

# 反向抽运光纤喇曼放大器增益特性分析

邓华秋 龙青云

(华南理工大学 物理科学与技术学院, 广州 510640)

**摘 要** 将打靶法和龙格库塔法两种数值计算方法相结合,对反向抽运光纤喇曼放大器中信号光和抽运光相互作用的耦合微分方程进行数值求解.在分别选取不同参量且取不同值的条件下,详细分析了光纤长度、初始信号光功率、初始抽运光功率、光纤有效面积、喇曼增益系数及光纤对信号光与抽运光的损耗等参量对增益的影响,最后提出了有效提高增益的方法.

**关键词** 光通信技术;反向抽运光纤喇曼放大器;数值模拟;增益;受激喇曼散射

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

由于现有的掺铒光纤放大器不能完全满足 DWDM 系统不断升级的要求,近年来,基于受激喇曼散射 (SRS, stimulated Raman scattering) 原理,具有高增益、宽带宽、工作波长不受限制等优点的光纤喇曼放大器 (Fibre Raman Amplifier, FRA) 成为研究的热点<sup>[1~3]</sup>.

与同向、双向抽运方式相比,反向抽运 FRA 有较小的增益饱和且抽运光转移给信号光的相对强度噪声小<sup>[4]</sup>,因此目前 FRA 的实际设计多采用反向抽运结构.增益是 FRA 的一个重要指标.到目前为止,已有很多学者对反向抽运 FRA 的增益进行了讨论<sup>[4~6]</sup>,但对影响增益的参量进行全面分析的报道还较少<sup>[7]</sup>.本文通过将打靶法和龙格库塔法两种数值计算方法相结合,详细研究了所有参量对增益的影响,所得结论对分析反向抽运光纤喇曼放大器的其他特性和优化设计整个系统有参考作用.

## 1 理论分析

如图 1,抽运光在长为  $L$  的光纤的末端  $Z=L$  处注入,功率为  $P_p(L)$ ,信号光在光纤的始端  $Z=0$  处注入,功率为  $P_s(0)$ .

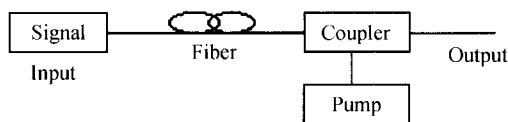


图 1 反向抽运光纤喇曼放大器的结构简图  
Fig. 1 Diagram of backward-pumped FRA

在连续波及准连续波情况下,信号光和抽运光的耦合微分方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \frac{g_R}{A_{eff}} P_p(z) P_s(z) - \alpha_s P_s(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_R}{A_{eff}} P_s(z) P_p(z) + \alpha_p P_p(z) \quad (2)$$

式中  $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$  分别是信号光和抽运光沿光纤分布的光功率; $\nu_s$ 、 $\nu_p$  分别是信号光和抽运光的频率; $g_R$  为光纤的喇曼增益系数; $A_{eff}$  为光纤有效面积; $\alpha_s$ 、 $\alpha_p$  分别为信号光频率和抽运光频率处光纤的损耗系数.在输入端信号  $P_s(0)$  不为零,故不考虑自发喇曼散射的影响.

上述方程组属于一阶微分方程组的边值问题,无法得到其解析解.采用打靶法<sup>[9]</sup>和龙格库塔法<sup>[10]</sup>相结合的求解方法,将它转化为初值问题,可以得到数值解.打靶法是逐次逼近真值的方法,当计算得到光纤末端的功率与实际抽运功率的差值满足准确度  $10^{-4}$  时,计算完成.在这之前,打靶法中的修正值由式(3)<sup>[9]</sup>给出

$$P^{(2)}(0) = 0.6 \left( \frac{P(L)}{P^{(1)}(L)} \right) P^{(1)}(0) + 0.4 P^{(1)}(0) \quad (3)$$

式中  $P^{(1)}(0)$ 、 $P^{(1)}(L)$  分别是第一次运算中的假设值和计算得到的抽运功率值; $P(L)$  为实际抽运功率值; $P^{(2)}(0)$  是得到的修正值.

同时,FRA 的开关增益表示为

$$G = 10 \lg \frac{P_s(L)}{P_s(0) \exp(-\alpha L)} \quad (4)$$

由上述分析可知增益会受到许多参量的影响,如  $L$ 、 $P_s(0)$ 、 $P_p(L)$ 、 $A_{eff}$ 、 $g_R$ 、 $\alpha_s$  及  $\alpha_p$  等.下面利用数值计算详细分析它们对增益的影响.

