

文章编号: 1002-2082(2007)05-0608-06

光纤通信中有色散影响的受激喇曼 散射信道特性研究

刘毓, 方强, 靳鑫玉

(西安邮电学院 通信工程系, 陕西 西安 710061)

摘要: 提出了在波分复用光纤通信系统中, 考虑光纤色散“走离”时受激喇曼散射(SRS)信道的新模型, 给出了计算中距离步长的选取公式。根据该模型, 数值计算了各信道在随机数字序列调制下和在受激喇曼散射(SRS)非线性效应作用下经过有色散“走离”的波分复用光纤系统的传输功率。得出光纤色散会降低SRS效应引起的输出功率波动的结论, 画出了在SRS效应用下输出功率标准差随色散系数变化的曲线, 并对产生该现象的机理进行了定性分析。该模型适合于任意光纤色散、任意输入功率和任意信道数目。

关键词: 受激喇曼散射(SRS); 光纤色散; 波分复用(WDM)

中图分类号: O437-34; TN25

文献标志码: A

Channel characteristics of stimulated Raman scattering with dispersion effect in optical fiber communication system

LIU Yu, FANG Qiang, JIN Xin-yu

(Department of Telecommunication Engineering, Xi'an University of Posts
and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: A new model that accounts for the effects of dispersion on stimulated Raman scattering cross-talk in wavelength division multiplexed systems with random initial binary data is proposed. The formula for calculating the middle distance step is given. According to the model, the output power from each communication channel, which passes through the wavelength division multiplexed fiber system that has dispersion “walk-off” under the random digital sequence modulation and the function of non-linear effects, was numerically calculated. The conclusion that fiber dispersion may reduce the output power fluctuation caused by SRS effect was obtained. The results show that the deviation of output power is significantly reduced in the presence of dispersion. The change of the standard deviation of system output power with the dispersion coefficient under the SRS effect is plotted. The mechanism causing the phenomenon was quantitatively analyzed. The model works with any fiber dispersion, input power and number of channels.

Key words: stimulated Raman scattering; fiber dispersion; wavelength-division multiplex

引言

在波分复用的光纤通信系统中,存在着诸如受激喇曼散射(SRS)、受激布力渊散射、互相位调制、四波混频等非线性失真,其中由受激喇曼散射(SRS)引起的非线性效应,随着波分复用信道数的增加,输入信道光功率增大,一旦超过了功率门限值,将在各信道间产生不容忽视的功率转移串扰^[1-8]。

喇曼散射是介质中分子振动对入射光的调制,即在入射光的作用下,介质分子中粒子间的相对运动导致的分子感应电偶极矩随时间的周期性调制,从而对入射光产生散射的作用。在光纤通信中,当用强激光输入到光纤中时,会产生较强的受激喇曼散射光,它表现出相干性、阈值性、良好的方向性、光谱单色性高、响应时间短等受激的性质。

入射光(被称为泵浦光)的能量要向更长波长的频率(被称为斯托克斯光)上转移。Stolen 测得了石英光纤中的喇曼增益系数随光频率偏移的变化曲线^[1](如图 1 实线所示), A. R. Chraplyvy 等人对该曲线作了合理的近似^[2](如图 1 三角形所示)。

至今为止,已有不少文章从不同侧面,采用不同分析方法研究了 SRS 效应对波分复用的光纤通信系统性能的影响。但以往的研究,由于计算复杂度的问题,不是忽略光纤的色散效应^[3-5],采用小功率,忽略部分信道的 SRS 效应,且计算公式复杂^[6-7],就是传输距离受限制^[8]。这些显然都是不符合实际的。本文在讨论不存在色散效应的基础上,

