

文章编号: 0258-7025(2004)02-0195-04

# 拉曼放大器的交迭因子模型及其性能特性仿真

林洪榕, 于娟, 沈晓强

(南京邮电学院通信工程系, 江苏南京 210003)

**摘要** 通过引入交迭因子的概念, 提出了光纤拉曼放大器(FRA)仿真的改进模型。采用此模型进行仿真, 可以在保证精度的基础上, 显著缩短仿真时间。在此模型的基础上, 仿真了色散和非线性效应对超高斯脉冲抽运拉曼放大器性能的影响。结果表明, 色散对其影响较大, 而非线性系数对其影响相对较小。

**关键词** 光电子学; 拉曼放大器; 交迭因子; 色散; 非线性; 超高斯脉冲

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## Model of Overlapping Factors of Raman Amplifiers and Simulation of Performance Characteristics

LIN Hong-rong, YU Juan, SHEN Xiao-qiang

(Dept. of Commun. Eng., Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract** With the introduction of overlapping factor, a new simulation model for fiber Raman amplifiers (FRA) is proposed. Using this new model in FRA simulation leads to obvious reduction of interaction time with satisfactory accuracy. The effect of dispersion and nonlinearity on super Gaussian pulse pumped Raman amplifiers has been studied by solving the new model. The simulating results show that dispersion has great impact on the performance of fiber Raman amplifiers, while nonlinearity make little influence on it.

**Key words** optoelectronics; fiber Raman amplifiers; overlapping factor; dispersion; nonlinearity; super Gaussian pulse

## 1 引言

随着社会的信息化和 Internet 网用户的急剧增加, 人们对信息传输带宽的需求迅速膨胀, 密集波分复用(DWDM)技术作为光传输系统扩容和升级的重要方式得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前 DWDM 系统中大多采用掺铒光纤放大器(EDFA)作为在线放大器来补偿光纤损耗导致的能量损失<sup>[2]</sup>。但是 EDFA 的 1530 ~ 1570 nm 的可用带宽只覆盖了石英单模光纤低损耗窗口的一部分, 限制了 DWDM 系统中能够容纳的波长信道数量。而与 EDFA 相比, 光纤拉曼放大器(FRA)具有很宽的增益谱, 并且增益带宽的波长覆盖范围可以方便地通过多波长抽运以及调节抽运波长来拓宽和改变。近年来, 拉曼放大器以其

独特的优点, 引起人们的普遍关注<sup>[3,4]</sup>。

为了便于分析, 传统的仿真方法是基于拉曼放大的数学简化模型, 但是随着传输速率的不断提高, 有些因素的作用是不能忽略的。本文从未作简化的拉曼放大器非线性偏微分耦合方程组出发, 对拉曼放大器的性能进行了研究, 并在此基础上引入交迭因子的概念, 提出了仿真的新模型。采用此模型进行仿真, 可以在保证精度的基础上, 显著缩短仿真时间。

## 2 理论模型

传统的仿真方法采用的拉曼放大器的简化模型<sup>[5,6]</sup>如(1)(2)式

收稿日期 2002-08-09; 收到修改稿日期 2002-10-11

作者简介 林洪榕(1943—), 男, 福建福州人, 南京邮电学院通信工程系教授, 目前主要从事高速光纤通信系统及光电子器件和技术等方向的教学和科研工作。E-mail: linhr@njupt.edu.cn

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\nu_p}{\nu_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p \quad (2)$$

式中  $I_p$  和  $I_s$  分别为抽运光和信号光的光强,  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别代表光纤在抽运光和信号光频率处 ( $\nu_p, \nu_s$ ) 的损耗系数,  $g_R$  为拉曼增益系数。仿真的具体方法可以采用分步迭代的方法, 或者在假设  $\alpha_p = \alpha_s$  的前提下给出解析解。但是此方程组仅适合于抽运波是连续波的情况, 没有考虑走离现象, 也忽略了群速度色散 (GVD), 自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 等非线性效应。这种简化模型在低速传输系统中是可行的, 但是对于高速光纤通信系统, 色散和非线性效应的影响是不可忽略的, 所以利用简化耦合方程组仿真, 结果会产生一定的偏差。在研究高速光纤通信系统中的拉曼放大器的性能时, 利用未作简化的非线性偏微分耦合方程组进行分析, 可以综合考虑色散和非线性效应的影响。