## 2 数值结果与讨论

为叙述简练,除了图示中的参量值变化外,其它参量分别取如下典型值<sup>[7,11]</sup>:抽运光的波长为 1450 nm,其注入光功率  $P_p(L) = 400$  mW;信号光的波长为 1550 nm,初始功率为  $P_s(0) = -25$  dBm;采用常规单模光纤,其  $L = 10$  km; $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$ ; $\alpha_p = 0.2$  dB/km, $\alpha_s = 0.2$  dB/km; $g_R = 0.690 \times 10^{-13}$  m/W.

### 2.1 光纤长度 $L$ 对增益的影响

图 2 是初始信号光功率从  $-75$  dBm 依次递增到  $10$  dBm 时光纤长度与增益的关系图. 从图中可得到如下结论: 首先, 光纤较短 (小于  $3$  km) 时,  $G$  值很小, 且不随初始信号光功率值变化. 这是因为光

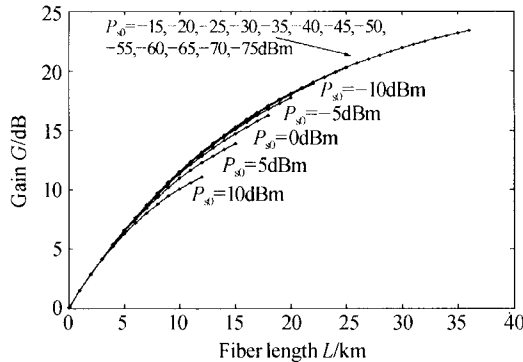


图 2 光纤长度对增益的影响  
Fig. 2 Effect of fiber length on gain

纤很短, SRS 效应微弱, 对信号光的放大作用不强; 其次, 总的趋势是光纤越长, 增益就越大, 但其增长速度是越来越慢的. 以  $-30$  dBm 为例, 相隔  $1$  km 的增益差值由开始的  $1.3$  dB 降到后来的  $0.2$  dB. 从这个变化趋势可以预测, 在一定条件下,  $L$  再增加时, 增益会趋于一定值. 这符合理论——抽运光和信号光实际作用的光纤长度为有效光纤长度, 其定义为  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ , 当  $\alpha L \gg 1$  时,  $L_{\text{eff}}$  近似为  $1/\alpha$ , 与光纤本身长度无关.

### 2.2 初始信号光功率 $P_s(0)$ 对增益的影响

图 3 是光纤长度从  $10$  m 依次增加到  $12$  km 时初始信号光功率与增益的关系图. 联系图 2 可知: 首先, 初始信号光功率在  $-75$  dBm 到  $-35$  dBm 范围时, 光纤长度从  $10$  m 增加到  $30$  km, 每一确定长度的光纤中  $G$  值的变化不超过  $0.001$  dB, 说明小信号时, 初始信号光功率对  $G$  值的影响是可以忽略的; 其次, 总的趋势为, 随着初始信号光功率增加, 增益值减小, 而且其减小的速度越来越快. 从数值上看, 从  $-75$  dBm 到  $-35$  dBm, 速度几乎为零, 从

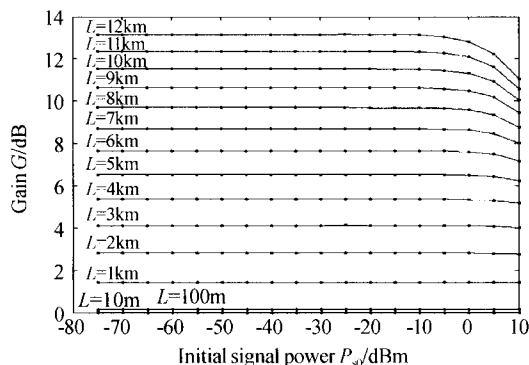


图 3 初始信号光功率对增益的影响  
Fig. 3 Effect of initial input signal on gain

$-35$  dBm 到  $0$  dBm, 减小的差值每隔  $5$  dBm 相差不到  $0.5$  dB, 而从  $0$  dBm 到  $10$  dBm, 这个差值上升至  $1$  dB 以上. 据此变化趋势, 在一定条件下, 初始信号光功率大于  $10$  dBm 时, 增益减小得非常快. 这是因为随着初始信号光功率增加, 信道中会发生除了 SRS 以外的其他非线性光学效应, 这会消耗一部分抽运光功率, 导致抽运光与信号光之间的 SRS 减弱, 增益减小; 再次, 结果也表明光纤长度越长, 初始信号光功率对增益的影响就越大.

