的频分复用系统的实验, 清楚地观察到了四波混频这一光纤非线性. 实验的结果符合对四波混频的理论分析与计算. 结果表明, 对信息容量在每秒 10^9 bit 数量级, 采用常规的不归零码作信号方式的多路传输, 光纤中的四波混频现象将严重地影响其传输性能.

关键词 光纤, 四波混频, 相干光纤传输.

1 引 言

为了提高传输系统容量, 光通信频分复用(FDM)已越来越受到重视. 当光纤接入系统之后, 由于光纤中四波混频的存在^[1], 将对系统带来进一步的限制. 在频分复用系统中, 四波混频的非线性作用能够限制所容许的每路发送光功率, 多路信号之间的频率间隔和能够同时传输的信号路数^[1,2]. 由于四波混频作用引起的串话限制了最大可容许的发射功率. 这种串话取决于波的混合效率, 该效率与光纤色散, 信号间的频率间隔和传输的光纤长度有关^[3].

本文先从理论上分析四波混频非线性作用对光频分复用系统的影响, 然后从实验上进一步证实四波混频对未来实用光纤传输系统的影响.

2 理论分析

当一束强烈的光通过硅光纤时, 将产生各种光纤的非线性现象比如受激布里渊散射^[4]、受激喇曼散射^[5]、自相位调制^[6]和参量过程^[7]. 本文仅考虑单模光纤中由四波混频产生的在信号以外的新的频率分量. 这种新频率分量落在有用信号频带中将产生串话, 因而影响到系统性能. 在本文涉及的范围中, 实际上仅仅是参量过程第三类不确定性与四波混频有关. 这是因为在硅光纤中第二类不确定性是不存在的^[8].

2.1 四波混频过程

设三个频率分别为 f_i, f_j 和 f_k (其中 $j \neq k$) 以不同一个方向输入单模光纤. 由这些频率的非线性作用, 将产生第四个频率, 以 f_{ijk} 表示, $f_{ijk} = \pm f_i \pm f_j \pm f_k$ (下标 i, j 和 k 选择 1, 2, 和 3). 这些新的频率有可能落在信号频带中, 因而在波分复用系统中产生串话. 这一类过程同样可以在那些新频率上产生不可忽略的功率转换. 由四波混频所产生的功率转换, P_{ijk} , 可以表示为^[3]

$$P_{ijk} = \zeta \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} (Dx_{1111})^2 \frac{L_{\text{eff}}^2}{A_{\text{eff}}^2} P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \cdot \frac{1 + 4^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \beta_{ijk} + \beta_k - \beta_i - \beta_j \\ &= \left(\frac{2\pi\lambda^2}{c} \right) |f_i - f_k| |f_j - f_k| \cdot \left\{ M + \frac{dM}{d\lambda} \frac{\lambda^2}{2c} (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 n 为光纤芯的折射率, c 为光在自由空间的传输速率, D 为简并因子, x_{1111} 为第三类非线性不确定性, L_{eff} 为光纤有效长度表示为 $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$, α 为光纤衰减系数, A_{eff} : HE_{11} 模有效面积, P_i, P_j, P_k 分别为第 i, j, k 路信号发射功率, L 为光纤实际长度, ζ 为四波混频混合效率, $\Delta\beta$ 为不匹配相位因子, M 为光纤色散系数. 当传输的波长远离零色散波长时, $(dM)/(d\lambda)$ 项由于很小可忽略不计. 然而当接近于零色散波长时, $M \approx 0$, 必须考虑 $(dM/d\lambda)$ 项. 从(2)式和(3)式, 可以看出混合效率 ζ 随频率间隔, 光纤色散和传输长度的增加而增加.

2.2 多路相干外差系统中的四波混频

考虑三个信号频率 f_1, f_2 和 f_3 分别为各自通路载波频率, 当满足一定条件时, 可以由光纤中的四波混频产生数个新频率. 图 1 表示了由四波混频引起的新频率分量. 图 1(a) 为两路信号同时传输的情况. 这时 $f_i = f_j = f_1, f_k = f_2, f_1$ 和 f_2 代表信号. 由于四波混频作用的结果, 在新频率 f_{112} 和 f_{221} 上产生了一定的功率. 将 f_{112} 和 f_{221} 上的功率和 f_1, f_2 上的功率比较, 可以有二种情况: 当 f_{112} 和 f_{221} 上的功率相对于 f_1 和 f_2 来说较少时, 在有用信道上仅产生功率损失. 这种损失在接收机性能上表现为灵敏度的损害. 然而, 当 f_{112} 和 f_{221} 上的功率可与 f_1 和 f_2 上的功率相比较时, 所产生的非线性功率与 f_1 和 f_2 上的功率进行四波混频过程, 从而产生串话而影响有用信道的性能.