从非线性薛定谔方程出发, 用复数  $\chi^3$  的虚部代表拉曼增益, 可以得出拉曼放大器中拉曼脉冲和抽运脉冲间的相互作用的非线性偏微分耦合方程组<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p - \frac{g_p}{2} |A_s|^2 A_p \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2) A_s + \frac{g_s}{2} |A_p|^2 A_s \quad (4)$$

式中  $A_j$  为脉冲的振幅,  $v_{gj}$  为光波群速度,  $\beta_{2j}$  为光纤的群速度色散参量,  $\gamma_j$  为光纤非线性系数, 其中  $j = p$  或  $s$ ,  $p$  代表抽运光,  $s$  代表信号光。信号光和抽运光的增益系数  $g_s$  和  $g_p$  与拉曼增益系数  $g_R$  的峰值相联系,  $g_s = g_R/A_{\text{eff}} = (\nu_p/\nu_s)g_s$ , 其中  $A_{\text{eff}}$  为纤芯有效面积。(3)(4)式中等号左边的第二项代表脉冲的走离, 左边第三项代表 GVD, 右边第一项代表 SPM 和 XPM 等非线性效应。

为了便于分析, 将时间轴选取在抽运脉冲上, 作变换  $T = t - z/v_{gp}$ , 则方程 (3)(4) 变为

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial T^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p - \frac{g_p}{2} |A_s|^2 A_p \quad (5)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \left(\frac{1}{v_{gs}} - \frac{1}{v_{gp}}\right) \frac{\partial A_s}{\partial T} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial T^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s =$$

$$i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2) A_s + \frac{g_s}{2} |A_p|^2 A_s \quad (6)$$

求解此方程组可以得到拉曼放大器中信号光脉冲和抽运光脉冲在光纤中的传输演变情况, 并且此方程中抽运光脉冲可以采用任意形式的脉冲。由于受激拉曼散射要求有较高的抽运功率, 所以对于连续波脉冲, 如果维持较高的功率, 对激光器的要求较高, 而如果采用脉宽较短的抽运脉冲, 虽然可以降低抽运脉冲的平均功率, 但是由于脉冲的走离效应, 两脉冲的走离长度太短, 不适合用于拉曼放大器中, 因此选用脉宽较宽的超高斯型抽运脉冲。

### 3 仿真中的问题及仿真模型的改进

采用分步傅里叶法求解 (5)(6) 两式, 对 40 Gbit/s 速率光纤传输系统拉曼放大进行了仿真。在仿真中发现, 由于抽运脉冲和信号脉冲的群速度不同, 两脉冲的走离现象十分严重, 如图 1 所示。图 1(a) 是在仿真 2 km 长的光纤中信号脉冲的走离情况, 实线是初始脉冲, 8 条虚线是每仿真一段步长所得到的信号脉冲 (由于时间轴取得较长, 脉冲呈一条直线), 从图 1(a) 中可以看出, 每进行一步傅里叶变换, 信号脉冲就走离了  $40T$  (即 1 ns)。而从图 1(b) 中可以发现, 当增加光纤的长度继续仿真时, 信号脉冲会继续走离。当信号脉冲的走离超过了时间轴, 如果不延长时间轴, 脉冲将会发生反射现象。为了避免这种现象的发生, 只能加长时间轴。如果仿真 50 km 的拉曼放大器, 就需要将时间轴取到  $8000T$ , 因此随着仿真距离的增加, 仿真的时间将会成倍地增加。

为了减少计算时间, 对 (3)(4) 两式进行了改进, 分别以抽运光的群速度  $v_{gp}$  和信号光的群速度  $v_{gs}$  作为参考系, 作变换  $T_p = t - z/v_{gp}$ ,  $T_s = t - z/v_{gs}$ 。由于信号光和抽运光有相互作用项, 因此引入交迭因子  $\eta$  的概念。由于拉曼放大器中抽运脉冲的脉宽远大于信号脉冲的脉宽, 所以方程可以写为