提出了一种新的、简便的、物理意义明确的、考虑光

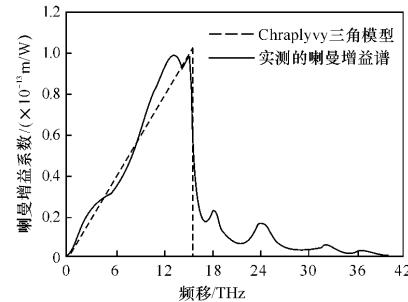


图 1 泵浦波长 $\lambda_p = 1.0 \mu\text{m}$ 时熔石英的喇曼增益谱

Fig. 1 Raman gain profile for fused silica at a pumping wavelength of 1.0 μm

纤色散的 SRS 信道计算模型,研究了存在色散效应引起的“走离”现象的情况下,受激喇曼散射的非线性问题。该模型适合于任意多的信道数目,任何大小和波形的输入功率,各种色散参数,这是之前的模型达不到的。依据该模型本文进行了计算,获得了大量数据,从中得到光纤色散有利于减小由于 SRS 效应引起的误码的结论,给出了在 SRS 效应作用下输出功率标准差随色散系数变化的曲线,并对产生该现象的机理进行了定性分析。

1 数学模型

在光纤通信系统中,许多人对喇曼散射的非线性干扰问题进行了大量研究,给出了只存在衰减和 SRS 效应光纤信道的数学模型,如下式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{u_i} \frac{\partial P_i(z, t)}{\partial t} &= \alpha P_i(z, t) + \sum_{j=1}^N r_{ij} P_j(z, t) P_j(z, t) \quad i, j = 1, 2, \dots, N \\ P_i(z, t) |_{z=0} &= P_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: N 是信道数; $P_i(z, t)$ 是第 i 信道在 z 距离和 t 时刻的输出光功率; $P_i(t)$ 是第 i 信道的输入功率,它是被随机二进制数字信号进行了强度调制的光功率信号; u_i 是第 i 信道的传输速率,正是由于各信道的传输速率不同,会产生光纤的色散“走离”现象; α 是信道的线性衰减系数; r_{ij} 是第 j 信道对

i 信道产生的喇曼增益,它与信道的波长、光的偏振系数、光纤的有效截面积和喇曼增益系数有关。

方程(1)无法求出解析解,为使问题简化,我们先假设各信道不存在色散,即传输的速度一样,均为 v 。文献[4]和[5]对此情况下的方程(1)进行了详细推导和分析,得到了如下解析解:

$$\left. \begin{aligned} p_i(z, t) &= p_i(t - z/v) \cdot e^{-\alpha z} \frac{p_{\Sigma}(t - z/v)}{\sum_{j=1}^N \frac{\bar{v}}{v_j} \cdot p_j(t - z/v) \cdot e^{G_{ij}}} \quad i = 1, 2, \dots, N \\ p_{\Sigma}(t - z/v) &= \sum_{j=1}^N p_j(t - z/v) \cdot \frac{\bar{v}}{v_j} \\ G_{ij} &= \gamma_{ij} \cdot p_{\Sigma}(t - z/v) \cdot Le = -\frac{k}{\lambda M A e} (\bar{v}_j - \bar{v}_i) \cdot p_{\Sigma}(t - z/v) \cdot Le \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\bar{\lambda}$, M 和 A_e 分别是信道的平均波长、光偏振系数和光纤的有效截面积; v_i , \bar{v}_i , \tilde{v}_i 分别是第 i 信道的频率、各信道的中心频率和第 i 信道的波数; k 是图1所示喇曼增益系数曲线的三角形近似中斜直线的斜率, 量纲为 $\text{m} \cdot \text{cm}/\text{W}$; L_e 是有效作用距离, $L_e = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha}$ 。

但是, 这种光纤传输中不存在色散的假设是不符合实际情况的。为此, 一些文章讨论了各信道入射小功率时存在色散的情况, 即忽略泵浦光的喇曼增益项, 从而求出斯托克斯光功率的解析解^[6]。这在信息传输容量急剧膨胀, 复用信道数目迅速增加, 入射光纤的总功率不断增大的今天, 只考虑小功率显然是不够的。为此我们提出了 SRS 信道考虑光纤色散的一种简便的、物理意义清楚的计算模型。