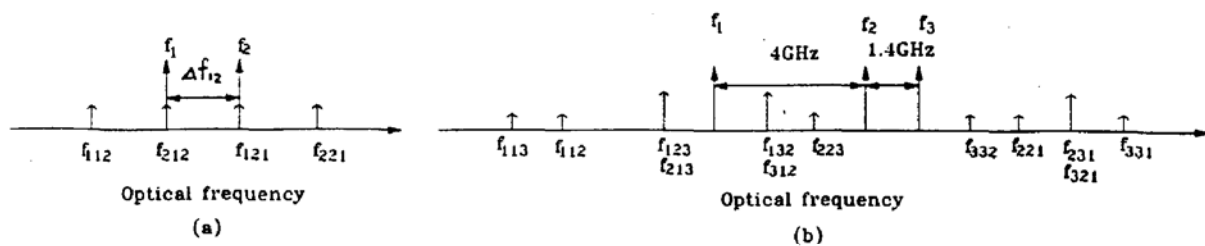


Fig. 1 Input signals and new frequencies generated through FWM process (a) two signals, and (b) three signals

由四波混频产生的新频率分量随着传输路数的增加而迅速上升. 在一个三路波分复用系统中, 由四波混频作用可产生在信号以外的 9 种新频率示于图 1(b). 在实验中信号通路 f_1 和信号通路 f_2 之间的频率间隔 Δf_{12} 取为 4 GHz, 通路 f_2 和通路 f_3 之间的间隔 Δf_{23} 取为 1.4 GHz.

当四路信号同时在光纤中传输时, 由四波混频产生的总的新频率分量为 12 (这里如果有几种新频率都产生在同一频率上仅作为一种新频率计算), 如图 2 所示. 显然, 四波混频使所有的信号通路都受到互相干扰.

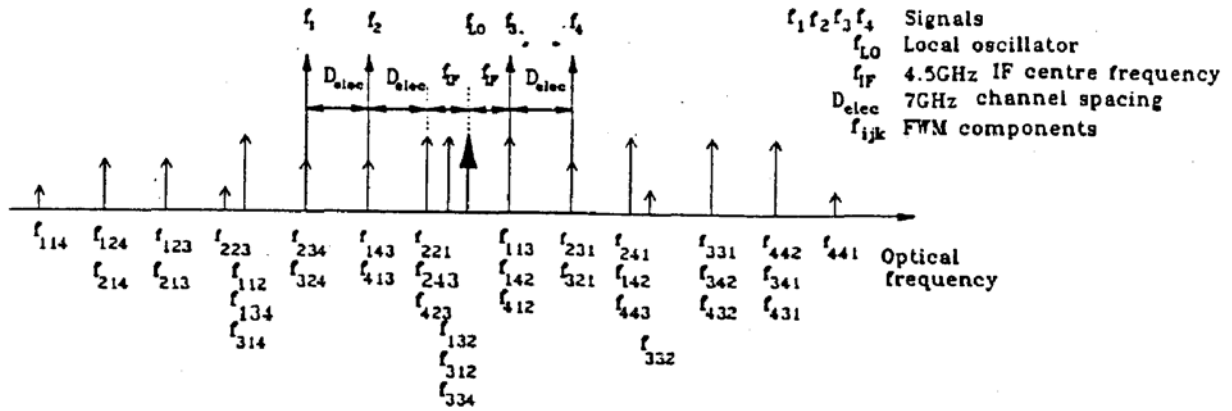


Fig. 2 Four-wave mixing components in a four channel system

3 实验系统与四波混频产物的测量

为了使研究结果能直接用于未来的实用长距离光纤传输系统,作者做了一条长度为 550 km 能同时传输 4 路以下的相干通信系统如图 3 所示. 该系统由 9 个掺铒光纤放大器, 550 km 色散位移光纤组成, 可同时传输 4 路 24 Gbit/s 的不为零码数字信号. 该系统也可用作 2 路或 3 路传输, 只要把不用的激光器源关掉. 为测量由四波混频过程产生的非线性功率, 采用了相干外差技术, 因而可在中频段测得不同频率的四波混频功率.