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial T_p^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p - \frac{g_p}{2} |A_s|^2 A_p \quad (7)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial T_s^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|\eta \cdot A_p|^2) A_s + \frac{g_s}{2} |\eta \cdot A_p|^2 A_s \quad (8)$$

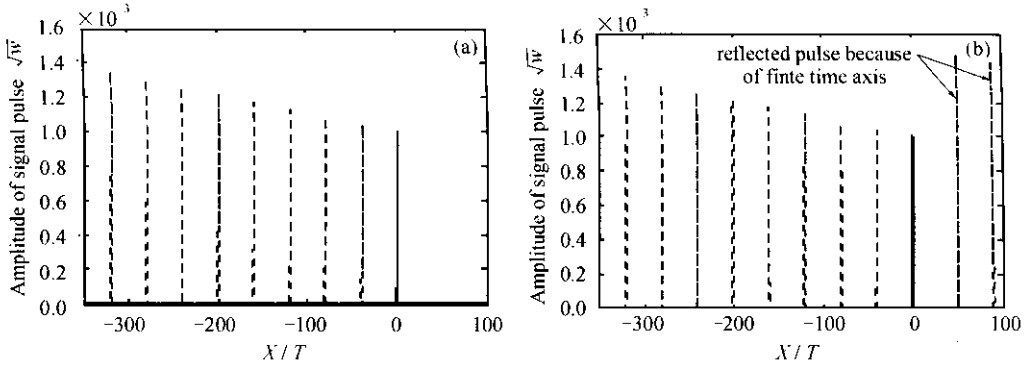


图1 仿真中信号脉冲的走离情况以及脉冲的反射  
 (a) 信号脉冲在 2 km 光纤中的走离情况 (b) 信号脉冲在 2.5 km 光纤中的走离情况  
 Fig. 1 Depart of signal pulse and reflection of pulse in simulation  
 (a) depart of signal pulse in 2 km fiber ;(b) depart of signal pulse in 2.5 km fiber

其中  $\eta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} A_p(z, t) \cdot A_s(z, t + \tau) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} A_p(z, t) \cdot A_s(z, t) dt}$   $\tau$  为两个脉冲

在时间轴上的走离。在分步傅里叶变换中  $\tau = h \cdot (\frac{1}{v_{gp}} - \frac{1}{v_{gs}})$   $h$  为分步傅里叶变换的步长。因为拉曼放大器中采用的抽运脉冲的脉宽相对于信号脉冲的脉宽大得多,所以交迭因子可以写为

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} A_p(z, t - \tau) \cdot A_s(z, t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} A_p(z, t) \cdot A_s(z, t) dt} \cong \frac{A_p(z, -\tau)}{A_p(z, 0)}$$

比较(7)(8)两式和(5)(6)两式可以看出,(6)式中代表走离的项没有了,而是用交迭因子代替了两个脉冲之间的走离所产生的影响。

#### 4 比较改进模型与原模型的仿真结果

下面,对引入交迭因子后的(7)(8)两式进行仿真,并与(5)(6)两式的仿真结果进行了比较,取总传输距离为 30 km,步长为 250 m。仿真中信号脉冲和抽运脉冲均采用超高斯脉冲,其表示形式为

$$U = P_0 \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \quad (9)$$

式中  $P_0$  为脉冲峰值功率,  $C$  为脉冲啁啾系数,  $t_0$  为脉冲在光强度  $e^{-1}$  处的半宽值,  $m$  为超高斯脉冲的阶数,在仿真中信号脉冲取  $m = 1.436$ ,  $C = 0$ , 抽运脉冲取  $m = 1.436$ ,  $C = 0$ ,  $t_0 = 50$  ns。为了便于比较,取色散参量  $\beta_{2s} = \beta_{2b} = 0$ , 仿真中的其他参量如表 1 所示(如不特别说明,下文中的仿真参量同表 1)。