### 2.3 初始抽运光功率 $P_p(L)$ 对增益的影响

图 4 是不同初始信号光功率条件下的初始抽运光功率与增益的关系图. 显然, 总的趋势是初始抽运光功率越大, 增益就越大, 而且增益随初始抽运光功率增加先是线性增长, 后来逐渐偏离线性规律, 出现增益饱和. 据其变化规律, 可以预测在一定的初始抽运光功率时, 增益会达到一个定值; 图中也明显表示出同样的初始抽运光功率条件下, 初始信号光功率越大, 信号增益越小, 如果要达到较好的增益平坦性, 则这些信道需要更大的初始抽运光功率. 总之, 初始信号光功率越大, 初始抽运光功率对增益的影响也就越大, 所以要根据实际需要严格地控制反向抽运 FRA 中每个信道的信号光功率和抽运光功率.

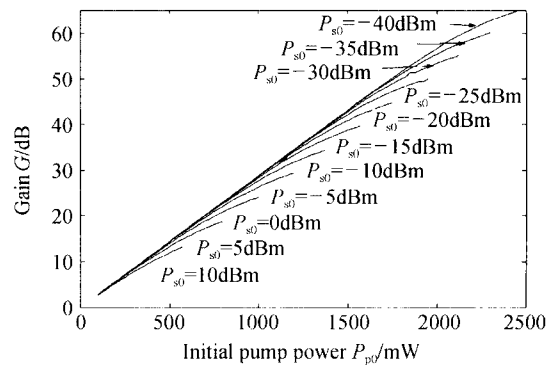


图 4 初始抽运光功率对增益的影响  
Fig. 4 Effect of initial pump on gain

### 2.4 光纤有效面积 $A_{\text{eff}}$ 对增益的影响

图 5 是不同初始抽运光功率条件下得到的光纤有效面积与增益的关系图. 常规单模光纤在  $1550$  nm 的  $A_{\text{eff}}$  通常在  $50 \mu\text{m}^2$  到  $80 \mu\text{m}^2$  之间. 从图中可看出: 首先, 在一定抽运光功率下, 增益随光纤有效面积增大而减小. 抽运光功率较小时, 减小的速度越来越慢, 抽运光功率较大时 (如  $1$  W) 增益与光纤有效面积趋近于线性关系; 其次, 抽运光功率越大, 增益值也越大. 这是因为光纤有效面积与入纤光功率密度有关, 它直接影响抽运光和信号光之间的 SRS 作用. 总之, 光纤有效面积越小, 抽运光功率越大, 光功率密度则越大, 抽运光和信号光之间的 SRS 作用将越强, 增益也就越大.

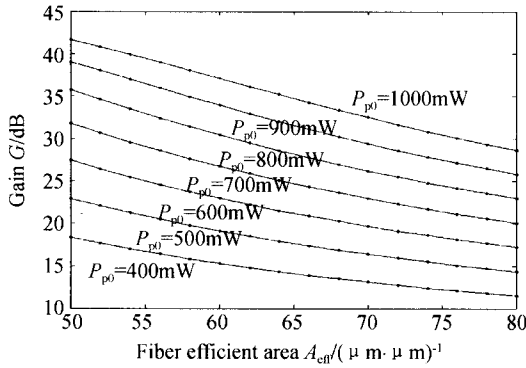


图 5 光纤有效面积对增益的影响  
Fig. 5 Effect of efficient fiber area on gain

2.5 喇曼增益系数  $g_R$  对增益的影响

喇曼增益系数是影响增益的一个重要参量. 图 6 是在前述参量取典型值时喇曼增益系数与增益的关系图. 从图中可知: 首先, 增益与喇曼增益系数值呈线性关系, 因此选择喇曼增益系数大的光纤就可以得到大的增益; 其次, 喇曼增益系数值在  $(0.6 \sim 1) \times 10^{-13} \text{ m/W}$  之间变化时, 引起的增益落差较大, 最大达到 5 dB. 按照 Stolen 等人测得的熔融石英光纤中的喇曼增益系数值<sup>[8]</sup> 有近 40 THz 的频率带宽, 这就说明单抽运的增益平坦性较差, 实际中必须要使用多抽运; 再次, 初始信号光功率越大, 同样的喇曼增益系数值时, 增益越小, 这与前面的结论一致.