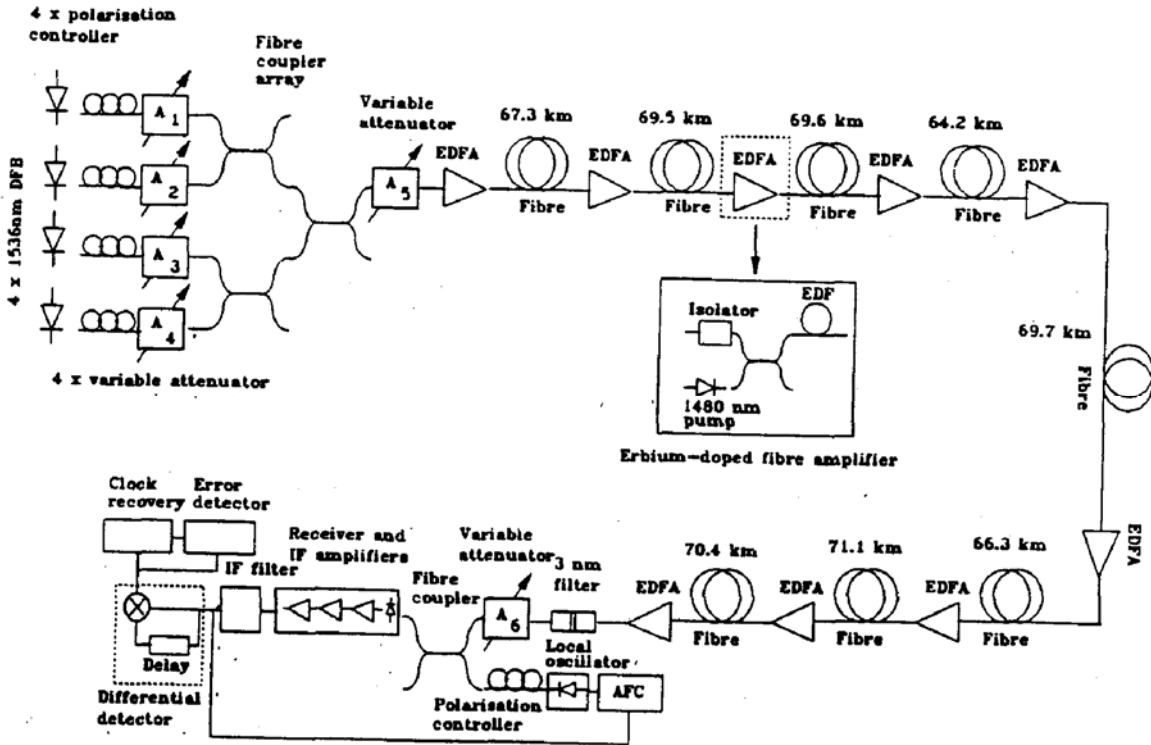


Fig. 3 Experimental set up of 550 km, multi-channel erbium-doped fibre amplifier system

在 4 路频分复用系统中, 被测的信号经 550 km 传输以后误码率高达 10^{-6} . 一般在数字通信系统中误码率至少要低达 10^{-9} . 所以在后续的实验中仅用 2 路复用系统来衡量四波混频对

误码率的影响. 下面给出回路传输的实验条件. 通路安排采用非均匀频率间隔方法. 第 1 和第 2 路的间隔为 8 GHz, 第 2 和第 3 路的间隔为 12.5 GHz, 第 3 和第 4 路的间隔为 8 GHz. 每一路光发送功率在第一个掺铒光放大器的输入端为 -10 dBm, 经放大器后的输出为 $+2$ dBm. 每一激光器偏置在 3 倍于阈值电流上, 给出典型的 0 dBm 输出功率和 8 MHz 谱宽. 这样的条件可使采用连续相位的频移键控 (CPFSK), 2.4 Gbit/s 调制速率的系统中相位噪声忽略不计.

当获得 2 路传输的误码率特性后, 在保持相同实验条件的情况下, 进一步测量了由四波混频效应产生的新频率. 为测量新频率上的非线性功率, 二个信号激光器工作在连续波状态与第三个激光器(本振)混合, 因而可在中频范围内观察四波混频. 观察 3 路系统中四波混频的方法与 2 路系统类似, 不再重复.