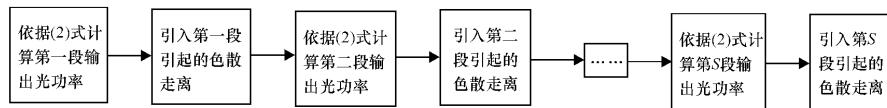


图 2 存在色散“走离”现象的 SRS 信道计算模型

Fig. 2 Calculation model for SRS channel with fiber dispersion “walk-off”

显然, 当光纤段落分的越小, 则计算结果越接近实际, 只要段落分的足够小, 计算结果的精确度就足够高。

3 光纤段落长度的选取

将总长度为 L 的光纤分成 S 小段, 每小段的长度为 $m = L/S$ 。一般来说, 对于色散系数 D 较大的光纤, m 可以取短一些, 对于色散系数较小的光纤, m 可以取长一些。对于 $N \times R_b$ (bps)的 WDM 系统, 取色散系数为 D , 信道波长间隔为 $\Delta\lambda$, 因此相隔最远的 2 个信道间, 每千米的“走离”为 $D \cdot (N-1)\Delta\lambda$, 光脉冲的间隔为 $1/R_b$ 。为了保证计算精度, 可限制第 1 和第 N 信道中的信号光产生的“走离”是信号光脉冲宽度的 $k\%$ 。由此, 我们可以得到光纤段落长度 m 为

$$m = \frac{k\%}{D(N-1)\Delta\tau R_b} \quad (3)$$

图 3 显示了两信道。第一信道波长为 $\lambda_1 = 1548.51 \text{ nm}$, 信道间的频率间隔为 1000 GHz , 传输距离为 80 km , 线性衰减系数为 0.2 dB , 纤芯的有效截面积为 $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 偏振系数 $M=2$, 输入二

2 建立存在光纤色散引起的“走离”现象的 SRS 信道计算模型

在长距离传输时, 由于光纤色散造成的信道间“走离”现象十分明显, 但在短距离传输时, 色散造成的“走离”并不明显。因此, 我们可以把传输光纤分成若干小段, 在每一小段上, 各信道中的信号光可近似看成无色散传输。每一小段光纤的输入信号光是前一小段光纤的输出信号光, 而其输出信号光在进入下一段光纤之前, 先进行“走离”排列, “走离”的大小由这一小段光纤的长度、光纤的色散系数以及信道间隔确定。这样, 不论传输光纤有多长, 我们都可以利用(2)式的无光纤色散的解析解, 加上每段色散“走离”, 得出方程(1)的存在色散的近似解。

存在色散“走离”现象的 SRS 信道计算模型如图 2 所示。

进制随机序列的传信率为 2.5 Gbps , 色散系数为 $17 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$, 光纤中的喇曼增益系数随光频率偏移的变化曲线取图 1 的三角形近似, 即采用 A. R. Chraplyvy 模型。因此, 斜线斜率取 $2.35 \times 10^{-16} \text{ m} \cdot \text{cm}/\text{W}$, 每小段计算距离分别采用 0.5 km , 1 km , 2 km , 5 km , 8 km , 10 km 时, 经过 80 km 传输后输出功率标准差随距离步长变化的曲线如图 3 所示。由图可见, 随着步长的减小, 输出功率的偏

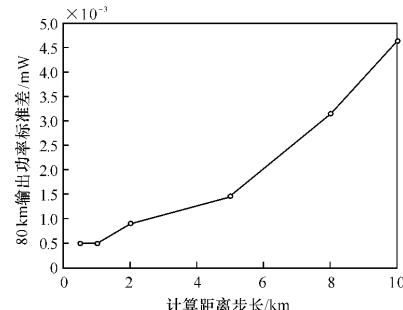


图 3 输出功率的标准差随不同距离步长的变化曲线

Fig. 3 Variation of standard deviation of output power with different step length