仿真的结果如图 2 所示,图中的曲线是 30 km 内信号脉冲的幅值随传输距离的变化情况,实线是(5)(6)两式的仿真结果。仿真的时间区间取

表 1 仿真参量表

Table 1 List of simulation parameters

Fiber parameter	Pump	Signal
Initial peak power	300 mW	1 $\mu$ W
Work wavelength /nm	1450	1550
Attenuation coefficient /dB/km	0.3	0.2
Nonlinear coefficient /1/km · W	1.57	1.47
Fiber effective core area / $\mu\text{m}^2$	80	
Bit rate /Bit/s	40 G	

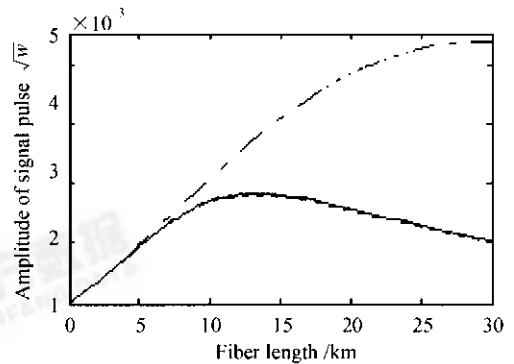


图2 改进模型与原模型仿真结果的比较  
 Fig. 2 Comparison of the simulation results for the new model and the old model

[ - 4800T 0 ],恰好可以保证信号脉冲不会发生反射现象;点划线也是(5)(6)两式的仿真结果,不过时间区间仅为[ - 35T 35T ];虚线则是当时间区间取 [ - 35T 35T ] 时,采用带交迭因子的方程(7),(8)两式的仿真结果。从图中可以看出,采用(5),(6)两式进行仿真时,必须将时间区间取得足够宽,以保证在整个仿真距离内信号脉冲的走离不会超出范围,否则信号脉冲就会发生反射,产生较大的误差。因此采用(5)(6)式进行仿真时,耗费的时间

就会非常长,从本例仿真来看,采用交迭因子的仿真时间仅为(5)(6)两式仿真时间的1/59。并且采用交迭因子的仿真结果与(5)(6)式的精确仿真结果符合得较好,如果将分步傅里叶算法中的步长缩小,可以进一步提高带交迭因子的仿真模型仿真结果的精度。

## 5 超高斯脉冲抽运拉曼放大器性能的仿真

### 5.1 抽运脉冲的脉宽对拉曼放大器性能的影响

为了比较抽运脉冲的脉宽对拉曼放大器性能的影响,暂时不考虑色散和非线性效应的影响,取 $\beta_{2s} = \beta_{2p} = 0, \gamma_s = \gamma_p = 0$ ,仿真中的其他参量同上,仿真结果如图3所示,图中的实线是拉曼放大器的最大作用距离随抽运脉冲脉宽的变化曲线,可以看出由于抽运脉冲和信号脉冲的走离现象,抽运脉冲的脉宽越窄,拉曼放大器的最大作用距离就越短,图中的虚线是对简化的方程组(1)(2)仿真得到的曲线,这种传统的仿真方法没有考虑走离现象,不考虑具体的抽运波的脉冲形式,都近似为连续波进行处理。从图中可以看出,当抽运脉冲的脉宽较宽时,两种仿真方法的结果基本一致,但当脉宽不是足够宽时,就必须考虑两脉冲的走离作用,所以这种情况下,如果采用传统的仿真方法就会产生较大偏差。

### 5.2 色散对超高斯抽运脉冲拉曼放大器性能的影响

分析信号光波长处的色散参量 $\beta_{2s}$ 对拉曼放大器性能的影响时,取抽运脉冲的脉宽为150 ns,光纤非线性系数 $\gamma_p = \gamma_s = 0$ ,色散参量 $\beta_{2p} = 0$ 。图4是拉曼放大器的最大作用距离 $Z_{max}$ 随 $\beta_{2s}$ 的变化情况,从图中可以看出其变化趋势对于色散参量 $\beta_{2s}$ 是对称的,这是因为对于无初始啁啾的高斯脉冲,GVD参