4 实验结果

在进行 550 km 多路传输实验之前, 先进行了 550 km 单路传输. 与 0 km 实验结果相比, 接收机灵敏度增加了 5 dB 损害, 包括光放大器自发辐射噪声 4.3 dB, 系统剩余反射 0.4 dB 和色散 0.3 dB^[9,10]. 图 4 给出了 2 路复用系统在通路间隔分别为 10 GHz 和 20 GHz 时误码率测试结果. 和单路传输相比, 在 20 GHz 间隔时增加了 2.4 dB 损害, 在 10 GHz 时损害增加到 4.6 dB. 这些灵敏度的进一步损害被认为是由四波混频分量 f_{221} 的影响造成的. 另一四波混频分量 f_{112} 和本振混合以后落在有用信道之外, 因而可以忽略. 图 5 解释了与安排本振频率有关的中频频谱. 通路 f_1 和 f_2 之间的频率间隔 Δf_{12} 为 10 GHz. 图 5(a) 是传输前的频谱, 其中 f_2/f_1 是通路 f_1 和通路 f_2 的混合. 图 5(b) 是经 550 km 传输之后的频谱, 照片上的 f_{221} 是其中之一四波混频分量. 进一步将 f_1 和 f_2 的频率间隔减小为 1 GHz, 这样在一幅照片上可同时观察 f_{112} 和 f_{221} 示于图 6. 图 7 表示了激光器经调制前后的频谱. 图 7(a) 是调制前连续波的频谱, 图 7(b) 是调制后得到 CPFSK 信号频谱. 由于很难从调制以后的频谱上观察四波混频现象, 所以用未经调制的连续波传输来观察四波混频.

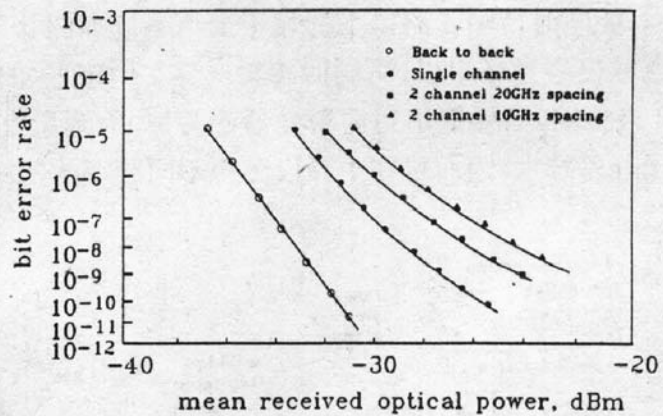


Fig. 4 BER performance indicating FWM effects as a function of channel spacing

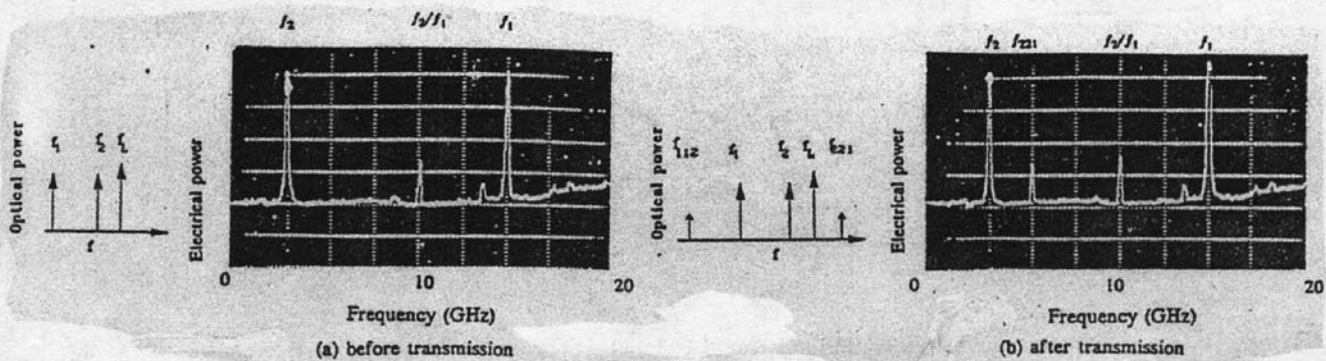


Fig. 5 Optical frequencies generated through FWM process for $\Delta f_{12} = 10$ GHz

