

文章编号: 0258-7025(2001)12-1113-04

# 光纤拉曼放大器中的广义损耗系数和特性模拟新算法

王四海 范崇澄

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**提要** 通过引入广义损耗系数的概念,给出了计算机模拟光纤拉曼放大器(FRA)的一种新算法。该算法不用假设抽运光和信号光衰减系数相同,且可大大增加饱和放大状态下的迭代步长。用于光纤拉曼放大器增益、噪声系数等的数值模拟时,可在保证精度的同时显著缩短迭代时间。模拟结果与已有文献的实验数据相吻合。

**关键词** 光纤拉曼放大器,受激拉曼散射,光纤非线性,数值模拟

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Generalized Attenuation Coefficient and a Novel Simulation Method of Raman Fiber Amplifiers

WANG Si-hai FAN Chong-cheng

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084)

**Abstract** With the introduction of generalized attenuation coefficient, a novel simulation method for fiber Raman amplifier (FRA) is proposed. The assumption of equal signal and pump attenuation coefficients is no longer required, while the iteration step-size can be significantly enlarged even under saturated amplification. Using this novel method in FRA simulation leads to obvious reduction of iteration time with saturated accuracy. The simulation results agree well with the experimental data.

**Key words** fiber Raman amplifier, stimulated Raman scattering, fiber nonlinearity, numerical simulation

### 1 引言

密集波分复用(DWDM)+光纤放大器技术是目前光通信系统中提高系统容量最有效的手段。与掺铒光纤放大器(EDFA)<sup>[1,2]</sup>相比,光纤拉曼放大器(FRA)的特点是:1)可在“任意”波长上得到宽带(15 THz)放大(仅受限于抽运光波长)<sup>[3]</sup>;2)在信道码率 $\geq 10$  Gbit/s的高速系统中可降低信道功率和系统成本;3)在无光中继系统中可大大延长通信距离。近年来受到广泛重视。

拉曼放大的数学模型在80年代便已出现并在近年得到很大发展<sup>[4,5]</sup>,本文在此基础上通过引入广义损耗系数的概念,提出了一种计算机模拟光纤拉曼放大器的新算法,不用假设抽运光和信号光衰减系数相同,且可有效增加数值计算时的迭代

步长,从而提高了计算速度。

### 2 广义损耗系数

与掺铒光纤放大器(EDFA)类似,光纤拉曼放大器(FRA)也有正向抽运和反向抽运之分。由于FRA不存在EDFA中上能级粒子寿命的概念,正向放大会将抽运光的抖动耦合到信号光上,增加信号光的噪声。因而在光纤通信系统中,实际应用的光纤拉曼放大器通常采用反向抽运。

假定偏振态相同的信号光和抽运光在光纤中分别沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传输,则可写出基于光功率的耦合微分方程如下(该方程通常以光子数表示<sup>[5]</sup>)

$$\frac{dP_p}{dz} = \alpha_p P_p + \sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} (P_{sj} + h\nu_{sj}\Delta\nu) \cdot P_p \quad (1)$$

$$\frac{dP_{sj}}{dz} = -\alpha_s P_{sj} + g_{sj} P_p (P_{sj} + h\nu_{sj}\Delta\nu) \quad (2)$$

式中  $P_p, P_{sj}$  和  $\alpha_p, \alpha_s$  分别为抽运光和第  $j$  模式 Stokes 光(包括信号光和自发拉曼散射噪声)的光功率和损耗系数;  $g_{sj}$  为相应的拉曼增益系数;  $h\nu_{sj}\Delta\nu$  为  $\nu_{sj}$  附近  $\Delta\nu$  带宽内与信号光/抽运光同偏振态的自发拉曼散射噪声功率。

如果不考虑 Stokes 光对抽运光的消耗[即(1)式右边第二项],则(1)(2)对应于小信号放大,可解析求解<sup>5]</sup>。但为充分利用抽运光功率及提高工作点的稳定性,实际的拉曼放大器经常处于饱和放大状态,忽略该项使计算精度无法满足要求。为保证计算精度,可采用如下的数值迭代解法:1)将光纤分为  $N$  段,并假设光功率在每一小段内不变;2)从

$$\frac{dP_{sj}}{dz} = -\alpha_s P_{sj} + g_{sj} P_p(z) \exp(\alpha_p' \Delta z) (P_{sj} + h\nu_{sj} \Delta\nu) = [-\alpha_s + g_{sj} P_p(z) \exp(\alpha_p' \Delta z)] P_{sj} + g_{sj} P_p(z) \exp(\alpha_p' \Delta z) h\nu_{sj} \Delta\nu \quad (4)$$