量的符号并不影响色散形成的脉冲展宽量,所以 $\beta_{2s}$ 的正与负对拉曼放大器的最大作用距离没有影响。在整个传输距离上色散参量 $\beta_{2s}$ 的变化对拉曼放大器性能的影响是比较大的:当 $|\beta_{2s}| < 1$ 时,最大作用距离比色散为0时略有上升的趋势,当 $|\beta_{2s}| > 1$ 时,随着色散参量绝对值的增大,最大作用距离逐渐减小,其中当 $|\beta_{2s}| < 10$ 时,随着色散的变化 $Z_{max}$ 的变化较快,而当 $\beta_{2s} > 20$ 时 $Z_{max}$ 的变化就较平缓。

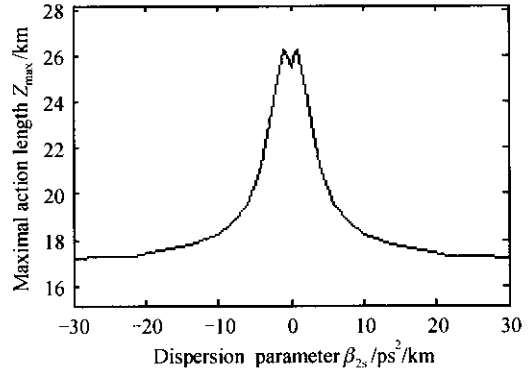


图4 色散对拉曼放大器的影响

Fig. 4 Effect of dispersion on Raman amplifiers

### 5.3 非线性系数对超高斯抽运脉冲拉曼放大器性能的影响

由于信号光脉冲的幅值较小,所以非线性系数 $\gamma$ 对信号脉冲幅值的影响较小;而抽运光的脉宽相对较宽,由于信号光的消耗而出现较窄的下凹脉冲,在非线性系数 $\gamma$ 的作用下,下凹的脉冲处出现一些抖动,但是相对于抽运脉冲的幅值而言,其抖动是十分微弱的。与色散对其性能的影响相比,非线性系数的影响要小得多。

### 参 考 文 献

- 1 K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie *et al.*. 10.92-Tb/s (273 × 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment [ C ]. OFC '2001, Anaheim, California, March 2001, paper PD24
- 2 K. Imai, T. Tsuritani, K. Tanaka *et al.*. 500 Gb/s (50 × 10 Gb/s) WDM transmission over 4000 km using broadband EDFAs and low dispersion slope fiber [ C ]. OFC '99, San Diego, February 1999, paper PD5
- 3 A. G. Okhrimchuk, G. Onishchukov, F. Lederer. Long-haul soliton transmission at 1.3 μm using distributed Raman amplification [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(6) 837 ~ 841
- 4 P. B. Hansen, L. Eskildsen, S. G. Grubb *et al.*. Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplification [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(2) 262 ~ 264
- 5 K. Mochizuki. Optical fiber transmission systems using stimulated Raman scattering: theory [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(3) 688 ~ 694
- 6 T. Nakashima, S. Seikai, M. Nakazawa. Configuration of the optical transmission line using stimulated Raman scattering for signal light amplification [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(6) 569 ~ 573
- 7 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [ M ]. New York: Academic Press, 1989

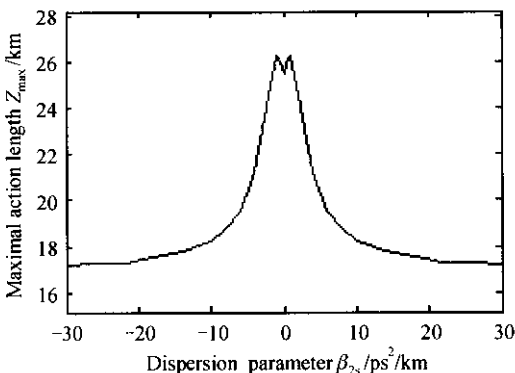


图3 最大作用距离随抽运脉冲脉宽的变化曲线

Fig. 3  $Z_{max}$  variation as a function of width

万方数据 of pump pulse