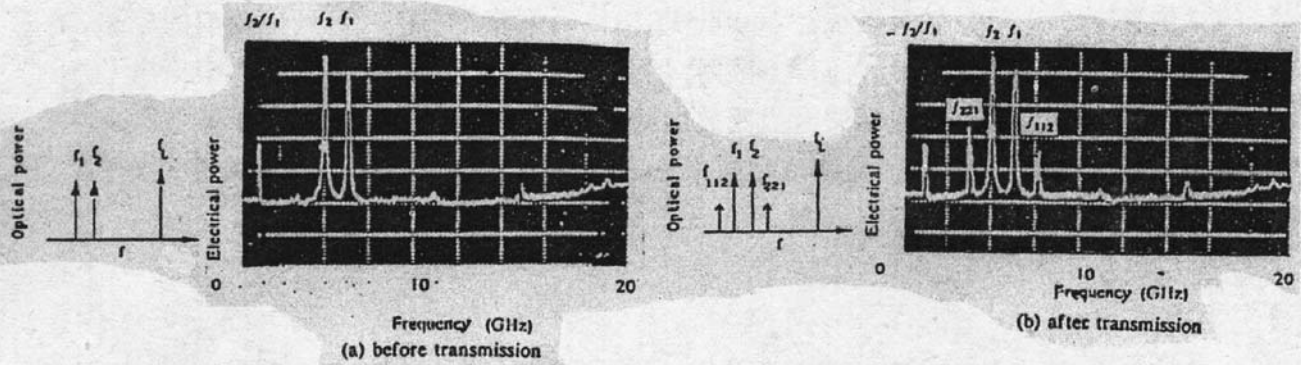


Fig. 6 Optical frequencies generated through FWM process for $\Delta f_{12} = 1$ Hz

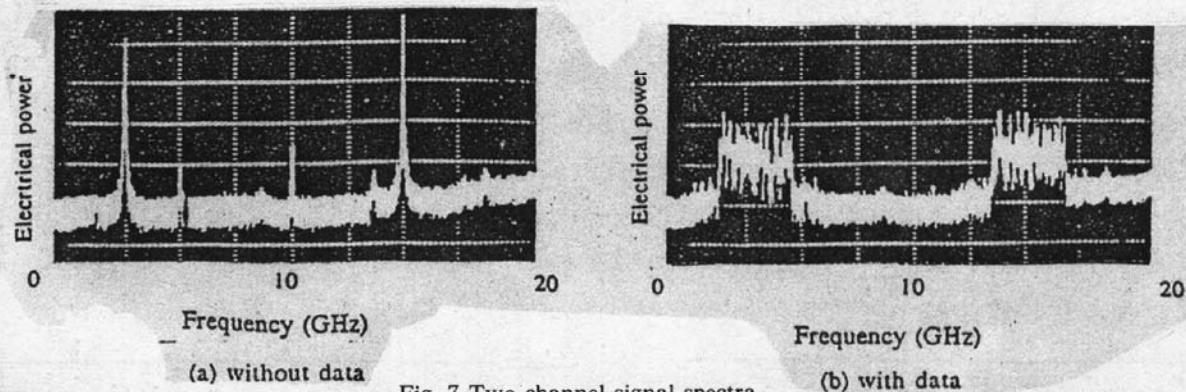


Fig. 7 Two channel signal spectra

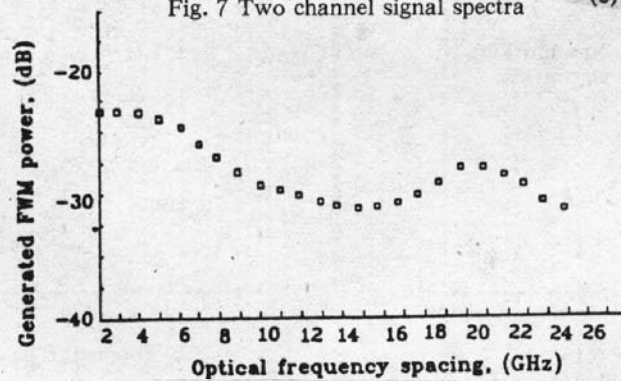


Fig. 8 Measured FWM powers of 550 km-long fibres as a function of frequency spacing