这样做的好处是可以求出此微分方程的解析解为

$$P_{sj}(z + \Delta z) = P_{sj}(z) \exp\left[-\alpha_s \Delta z + \frac{g_{sj} P_p(z)}{\alpha_p} (e^{\alpha_p' \Delta z} - 1)\right] + h\nu_{sj} \Delta\nu g_{sj} P_p(z) \exp\left[-\alpha_s \Delta z + \frac{g_{sj} P_p(z)}{\alpha_p} (e^{\alpha_p' \Delta z} - 1)\right] \int_0^{\Delta z} \exp(\alpha_p' z) \exp\left[\alpha_s \Delta z - \frac{g_{sj} P_p(z)}{\alpha_p} (e^{\alpha_p' \Delta z} - 1)\right] dz \quad (5)$$

式中右方第一项表示 Stokes 光沿光纤传输被放大的过程,第二项为放大的自发拉曼散射噪声(ASRS)。此公式比较精确,可以使迭代步长大大加大,但 ASRS 项比较复杂,因此每一步的迭代计算时

$$P_{sj}(z + \Delta z) = P_{sj}(z) \exp\left[-\alpha_s \Delta z + \frac{g_{sj} P_p(z)}{\alpha_p} (e^{\alpha_p' \Delta z} - 1)\right] + h\nu_{sj} \Delta\nu g_{sj} P_p(z) \exp(-\alpha_{sj}' \Delta z) (\alpha_p' + \alpha_{sj}') \quad (6)$$

式中  $\alpha_{sj}' = \alpha_s - g_{sj} P_p$ , 是 Stokes 光的广义损耗系数。

### 3 模拟新算法

经  $\Delta z$  传输后,抽运光  $P_p$  的求解过程如下:首先求出  $\alpha_{sj}' = \alpha_s - g_{sj} P_p$ , 由此得出  $P_{sj}(z + \Delta z) = P_{sj}(z) \exp(-\alpha_{sj}' \Delta z)$ , 代入(1)可得

$$\frac{dP_p}{dz} = \left[ \alpha_p + \sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} (h\nu_{sj} \Delta\nu) \right] P_p + \sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} [P_{sj}(z) \exp(-\alpha_{sj}' \Delta z)] \cdot P_p \quad (7)$$

积分得

$$P_p(z + \Delta z) = P_p(z) \exp\left\{ \left[ \alpha_p + \sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} (h\nu_{sj} \Delta\nu) \right] \Delta z + \right.$$

第一段开始将每一段的  $P_p$  和  $P_{sj}$  代入(1)和(2)求出下一段光纤内的光功率,如此迭代直至最后一段;3)反复迭代直至满足精度要求。此法虽然可行,但迭代步长必须很小,因此工作量很大。

为克服这一矛盾,我们在迭代步长  $\Delta z$  内引入广义损耗系数(并据此提出一种新算法)

$$\alpha_p' = \alpha_p + \sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} (P_{sj} + h\nu_{sj} \Delta\nu) \quad (3)$$

即将抽运光因拉曼放大的消耗也定义为损耗。在  $\Delta z$  内认为  $\alpha_p'$  不变(物理上相当于只考虑抽运光的一阶变化量)则有  $P_p(z + \Delta z) = P_p(z) \exp(\alpha_p' \Delta z)$ , 代入(2)得

间也比较长,从而使总的迭代计算时间并没有本质改善。为此,我们对(5)式作进一步简化。考虑  $\alpha_p'$  很小,在  $\Delta z$  不是很大的情况下  $\alpha_p' \Delta z \ll 1$ , 则  $e^{\alpha_p' \Delta z} \approx 1 + \alpha_p' \Delta z$  (5)式可简化为

$$\sum_j g_{sj} \frac{\nu_p}{\nu_{sj}} P_{sj}(z) \frac{1 - \exp(-\alpha_{sj}' \Delta z)}{\alpha_{sj}'} \quad (8)$$