差也在减小。在此情况下,采用1 km 作为计算步长时,输出功率的标准差为 5×10^{-4} 。

4 具有光纤色散和SRS效应的信道特性

4.1 SRS效应对光功率的影响

基于图2的计算模型,我们计算了两信道光信号的传输。图4给出了采用平均功率为50 mW(峰值功率为100 mW)的随机二进制矩形脉冲输入序列,距离计算步长为1 km,其他数据同图3的光功

率输出波形。图4(a)和(b)分别是SRS效应、无色散“走离”的短波长和长波长信道输出波形,图4(c)和(d)分别是SRS效应、有色散“走离”的短波长和长波长信道输出波形,图4(e)和(f)分别是无SRS效应、有色散“走离”的短波长和长波长信道输出波形。显然,不考虑SRS效应时,各信道只存在线性衰减和“走离”;存在SRS效应时,各信道在线性衰减和“走离”的同时,还出现了明显的从短波长信道向长波长信道的功率转移,即SRS效应,其转移量为

$$\Delta p_i(z, t) = p_i(t - z/u) \cdot e^{-az} - p_i(t - z/u) \cdot e^{-az} \frac{p_{\sum}(t - z/u)}{\sum_{j=1}^N \frac{v}{v_j} \cdot p_j(t - z/u) \cdot e^{G_{ij}}} \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

式中第一项是无SRS效应时的输出功率,第二项是有SRS效应时的输出功率。

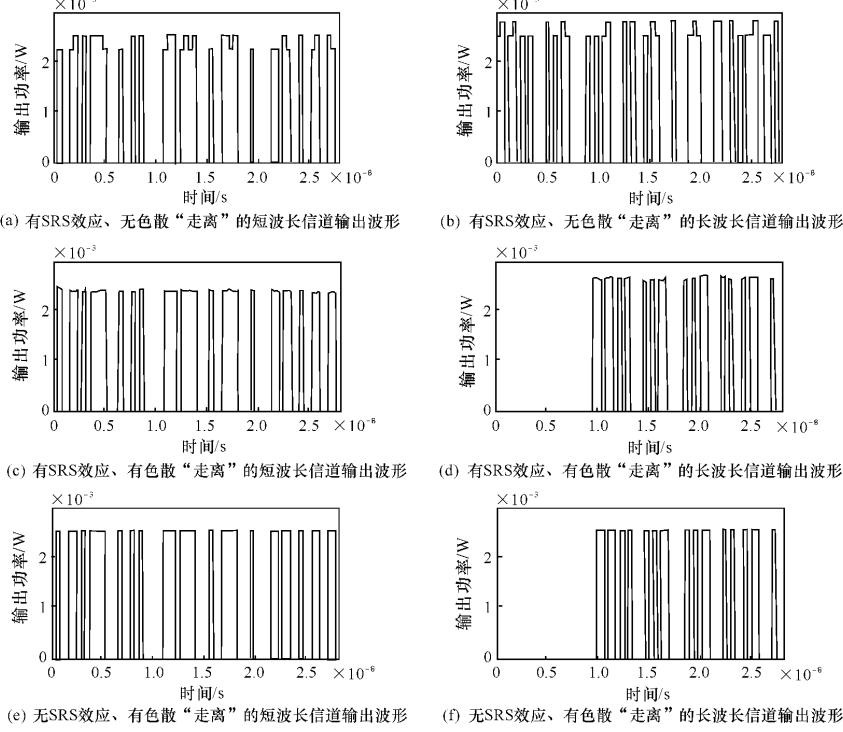


图4 依图2信道模型得到的两信道随机数字矩形脉冲80 km处输出功率(W)随时间(s)变化波形

Fig. 4 Variation of waveforms of output power in 2-channel system at 80 km with time