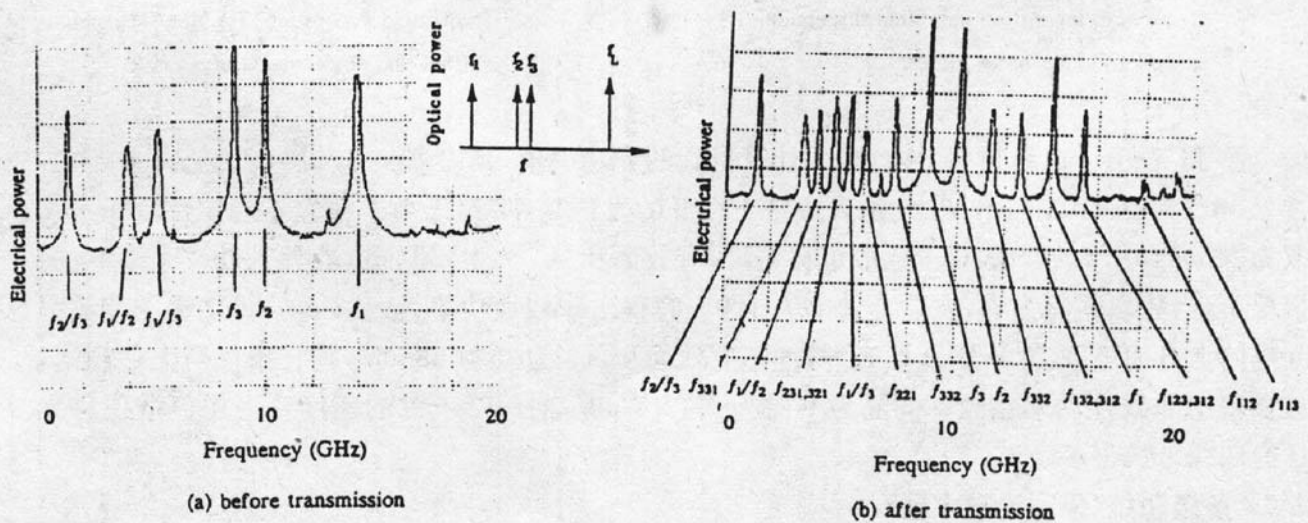


Fig. 9 Four-wave mixing in a three channel, 550 km transmission system

图 8 表示在 2 路传输系统中四波混频功率相对于频率间隔的变化结果. 每路入纤功率为 $+0.6 \text{ dB}_m$, 线路光放大器的平均输入和输出功率分别在 -16 dB_m 和 -2 dB_m 左右.

图 9 解释了 3 路频分复用系统经 550 km 传输以后频谱图. 图 9(a)是传输前的频率, f_1 、 f_2 和 f_3 分别代表通路 1、2 和 3, 它们之间的混合结果 f_2/f_3 、 f_1/f_2 和 f_1/f_3 . 图 9(b)给出了经过 550 km 光纤传输以后的频谱包括所有由四波混频过程产生的新频率产物. 由于本振频率在光频域中高于信号频率, 故经外差检测以后在中频段得到的四波混频分量的频率先后次序与图 1(b)所示的相对位置相反. 这就从实验上验证了理论分析.

5 讨 论

实验结果说明: 四波混频限制了多路传输性能, 其非线性产物取决于调制类型、发射功率、传输路数、通路间隔、光纤色散以及传输长度, 也取决于光纤类型. 由四波混频过程产生的非线性现象在有光纤放大器和无光纤放大器的系统中不同.

5.1 单级系统(不采用光放大器)

由四波混频过程产生的非线性功率, 由波的混合效率 ζ 决定. ζ 则取决于相位不匹配因子 $\Delta\beta$. 如图 10 所示, 由(2)式和(3)式计算得到关于 $\Delta\beta$ 的波混合效率. 所用的参数为: 光纤衰减系数 $\alpha = 0.21 \text{ dB/km}$, 色散系数 $M = -1.3 \text{ ps/(nm}\cdot\text{km)}$, 波长 $\lambda = 1535 \text{ nm}$. 为了与色散位移光纤比较, 图 10 中曲线 2 给出了普通光纤的波混合效率. 计算时除了色散 $M = 15 \text{ ps/(nm}\cdot\text{km)}$ 外, 其它参数与计算曲线 1 时相同*.

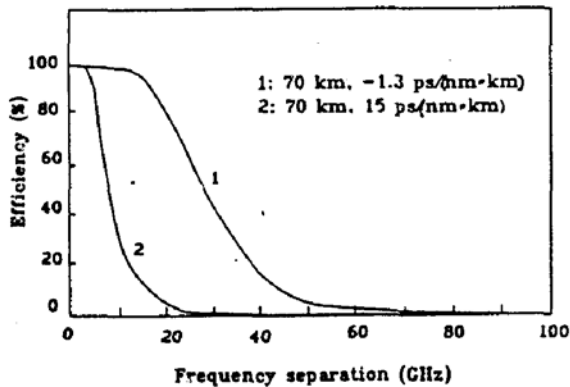


Fig. 10 Calculated efficiency as a function of frequency separation for the dispersion-shifted and step-index fibres