信号光  $P_{sj}$  经过  $\Delta z$  传输后的求解公式为(6)式。

实际模拟反向拉曼放大器时,初始边界条件只有  $z = 0$  处的信号光  $P_{sj0}$  和  $z = L$  处的抽运光  $P_{pL}$ , 因此无法单向迭代完成全部求解工作,而是采用如下所述的打靶法:

1)以简单损耗估算出  $z = 0$  处抽运光功率值,加上已知的 Stokes 光功率,利用上述方法迭代求解至  $z = L$  处得到光功率值  $P_{pL}^{(1)}, P_{sjL}^{(1)}$ ;

2)以  $z = L$  处用已知的抽运光功率初值修正  $P_{pL}^{(2)} = \mu P_{pL} + (1 - \mu) P_{pL}^{(1)}$ , 其中  $\mu \in (0, 1)$  为松弛因子,根据经验取 0.6 左右并可适当调整。以  $P_{sjL}^{(1)}$  和  $P_{pL}^{(2)}$  为初值反向迭代至  $z = 0$  处得到光功率值  $P_{p0}^{(2)}, P_{sj0}^{(1)}$ ;

3) 以  $z = 0$  处已知的初值修正 Stokes 光功率, 方法同 2) 再正向迭代至  $z = L$ ;

4) 重复步骤 2) 和 3), 直至迭代所得的功率值与已知初值的误差小于要求值即可得到所求的光功率分布。

总之, 本算法中通过引入广义损耗系数的概念, 在每一步迭代中都考虑了抽运光和 Stokes 光功率因拉曼放大作用而导致的损耗或增益的一阶变化量, 并通过半解析表达式 (6) 和 (8) 求得下一步的迭代初值, 因而在保证结果精度的同时可有效增加迭代步长, 节省计算时间, 在 FRA 的设计过程中得以进行广泛的参数优化。

### 4 模拟结果及讨论

我们以模拟 20 km 色散补偿光纤 (DCF) 构成的光纤拉曼放大器为例, 对新算法和已有算法进行了比较。其中抽运光功率为 1300 mW, 波长为 1480 nm, 反向注入; 信号光共 16 路, 每信道输入功率为 -20 dBm, 最短波长为 1555 nm, 间隔 0.8 nm。模拟结果示于图 1。其中 (a) 为放大器增益与迭代步长的关系, (b) 为输出信号的光信噪比与迭代步长的关系。由图可见, 在保持相同计算误差的情况下, 新方法的迭代步长可以是已有算法的数十倍。而在计算时间方面, 新算法 (步长 1 km) 约为已有算法

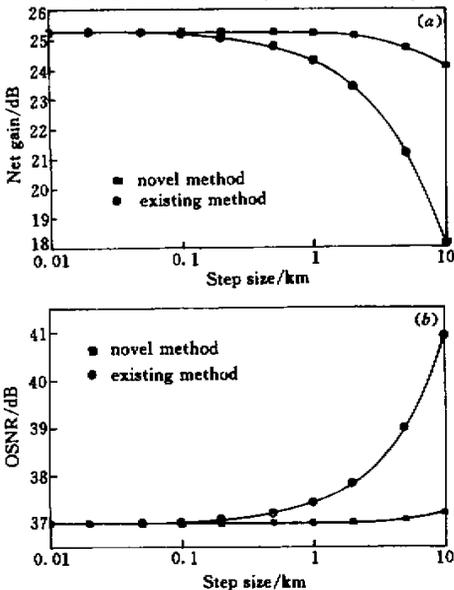


图 1 光纤拉曼放大器模拟结果比较

Fig. 1 Simulation method comparison of fiber Raman amplifier

(步长 0.02 km) 的  $1/25$  ( $\sim 2.5$  s:  $\sim 65$  s)

为了验证上述算法的准确性, 我们对已发表的光纤拉曼放大器增益及噪声系数的实验结果 [6] 进行了模拟和对比。系统配置为 [6]: 抽运光功率 24.6 dBm, 波长 1451.45 nm, 反向注入, 损耗 0.3 dB/km, 输入信号光功率 -30 dBm, 波长 1560.96 nm, 损耗 0.23 dB/km, 色散位移光纤 (DSF), 有效面积  $A_{eff} = 22.8 \mu m^2$ , 拉曼增益谱以三角形近似, 峰值增益系数  $g_{Rmax} = 2.9 \times 10^{-14}$  m/W, 长度 1~20 km。结果如图 2 所示。其中曲线为信号增益和噪声系数的模拟结果, 而分立点数据为文献 [6] 中的实验值。由图可知, 二者基本相符, 增益相差  $< 1$  dB, 其差异可能是由实验中一些难以准确测量的损耗引起的。顺便指出, 该结果比 [6] 中的计算曲线更接近实验结果。