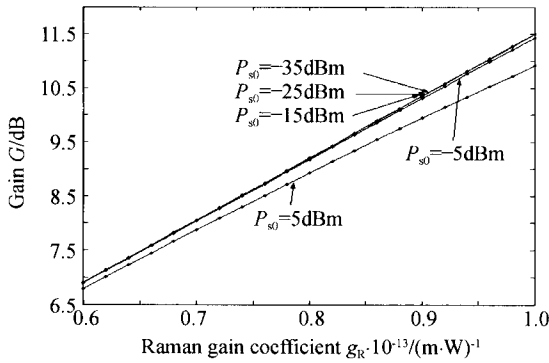


图 6 喇曼增益系数对增益的影响  
Fig. 6 Effect of Raman gain coefficient on gain

2.6 光纤损耗系数对增益的影响

2.6.1 信号光损耗系数  $\alpha_s$  对增益的影响

目前常规单模光纤在 1550 nm 处损耗最大值为  $0.4 \text{ dB/km}$ <sup>[12]</sup>. 图 7 是不同初始信号光功率条件下信号光损耗系数与增益的关系图. 从图中可以看出: 小信号时 ( $-40 \text{ dBm}$  至  $-20 \text{ dBm}$ ), 增益几乎与信号光损耗无关, 这和文献<sup>[7]</sup>一致; 信号光功率较大时 (大于  $-10 \text{ dBm}$ ), 同样初始信号光功率条件下, 信号光损耗越大, 增益就越大; 并且, 初始信号光功率越大, 信号光损耗对增益的影响就越大.

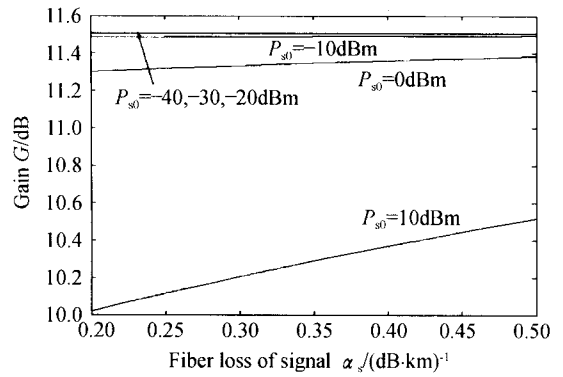


图 7 信号光损耗系数对增益的影响  
Fig. 7 Effect of fiber loss of signal on gain

2.6.2 抽运光损耗系数  $\alpha_p$  对增益的影响

图 8 是不同初始信号光功率条件下抽运光损耗系数与增益的关系图. 从图中可以看出: 随着抽运光损耗的增加, 增益减小, 两者几乎成反比的线性关系; 初始信号光功率越大, 增益越小, 它对增益的影响越大. 这也是与前面结论一致的.

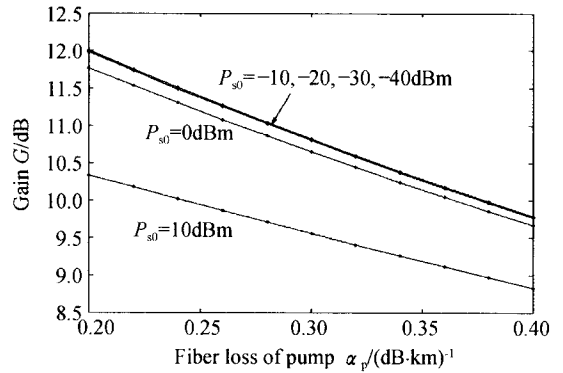


图 8 抽运光损耗对增益的影响  
Fig. 8 Effect of fiber loss of pump on gain

3 结论

1) 增益并非与信号光的损耗系数大小几乎无关<sup>[7]</sup>, 而是随损耗增大而增大. 选择光纤时除了合适的喇曼增益系数、光纤有效面积, 还要考虑对信号光和抽运光的损耗; 2) 光纤有效长度而非光纤长度才真正影响增益. 在光纤类型选定后, 应该基于抽运光损耗来选择光纤的实际长度; 3) 初始抽运光功率增加会使增益饱和, 初始信号光功率增加会使增益急剧下降, 应该根据实际情况选择 FRA 中的初始信号光功率和初始抽运光功率, 避免出现上述现象; 4) 打靶法和龙格库塔法相结合的数值计算方法能较好地解决这类边值问题, 可以将它应用于 FRA 其它特性 (如噪音) 的分析, 是优化设计 DWDM 系统中多抽运多信道 FRA 的可选算法.

