

文章编号: 0258-7025(2004)10-1235-04

双向抽运拉曼光纤放大器抽运光功率分配 对开关增益的影响

姜海明, 王亚非

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 利用打靶法对单波长双向抽运拉曼光纤放大器的开关增益问题进行了数值仿真研究, 结果表明, 在小信号的情况下, 只要抽运光的总功率不变, 信号光的开关增益几乎与正反向抽运光功率的分配比例无关, 此结果和小信号情况下的解析解结论一致。当信号光功率增大到对抽运光的消耗不能忽略时, 其开关增益随着正向抽运光功率百分比的增大而略有增大。另外, 也给出了几种不同输入信号入纤光功率、不同正反向抽运光功率分配情况下的信号光、正反向抽运光和总光功率沿光纤长度的分布。

关键词 光电子学; 拉曼光纤放大器; 双向抽运; 开关增益; 打靶法; 数值仿真

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Impact of Bi-Directional Pump Power Scheme on Gain of Raman Fiber Amplifier

JIANG Hai-ming, WANG Ya-fei

(School of Opto-Electronic Information, University of
Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract On-off gain characteristics of bi-directionally pumped Raman fiber amplifier are numerically simulated through shooting method. The results show that the on-off gain is approximatively independent of forward pump power percentage under constant total pump power. The results are coincided with the analytical solution under small signal power. When the signal power increases till the pump power depletion causing by signal can not be ignored, its on-off gain slightly increases with enhancement of forward pump power percentage under constant total pump power. In addition, the distributions of the signal power, forward pump power, backward pump power and total power along fiber under various input signal power and various forward/back pump power are given through diagram.

Key words optoelectronics; Raman fiber amplifier; bi-directional pump; on-off gain; shooting method; numerical simulation

随着光纤通信的飞速发展,拉曼光纤放大器由于自身的众多优点,已成为波分复用(WDM),长距离和超长距离光纤通信系统的关键技术之一^[1,2]。传输容量为3.2 Tb/s,传输距离为2100 km^[3]和传输容量为2.5 Tb/s,传输距离为4000 km^[4]全拉曼放大的波分复用系统已有报道。拉曼光纤放大器的抽运方式一般有正向抽运、反向抽运和双向抽运等方式。早期的拉曼光纤放大器研究中,一般采用反

向抽运的方式。正向抽运时抽运光的偏振度(DOP)对信号光增益的影响很大,而反向抽运时,由于抽运光和信号光反向传输,信号光和抽运光的偏振关系完全混乱,其统计平均的效果使得反向抽运方式下,抽运光的偏振度对信号光增益几乎没有影响^[5],另外,抽运光的相对强度噪声(RIN)在正向抽运方式下很容易耦合到信号中,从而降低光信噪比(OSNR)。但是随着制造技术的发展,现在激光

收稿日期:2003-12-27;收到修改稿日期:2004-05-19

作者简介:姜海明(1976—),男,辽宁省阜新市人,电子科技大学光电信息学院助教,硕士,主要从事光纤通信相关技术方面的研究。E-mail:dddxyj@sina.com

器的相对强度噪声已经可以做得相当低^[6],当抽运光的相对强度噪声低于一定值的时候,其对信号光光信噪比的影响就可以忽略^[7]。另外,通过抽运光合波器把两束正交偏振的抽运光合成一束,理论上可以使合成后的偏振度降为0,从而使对信号光的偏振相关增益降到最低。从以上分析可见,限制正向抽运方式的两个问题已经得到很好的解决。研究发现,采用正向抽运方式的拉曼光纤放大器可以提升整个传输系统的性能^[8]。另外,采用双向抽运方式的拉曼光纤放大器比采用纯反向抽运方式的拉曼光纤放大器可以更好地减小瑞利散射噪声^[9]。尽管关于正向抽运和双向抽运的研究已有一些报道^[8~10],但就作者所知,目前还少有文献对双向单波长抽运拉曼光纤放大器在总抽运光功率一定的情况下,正反向抽运光功率分配关系对信号光开关增益的影响进行深入、全面的研究,本文应用打靶法对该问题进行了数值仿真研究。

1 理论模型

拉曼光纤放大器是根据受激拉曼散射的原理工作的,在单波长双向抽运的拉曼光纤放大器中,信号光与抽运光在光纤中的相互作用过程可由下面的耦合方程组进行描述^[11]

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}}(P_f + P_b)P_s - \alpha_s P_s \quad (1)$$

$$\frac{dP_f}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_f P_s - \alpha_p P_f \quad (2)$$

$$\frac{dP_b}{dz} = \frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_b P_s + \alpha_p P_b \quad (3)$$