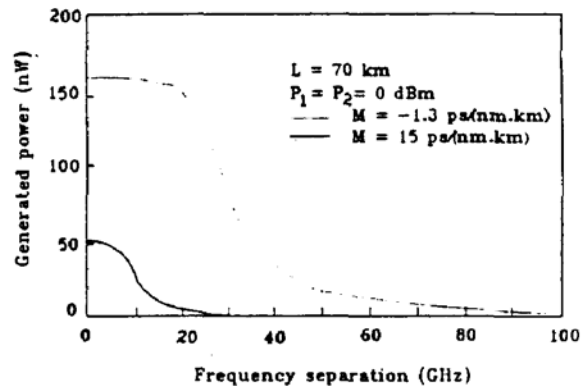


Fig. 11 Calculated efficiency as a function of frequency separation for the dispersion-shifted and step-index fibres

图 11 表示了在新频率上由(1)式计算得到的光功率值, 其中 $D = 3$, $f_i = f_j = f_1$, $f_k = f_2$, 且 $P_1 = P_2 = 0 \text{ dBm}$, P_1 和 P_2 分别为通路 1 和 2 的发射功率, 第三类非线性不确定性因子 $\chi_{(111)}$ 取为^[7] $5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{erg}$, 对于色散位移光纤, 有效面积 A_{eff} 为^[11] $50 \mu\text{m}^2$. 在输入功率是 0 dBm 的情况下, 当频率间隔为零, 波混合效率为 100% 时得出非线性功率为 -38 dBm . 该功率随着频率间隔的上升而下降. 对于阶跃型光纤, 纤芯有效面积 A_{eff} 为^[11] 为 $88 \mu\text{m}^2$, 其它条件与上述相同, 这样得出非线性功率在频率间隔为 0 时为 -42.7 dBm . 曲线 2 下降的速度较之用色散位移光纤的曲线 1 快得多.

5.2 多级系统(采用光放大器)

对单级系统, 计算由四波混频产生的非线性功率比较简单. 然而对经过多次重复放大的光

* 为方便起见, 这些曲线均以归一化取值.

放大器级联系统来说,情况要复杂得多.由文献[12]给出的理论模型建议:当频率间隔小于 20 GHz 时,四波混频功率的最小值在 15 GHz 左右示于图 12.这是考虑了单级及后续的多级接续的相位匹配过程.然而由于净损害是后续的总的功率转换决定的,故预测在 10 GHz 的损害为 4.5 dB 和 20 GHz 的损害为 24 dB.如果引入更多路数,将引起进一步的四波混频效应.所以对光信号重复放大的级联系统,必须先光纤跨距之间建立一个相位不匹配过程来减小四波混频效应,然后再由此来决定多路传输中的最小通路的频率间隔.

5.3 灵敏度损害

接下去估计由四波混频引起的相干光外差系统的接收机灵敏度损害.由相干外差检测得到的接收信号包含:信号与本振混合分量,四波混频效应产生的新频率与本振混合的分量以及信号与四波混频产生的新频率混合的分量.当四波混频功率落在信号频带内时将干扰有用信号,其结果是导致接收机灵敏度损害.因四波混频频率与信号混合的分量与另外二个分量比较可忽略不计,因而接收机灵敏度损害 d 为:

$$d(\text{dB}) = 10 \log \left[1 + 2 \sqrt{\frac{P_{\text{FWM}}}{P_s} - \frac{P_{\text{FWM}}}{P_s}} \right] \quad (4)$$

式中 P_s 为信号功率, P_{FWM} 为由四波混频产生的非线性功率.这样,对于一个灵敏度是 -27 dBm 的外差光接收机,当输入功率为 0 dBm,考虑 100% 的波混合效率时,在经过 70 km 色散位移光纤传输以后,损害为 1.7 dB.当利用阶跃型光纤时,由 P_{FWM} 影响后的灵敏度损害可以减轻. P_{FWM} 在阶跃型光纤中计算为 54 nW,该功率使灵敏度损害 1.1 dB.由于四波混频的影响,在给定的灵敏度和容许的损害条件下,每路发射功率被限制在一定值.

从以上计算获得:在考虑四波混频情况下,在 1.5 μm 波长段,阶跃型光纤更适合于频分复用系统.在利用色散位移光纤的情况下,通路间隔必须增加到 60~70 GHz 来显著地减轻四波混频效应.