4.2 光纤色散“走离”对SRS效应的影响

比较图4中(a),(b)和(c),(d)显示的光功率

波形,还可以看到一个明显的现象:由于光纤色散“走离”的存在,使SRS效应产生的输出功率的波

动偏差减小了。这对于接收端数字信号的最终判决是非常有益的, 它会减小误码的产生, 从而提高系统的性能。

依据(2)式和图2所示的计算模型, 可以求出每小段输出功率的均值 $E[p_i(z, t)]$ 和标准差 σ :

$$E[p_i(z, t)] = E[p_i(t - z/u)] \cdot$$

$$e^{-\alpha z} \frac{p_{\sum}(t - z/u)}{\sum_{j=1}^N \frac{v_j}{v_i} \cdot p_j(t - z/u) \cdot e^{G_{ij}}} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{E[p_i(z, t) - E[p_i(z, t)]]^2} \quad (6)$$

图5给出输入平均功率为50 mW的二进制随机序列, 色散系数 D 分别取0 ps/km·nm, 4 ps/km·nm, 6 ps/km·nm, 10 ps/km·nm, 17 ps/km·nm, 20 ps/km·nm, 30 ps/km·nm时, 经过80 km传输, 光功率的标准差随距离变化的曲线。由图可以看出, 小于15 km时, 光功率的标准差随着传输距离迅速增大, 达到最大值后, 随距离增加逐渐减小, 而且色散系数 D 越大, 光功率的标准差越小。这是因为, 在短的传输距离上, 光功率的线性衰减还不够大, 这时产生的SRS功率转移大, 光功率的偏移波动就大; 随着传输距离的增大, 光纤的线性衰减使光功率指数下降, 此时产生的SRS功率转移也相应减小, 从而使光功率的偏移波动也随之减小。

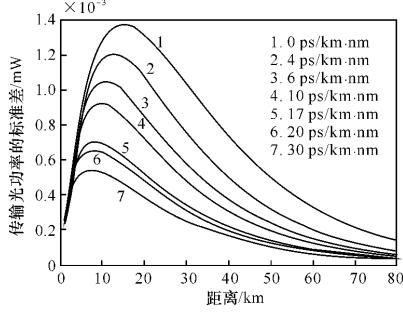


图5 传输光功率的标准差随传输距离变化的曲线

Fig. 5 Variation of standard deviation of luminous power with transmitted distance

图6给出了不同色散系数在80 km处输出光功率的标准差曲线。从图上可以清楚地看到, 随着色散系数的增大, 即“走离”的增大, SRS效应引起的输出功率的波动偏差降低, 且在色散系数小时, 功率的偏差下降较快, 大色散系数时偏差下降较慢。

下面用两信道的情况对该现象的产生进行定性分析。

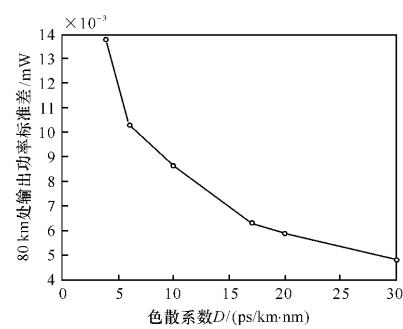


图6 80 km处输出功率标准差随色散系数变化曲线

Fig. 6 Variation of standard deviation of output power at 80 km with dispersion coefficients

光纤无色散“走离”时, 两信道在同一码元上对应的码型自始至终保持不变。依据(1)式, 只有在两信道对应码元同时为“1”码, 才会产生SRS效应的功率转移。在此情况下, 光功率传输不仅会产生传输衰减, 还会产生由于SRS效应引起的功率转移, 引起光功率的波动, 这个转移存在于传输的始终。所以在输出时光功率产生较大的波动。

光纤有色散“走离”时, 两信道在传输的过程中由于速度不同, 就会逐步错开, 即“走离”, 一个信道的“1”码只有遇到另一个信道的“1”码时, 才会产生SRS效应的功率转移, 遇到“0”码时则不会, 而在错开的过程中, 遇到“1”码还是“0”码是随机的, 这就不同于无色散的情况。色散越大, “走离”越大, 遇到“新码元”的机会越多, “1”码遇到“0”码的机会也越多, 即不进行功率转移的“休息的”机会就越多, 因此波动就越小。色散大到一定程度, “走离”遇到“1”码和“0”码的机会趋于稳定, 因此转移也趋于稳定, 波动也就趋于稳定。