其中, P_f , P_b , P_s 分别为正向抽运光、反向抽运光和信号光的功率, α_p , α_s 分别为光纤对抽运光和信号光

的衰减系数, ω_p , ω_s 分别为抽运光和信号光的角频率, z 为信号光沿光纤的传播方向, A_{eff} 为光纤的有效纤芯面积, g_R 为光纤拉曼增益系数,其值与信号光和抽运光的频差有关,是光纤的固有属性。虽然由式(1)~(3)组成的微分方程组正确描述了光纤中抽运光和信号光相互作用的规律,但是该方程组只有在假设 $\alpha_p = \alpha_s$ 时才有解析解^[12]。为了更与实际情况相符合,本文用数值计算的方法来求解该方程组。

2 数值仿真及结果分析

从数学的角度分析,当拉曼光纤放大器采用双向抽运方式时,其数学模型对应着上述方程的边值问题,即已知信号光输入端($z=0$)的信号光入纤功率 P_{s0} ,正向抽运光的入纤功率 P_{f0} 和信号输出端($z=L$:光纤长度)反向抽运光的入纤功率 P_{b0} 情况下求解 P_s , P_f 和 P_b 。该微分方程组的边值问题一般可以采用“打靶法”转化为初值问题,而初值问题可以通过采用四阶的龙格-库塔法进行数值求解^[13],数值仿真所应用的程序就是根据以上的分析采用标准C语言编写的。仿真中拉曼光纤放大器增益特性采用信号光的开关增益 $G_{\text{on-off}}$ 来衡量,定义为

$$G_{\text{on-off}} = P_s(L)/P'_s(L) \quad (4)$$

其中, $P_s(L)$ 和 $P'_s(L)$ 分别为抽运光开和关时光纤输出端的信号光功率。数值仿真所用的参数如表1所示,其中 P_{total0} 为抽运光总入纤功率,其余参数含义同前所述。为了研究信号光的开关增益和正向抽运光功率占总抽运光功率百分比的关系,在信号光入纤功率分别为-6 dBm,-3 dBm,0 dBm和3 dBm时,对信号光开关增益随正向抽运光功率百分比的变化进行了计算,结果如图1所示。

表1 计算参数

Table 1 Calculating parameters

Parameter	L/km	$g_R/(10^{-14} \text{ m/W})$	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	$\alpha_p/(\text{dB/km})$	$\alpha_s/(\text{dB/km})$	$P_{\text{total0}}/\text{mW}$
Value	20	3.25	80	0.24	0.2	1000

从图1可见,信号光的功率很小(-6 dBm)时,信号光的开关增益几乎与正向抽运光功率的百分比无关,当信号光的功率逐渐增大时,信号光的开关增益受正向抽运光功率百分比的影响也稍有增加,但影响的程度很小。当信号光的入纤功率 $P_{s0} = -6$ dBm,正向抽运光功率的百分比从1%增大到99%时,信号光的开关增益增加约为0.7%,当 $P_{s0} = 3$ dBm,正向抽运光功率的百分比按同一规律变化时,

信号光的开关增益增加约为3%。所以,当信号光的功率远小于抽运光的总功率时,信号光的开关增益与正向抽运光功率的百分比几乎无关,但是信号光的功率增大到一定值时,正向抽运的效率要略高于反向抽运的效率。

图1仅画出了光纤的输出端信号光功率在抽运光开和关时的比值(开关增益)与正向抽运光功率百分比的关系,为了更清晰地了解信号光的生长是如

何受正向抽运光功率百分比影响的,还仿真了不同信号光入纤功率、不同正向抽运光入纤功率百分比时,信号光功率沿光纤长度方向的演变。图 2 中画出了信号光入纤功率分别为 -6 dBm, 3 dBm 和正向抽运光功率百分比分别为 1%, 50% 和 99% 情况下信号光功率沿光纤长度方向上的演化。其余的信号光入纤功率下,变化趋势基本相同,故未画出。