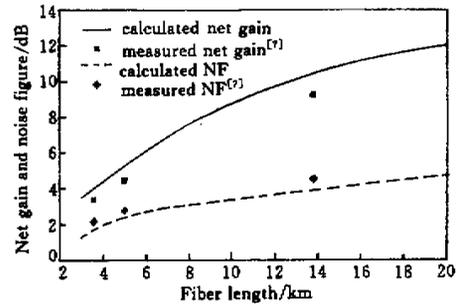


图 2 FRA 增益及噪声系数的模拟与实验结果比较

Fig. 2 FRA gain and NF: comparison between simulation results and experimental data

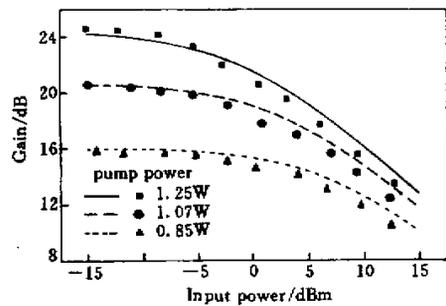


图 3 FRA 饱和放大增益的实验与模拟结果比较

(曲线为模拟结果, 分立点为实验数据)

Fig. 3 Saturation gain of FRA (curves: numerical simulation results; discrete points: experimental data)

图 3 是数值模拟结果与实验测得饱和放大增

益<sup>[7]</sup>的比较。其中曲线为数值模拟结果,分立点为文献[7]中的实测数据。系统配置为<sup>[7]</sup>:10 km 色散位移光纤(DSF),有效面积  $A_{\text{eff}} = 45 \mu\text{m}^2$ ;抽运光功率分别为 1.25 W,1.07 W 和 0.85 W,波长 1455 nm,反向注入,损耗 0.22 dB/km;输入信号光功率动态范围为 -15 dBm~15 dBm,波长 1547 nm,损耗 0.19 dB/km;拉曼增益谱以三角形近似,峰值增益系数  $g_{R_{\text{max}}} = 3.4 \times 10^{-14} \text{ m/W}^3$ (已考虑偏振因素)。由图 3 可以看出,在小信号放大情况下,模拟结果与实验数据吻合得很好;在大信号放大情况下,模拟结果大于实验数据,其原因可能是光纤中的瑞利散射噪声消耗了抽运功率<sup>[8]</sup>。

此外,本论文成果已用于 400 km 无中继 WDM + 遥抽运 EDFA + FRA 光纤通信系统的理论设计和参数优化工作中,为下一步的实际设计工作打下了良好的理论基础。

## 5 结 论

本文引入广义损耗因子的概念,并据此提出了反向抽运光纤拉曼放大器的计算机模拟新算法。在饱和放大情况下,可在保证精度的同时加长迭代步长,显著缩短迭代时间,减小计算量。模拟结果与实验结果相符合。其原理可同样用于正向抽运或其他

复杂抽运情况下光纤拉曼放大器以及 WDM 光通信系统中受激拉曼散射的计算机模拟工作。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Sun, J. W. Sulhoff, A. K. Srivastava *et al.*. A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems. European Conference on Optical Communication '98, Mon. Session 1 53~54
- 2 G. P. Agrawal. Fiber-optic Communication System (2<sup>nd</sup> Edition). New York: John Wiley & Sons Inc., 1997. 379~403
- 3 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics(2<sup>nd</sup> Edition). New York: Academic Press, 1995. 316~319
- 4 M. L. Dakss, P. Melman. Amplified spontaneous Raman scattering and gain in fiber Raman amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(4) 806~813
- 5 S. R. Chinn. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7):607~608
- 6 Y. Akasaka, I. Morita, M. C. Ho *et al.*. Characteristics of Optical Fibers for Discrete Raman Amplifiers. European Conference on Optical Communication '99 on CD: paper No. 1058
- 7 S. A. E. Lewis, S. V. Chernikov, J. R. Taylor. Gain saturation in silica-fibre Raman amplifier. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(11) 923~924
- 8 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):159~161