5 结论

本文讨论了在WDM系统中, 光纤色散对SRS信道的影响, 提出了存在光纤色散“走离”时, SRS信道的新的、简便且物理意义明确的计算模型, 给出了距离步长的计算公式。依据模型进行了数值计算, 得到了在随机数字信号调制的情况下, 光纤色散可以降低SRS效应引起的输出功率波动的结论, 并进行了定性分析。该模型适合于任意光纤色散、任意输入功率和任意信道数目。

由于输出功率的波动会产生误码, 因此, 减小波动对于减小误码非常有益。由此可见, 光纤色散会减小由于SRS效应产生的输出功率的波动, 从

而降低误码率。为减小SRS效应产生的输出功率波动,可以适当引入光纤色散,从而达到减小由于SRS效应产生误码的目的。

参考文献:

- [1] STOLEN R H, LPPEN E P. Raman gain in glass optical waveguides [J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(6): 273-275.
- [2] CHRAPLYVY A R. Optical power limits in multi-channel wavelength-division multiplexed systems due to stimulated Raman scattering [J]. Electronics Letters, 1984, 20(2): 58-59.
- [3] TARIQ S, PALAIS J C. A computer model of non-dispersion-limited stimulated Raman scattering in optical fiber multiple-channel communications [J]. Lightwave Technology, 1993, 11(12): 1914-1924.
- [4] 巩稼民, 方强, 刘娟, 等. N 信道高密度波分复石英光纤传输系统中受激喇曼散射产生的串话 [J]. 应用光学, 1999, 20(6): 14-18.
GONG Jia-min, FANG Qiang, LIU Juan, et al. Raman crosstalk in silica fiber N-channel HD-WDM transmission system [J]. Journal of Applied Optics, 1999, 20(6): 14-18. (in Chinese)
- [5] 巩稼民, 方强, 刘娟, 等. 密集波分复用石英光纤通信系统中受激Raman 散射的稳态分析模型 [J]. 物理学报, 2000, 49(7): 1287-1291.
GONG Jia-min, FANG Qiang, LIU Juan, et al. The analytical model of SRS in single-mode silica fiber in density wavelength division multiplexed optical communication system [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(7): 1287-1291. (in Chinese)
- [6] WANG Jin-song, SUN Xiao-han. Effect of group velocity dispersion on stimulated Raman crosstalk in multichannel transmission system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(4): 540-542.
- [7] ZHOU Xiang, BIRK M. Performance limitation due to statistical Raman crosstalk in a WDM system with multiple-wavelength bidirectionally pumped Raman amplification [J]. Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2194-2202.
- [8] VILLARROEL J, GRANDPIERRE A G. On statistical effects on stimulated Raman crosstalk [J]. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2005(38): 2601-2612.

白俄罗斯LEMT公司展出新型激光测距机模块

在 2007 年第二季度举办 MILEX-2007 展会上,白俄罗斯LEMT 公司展示了它的 Lotos 激光测距机模块。该固体激光装置工作波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 主要用于下一代防空导弹系统。

Lotos 共有 2 个型号,其功率分别为 40 mJ 和 70 mJ。后者工作寿命稍短一些。在气象能见度为 20 km 的条件下,对反射率为 20% 的 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 大小的目标,2 种型号的最大测量距离分别为 10 km 和 15 km,测量精度为 $\pm 2.5 \text{ m}$ 。最小测量距离为 200 m。Lotos 激光光束的色散角为 $1.0 \sim 1.7 \text{ mrad}$,脉冲重复频率为 $1 \sim 5 \text{ Hz}$ 。

Lotos 的尺寸为 $110 \text{ mm} \times 165 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$,质量约 5 kg,采用 24 V 直流电供电,工作温度为 $-30^\circ\text{C} \sim +55^\circ\text{C}$,不需要液体冷却。

(昌 强)