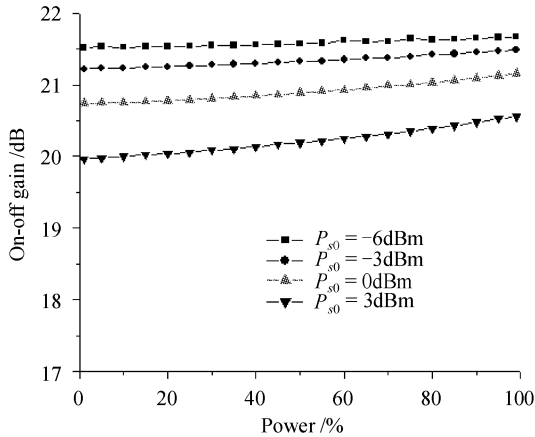


图 1 开关增益与正向抽运光功率关系

Fig. 1 On-off gain versus forward pump power

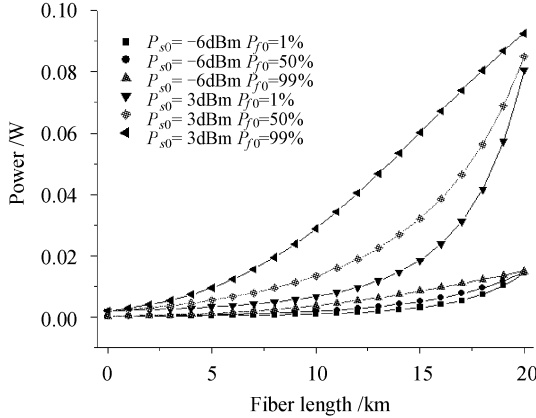


图 2 信号光沿光纤长度的变化

Fig. 2 Signal power versus fiber length

从图 2 中可见,当信号光的入纤功率很小时(-6 dBm),不论正向抽运光功率的百分比是多少,信号光的迅速增长都发生在光纤长度的约 10 km 之后,尽管信号光在光纤中传输时各处的功率并不相等,但是在光纤的输出端,信号光的输出功率几乎相同,那么信号光的开关增益自然相同,这和图 1 的结论一致。当信号光的功率较大(3 dBm)时,信号光沿光纤长度方向的演化明显不同于小信号的情况。由图 2 可见,此时,正向的抽运光功率百分比越小,信号光的放大区越集中于光纤的后面部分。同小信

号入纤光功率时一样,正向抽运光功率百分比不同时,信号光沿光纤长度的变化趋势不同。在光纤的信号光输出端,虽然信号光的功率略有不同,但是差别较小,所以其开关增益差别亦很小,这也和图 1 中

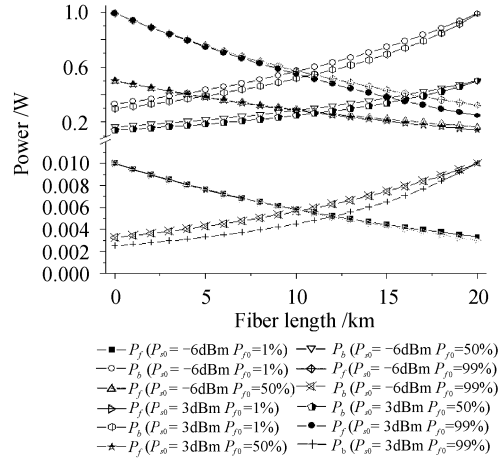


图 3 抽运光沿光纤长度的变化

Fig. 3 Pump power versus fiber length

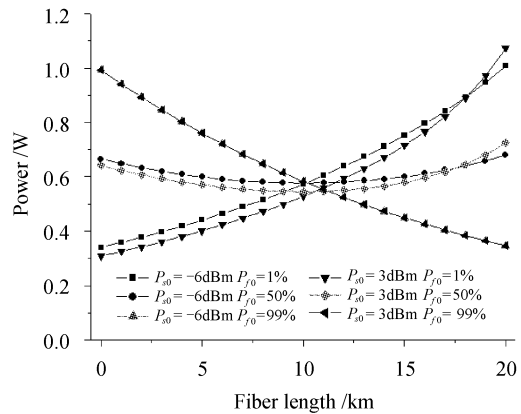


图 4 总光功率沿光纤长度的变化

Fig. 4 Total power versus fiber length

的结论一致。另外,还仿真了光纤中正反向抽运光和总的光功率沿光纤长度的演化情况,图 3 和图 4 中分别画出了信号光入纤功率分别为 -6 dBm, 3 dBm 和正向抽运光功率百分比分别为 1%, 50% 和 99% 情况下正反向抽运光和总光功率沿光纤长度方向上的演化,其余的信号光入纤功率情况下,变化趋势基本相同,故未在图中画出。由图 2,图 3 和图 4 可见,同一信号入纤功率下,正向抽运光百分比不同时,尽管信号光的开关增益变化不大,但是信号光、正反向抽运光、总的光功率沿光纤的分布有很大差别。为了使总光功率沿光纤的分布比较均匀,减小不必要非线性干扰,在信号光功率远小于总抽运光功率时,最好采用正反向对称抽运的方式,即正反向