5.4 相干外差系统与直接检测系统的比较

从图 12 看出,有数个四波混频峰值出现在不同的频率间隔中.实际上对于相干光外差检测系统,这些峰值在检测后不一定都落在有用信号频带内,比如象 20 GHz 处的峰值.当仔细安排通路间隔之后,外差检测系统具有可以避免这些峰值的优点.然而在外差系统中,因存在相干增益,所产生的四波混频功率会由此增加,四波混频功率越弱,相干增益越强.所以当通路间隔决定之后,相干系统比直接检测系统遭受到更多的四波混频干扰.

6 结 论

通过对 550 km,码速为 24 Gbit/s 频分复用传输线路中四波混频的研究,清楚地观察到信号之间的四波混频非线性干扰.在光放大器系统中由考虑四波混频后,建立了决定最小通路间隔的方法.并且得出,为了避免频分复用系统中通带内的串话,频率间隔通常要比所期待的高.研究的结果为设计长距离多路传输系统提供了实用的依据.

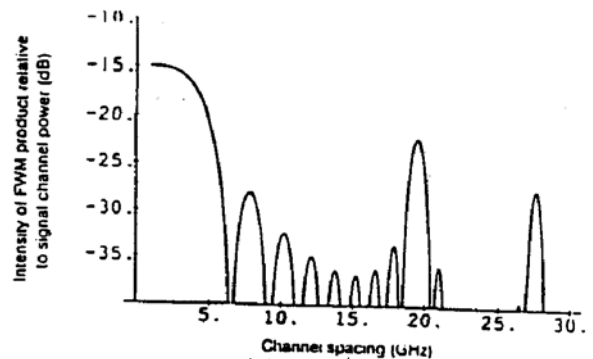


Fig. 12 Intensity of generated FWM product as a function of channel spacing

参 考 文 献

- [1] D. Cotter, Fibre nonlinearity in optical communications. *Opt. & Quant. Electron*, 1987, **19**:1~17
- [2] M. W. Maeda, W. B. Sessa, W. I. Way, *et al.*, The effect of four-wave mixing in fibres on optical frequency-division multiplexed system. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9):1402~1408
- [3] N. Shibata, R. P. Braun, R. G. Waarts, Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fibre. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(7):1205~1210
- [4] E. P. Ippen, R. H. Stolen, Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(11):539~541
- [5] R. H. Stolen, E. P. Ippen, A. R. Tynes, Raman oscillation in glass optical waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**(2):62~64
- [6] M. Stern, J. P. Heritage, R. N. Thurston *et al.*, Self-phase modulation and dispersion in high data rate fibre-optic transmission systems. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(7):1009~1016
- [7] K. O. Hill D. C. Johnson, B. S. Awasaki, *et al.*, CW three-wave mixing in single-mode optical fibres. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(10):5098~5106
- [8] G. P. Agrawal, *Nonlinear fibre optics*. Academic Press, 1989:289~325
- [9] A. Lord, W. A. Stallard, A laser amplifier model for system optimization. *Opt. & Quant. Electron.*, 1989, **21**(6):463~470
- [10] J. L. Gimlett, M. Z. Iqbal, L. Curtis, *et al.*, Impact of multiple reflection noise in Gbit/s lightwave systems with optical amplifiers, *IEE Electron. Letts.*, 1985, **25**(20):1393~1394
- [11] D. C. Johnson, K. O. Hill, B. S. Kawasaki, Brillouin optical-fibre ring oscillator design. *Radio Science*, 1977, **12**(4):519~528
- [12] A. D. Ellis, W. A. Stallard, Four wave mixing in ultra long transmission systems incorporating linear amplifiers, IEE Colloquium, *Non-linear effects in fibre communications*, Savoy Place, London, November 1990:1/6~4/6

Effects of four-wave mixing in long distance Coherent optical fibre transmission

GU Xuanye

(Department of Electrical and Electronic Engineering, University of East London,
Dagenham, Essex RM8 2AS, United Kingdom)

(Received 28 September 1992; revised 1 February 1993)

Abstract

In this paper, effects of one of the fibre nonlinearities, four-wave mixing, in long distance coherent multichannel optical fibre transmission are studied. An optical frequency division multiplexed system with 9 erbium doped fibre amplifiers, transmitting over 550 km of fibre is used in the experiment. The nonlinear interactions between the channels due to the four-wave mixing are clearly observed. Experimental results are well agreed with the theoretical analysis and calculations. Results show that for multichannel transmission at several Gbit/s with conventional non-return to zero data, transmission performance is significantly affected by the four-wave mixing.

Key words Optical fibres, four-wave mixing, coherent fibre-optic transmission