## 参考文献

- 1 杜戈果, 阮双琛, 苏红新, 等. 单模石英光纤中受激喇曼散射的研究. 光子学报, 2004, **33**(8): 923~926  
Du G G, Ruan S C, Su H X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 923~926
- 2 苏红新, 阮双琛, 吕可诚. 单模石英光纤中连续波泵浦 SRS 谱的演化. 光子学报, 2003, **32**(3): 272~275  
Su H X, Ruan S C, Lü K C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 272~275
- 3 Xin X J, Yu C X, Zhang R, *et al.* The influence of configuration of Raman fiber amplifier on performance. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 140~143
- 4 Emori Y, Kado S, Namiki S. Independent control of the gain and noise figure spectra of Raman amplifiers using bi-directional pumping. *Furukawa Review*, 2003, **23**: 11~15
- 5 He J S, Guo T W, Gu W Y, *et al.* Study on optimal design broadband and flat-gain multi-wavelength pumped fiber Raman amplifiers. *J Opt Commun*, 2003, **24**(1): 2~5
- 6 Jin S Z, Zhou W, Zhang Z X, *et al.* Research of gain and bandwidth in hybrid fiber Raman amplifier. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 428~430
- 7 姜海明, 王亚非, 谢康. 反向抽运喇曼光纤放大器开关增益特性研究. 光电子技术, 2004, **24**(2): 114~117  
Jiang H M, Wang Y F, Xie K. *Optoelectronic Technology*, 2004, **24**(2): 114~117
- 8 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 1989
- 9 Wang S H, Zhang L, Fan C C. Generalized attenuation coefficient and their applications in count-pumped raman amplifiers. *Communication Technology Proceedings*, 2000. WCC-ICCT 2000, **2**(2): 1550~1553
- 10 郑威义. 计算方法. 广州: 华南理工大学出版社, 2003. 219~223  
Zheng X Y. *Computing Methods*. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2003. 219~223
- 11 邓华秋, 龙青云, 吴俊芳. 同向泵浦喇曼光纤放大器的增益特性. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, **33**(10): 44~47  
Deng H Q, Long Q Y, Wu J F. *Journal of South China University of Technology (natural science edition)*, 2005, **33**(10): 44~47
- 12 李海清, 李进延, 陈永诗. 光纤标准最新研究情况介绍. 光通信技术, 2004, **28**(9): 61~64  
Li H Q, Li J Y, Chen Y S. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(9): 61~64

## Analysis of the Gain Characteristics of Backward-Pumped Fiber Raman Amplifier

Deng Huaqiu, Long Qingyun

*School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640*

Received date: 2005-07-05

**Abstract** By combining shooting method with Runge-Kutta method for solving differential coupling equations of backward-pumped fiber Raman amplifier (FRA), the effects of fiber length, initial signal power, initial pump power, fiber efficient area, Raman gain coefficient, and fiber loss of signal and pump on gain of FRA have been detailedly investigated. Finally, several ways are suggested to improve the gain of backward-pumped FRA. Accurate and reasonable results have been gotten, and are helpful to the study of FRA.

**Keywords** Optical communication technology; Backward-pumped fiber Raman amplifier; Numeric simulation; Gain; Stimulated Raman scattering



**Deng Huaqiu** male, born in Lechang in October of 1963, gotten his BSc of Applied Physics (1981 ~ 1985), MSc of Modern Optics (1985 ~ 1988) in Dalian University of Technology respectively, and Ph. D of Communication and Electronic System in South China University of Technology (1994 ~ 1998). He has worked as Assistant Professor, Lecturer, and Associate Professor in School of Physics of South China University of Technology since 1988. His research interests are in fiber communication and R&D of embedded communication software.