抽运光功率相等的抽运方式。当信号功率较大时,可在对称抽运的基础上适当改变正向抽运光功率的百分比,同样也能使光纤中的总光功率分布较均匀。

3 小信号解析解和数值解比较

除了数值仿真外,还对式(1)~(3)在小信号的情况下进行了解析求解。过程如下:在小信号情况下,式(2)和式(3)右边表示信号光对抽运光消耗的第一项远小于表示光纤对抽运光损耗的第二项。例如,利用本文仿真数据,光纤长度为 20 km,光纤对抽运光的损耗 $\alpha_p = 0.24$ dB/km,信号光的输入功率为 -6 dBm,总的抽运光功率为 1 W,信号光的开关增益为 21.5 dB,那么光纤对抽运光的损耗约为 5 dB,对应损耗的抽运功率为 720 mW,而信号光从抽运光吸收的光功率约为 14 mW,仅占抽运光总功率的 1.4%,所以,解方程组时,略去表示抽运光消耗的式(2)和式(3)右边的第一项是合理的^[11]。根据以上原则,由式(2)和式(3)可得

$$P_f = P_{f0} \exp(-\alpha_p z) \quad (5)$$

$$P_b = P_{b0} \exp[\alpha_p(z-L)] \quad (6)$$

把式(5)和式(6)代入式(1)中,然后解关于 P_s 的一阶微分方程,结合相应的初始条件可得到小信号条件下的信号光的开关增益表达式为

$$G_{\text{on-off}} = \exp\left\{\frac{g_R(P_{f0} + P_{b0})}{A_{\text{eff}}\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]\right\} \quad (7)$$

由式(7)可见,小信号情况下,在同一放大系统中,即光纤的相关参数已确定时,信号光的开关增益只与正向抽运光和反向抽运光功率之和有关,而与正向抽运光功率或反向抽运光功率占抽运光总功率的百分比无关,此结果和前面数值仿真的结果一致。

4 结 论

数值仿真和小信号解析结果都表明,当信号光的功率很小时,亦即小信号情况下,只要正反向抽运光的总功率保持不变,信号光的开关增益几乎与正反向抽运光的功率分配比例无关。当信号光的功率增大到对抽运光的消耗不能忽略时,随着正向抽运光功率百分比的增加,信号光的开关增益也略有增加,亦即正向抽运的效率要略高一些,但幅度不是很大。因此,在设计双向抽运的拉曼光纤放大器时,可以不考虑正反向抽运光功率分配对信号开关增益的影响,而考虑其他因素如噪声系数对正反向抽运光

功率分配比例的要求。另外,如果信号光功率远小于抽运光总功率,则正反向抽运光功率比为 1:1 时光纤中的总光功率分布最均匀,这样可以减小一些不必要的非线性效应。当信号功率较大时,可以在对称抽运的基础上适当改变正向抽运光功率的百分比,同样也能使光纤中的总光功率分布较均匀。以上结论对双向抽运拉曼光纤放大器的设计具有重要参考价值。

参 考 文 献

- Zhang Wei, Peng Jiangde, LIU Xiaoming *et al.*. Improvement of transmission performances of optical communication systems by distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):729~734
张巍,彭江得,刘小明等. 分布光纤拉曼放大器对光通信系统传输性能的改善[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):729~734
- Jia Dongfang, Li Shichen, Song Lijun. Optimized design of fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):808~811
贾东方,李世忱,宋立军. 光纤拉曼放大器的优化设计问题[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7):808~811
- G. C. Gupta, L. L. Wang, O. Mizuhara *et al.*. 3.2-Tb/s (40 ch×80 Gb/s) transmission with spectral efficiency of 0.8 b/s/Hz over 21×100 km of dispersion-managed high modal dispersion fiber using all-Raman amplified spans [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7):996~998
- A. H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar *et al.*. 2.5 Tb/s (64×42.7 Gb/s) transmission over 40×100 km NZDSF using RZ-DPSK format and all-Raman-amplified spans [C]. *Proceeding of OFC 2002*, FC2-1~FC2-3
- S. Popov, E. Vanin. Polarization dependence of Raman gain on propagation direction of pump and probe signal in optical fibers [C]. *Technical Digest of CLEO 2001*, 146~147
- R. P. Espindola, K. L. Bacher, K. Kojima *et al.*. High power, low RIN, spectrally-broadened 14xx DFB pump for application in co-pumped Raman amplification [C]. *Proceeding of Eur. Conf. on Opt. Comm.*, 2001, Vol. **6**:36~37
- C. R. S. Fludger, V. Handerek, R. J. Mears. Pump to signal RIN transfer in Raman fibre amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(1):15~17
- P. M. Krummrich, R. E. Neuhauser, H. Bock *et al.*. System performance improvements by codirectional Raman pumping of the transmission fiber [C]. *Proceeding of Eur. Conf. on Opt. Comm.*, 2001, Vol. **2**:114~115
- M. Nissov, K. Rottwitt, H. D. Kidorf *et al.*. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12):997~998
- D. A. Chestnut, C. J. S. de Matos, P. C. Reeves-Hall *et al.*. Co- and counter-propagating second-order-pumped lumped fiber Raman amplifiers [C]. *Proceeding of OFC 2002*, 382~383
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic, 1989
- J. AuYeung, A. Yariv. Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(5):347~352
- Deng Jianzhong, Liu Zhixing. Calculation Method [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 224~230
邓建中,刘之行. 计算方法[M]. 第二版,西安:西安交通大学出版社,2001. 224~230