

文章编号: 1001-3806(2009)04-0406-03

前、后向多抽运光纤喇曼放大器的增益特性分析

周维军, 李泽仁, 王荣波

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究前向、后向多抽运光纤喇曼放大器的增益特性, 在受激喇曼散射功率耦合方程组的基础上, 采用龙格-库塔法结合打靶法分别计算了前、后向抽运功率、信号功率沿光纤的演化过程, 并给出了抽运功率和信号功率的计算结果。结果表明, 前向抽运系统中信号开始被放大, 在最大处开始快速减小。低频抽运光的功率开始被放大的原因是由于抽运光之间的非线性相互作用引起的。后向抽运时信号开始被缓慢减小, 然后在距离光纤末端处快速增加。这为以后喇曼光纤放大器的设计提供了重要的参考。

关键词: 光学器件; 光纤喇曼放大器; 抽运激光; 受激喇曼散射; 增益特性

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.021

Analysis of gain characteristics of forward and backward pumped Raman amplifiers

ZHOU Wei-jun, LI Ze-ren, WANG Rong-bo

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study gain characteristics of forward and backward multi-pumped Raman amplifiers, based on the power propagation equations of multi-pumped Raman fiber amplifiers, the pumped power and signal power along the fiber was calculated combining Rong-Kuta with shoot calculation method. The calculation results showed that in the forward pumped fiber amplifiers, the signal power was amplified at first because of the interaction between the pumped light, then reduced fast after the peak value, and that in the backward pumped fiber amplifiers, the signal power reduced gradually at first, then increased fast at the end of the fiber. The result is an important reference for the design of the Raman fiber amplifiers.

Key words: opcal devices; fiber Raman amplifier; pump laser; stimulated Raman scattering; gain characteristics

引言

随着社会的发展, 人们对信息的依赖越来越严重, 信息传输的需求急剧增加。光纤通信由于其容量大、噪声低、保密性好等优点, 已经成为干线传输的主要技术^[1-2]。基于掺铒光纤放大器(Er-doped fiber amplifier, EDFA)的波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术已经成熟, WDM系统信道越来越多, 每信道的速率越来越高, 通信波段从C波段扩展到L波段甚至S波段, WDM的发展对光放大器提出了越来越高的要求。EDFA在C波段约35nm带宽内能够实现比较平坦的增益, 20世纪90年代初期就开始在实际系统中使用。由于光纤制造技术的发展, 现在可以消除1.37 μm 附近的损耗高峰, 未来通信波段渴望扩展到从1.2 μm 到1.7 μm 的宽广范围内。在这样的

波长范围内, EDFA是无能为力的^[3-5]。但由于大功率的抽运激光器技术的日趋成熟, 一项尘封多年的技术摆在了面前, 这就是光纤喇曼放大技术。光纤喇曼放大器(fiber Raman amplifier, FRA)具有低噪声和仅由抽运波长决定增益波段的特性。利用不同波长的多抽运激光器可以实现100nm以上的平坦增益, 几乎涵盖了S(1460nm~1530nm), C(1528nm~1562nm), L(1570nm~1610nm)3个波段, 光纤喇曼放大器还可以在更宽的波长范围内实现平坦增益。在近期的许多高速率长跨距WDM系统中, 光纤喇曼放大器因其分布式放大特点, 不仅能够减弱光纤非线性的影响, 而且能够抑制信噪比的劣化^[1-2]。

目前, 在一些实验中, 光纤喇曼放大器已经成功地被应用。美国康宁公司也已经成功开发了世界上第1个商品化的光纤喇曼放大器PureGain5000R, 并投入使用。除了康宁公司以外, 北电、朗讯等大的电讯公司都积极开展对光纤喇曼放大器的研究。光纤喇曼放大器主要用作分布式放大器, 辅助EDFA进行信号放大。FRA也可以单独使用, 放大EDFA不能放大的波段。

作者简介: 周维军(1978-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光纤传感技术研究及光纤通信的研究工作。

E-mail: zhouxin787@163.com

收稿日期: 2008-05-08; 收到修改稿日期: 2008-07-22

分布式光纤喇曼放大器还允许通过加密信道间隔,提高光纤传输的复用程度和传输容量。从数值模拟可以得到,原始设计为 10Gbit/s,信道间隔为 100GHz 的系统,可被升级到信道间隔为 50GHz,并无任何附加代价。笔者分析了喇曼放大器的工作原理,建立了前向、后向的数学模型,对前、后向抽运光纤喇曼放大器增益特性和信号抽运功率变化过程进行了分析、比较^[6-10]。

1 数学模型

影响光纤喇曼放大器性能的因素很多,如双瑞利噪声、自发喇曼散射等。对于多波长抽运 FRA 的模拟,影响增益的主要是损耗和喇曼效应项,而噪声项可以不考虑,即只要考虑损耗、信号抽运之间的喇曼放大、信号相互作用和抽运之间的相互作用,所以可以采用以下简化模型进行分析^[7]:

$$\pm \frac{dP_k(z)}{dz} = -\alpha_k P_k(z) + \sum_{j=1}^{k-1} g_{k,j} P_j(z) P_k(z) - \sum_{j=k+1}^N g_{k,j} \frac{\nu_k}{\nu_j} P_j(z) P_k(z) \quad (1)$$

式中, z 是传输距离, $P_k(z)$, $P_j(z)$ 分别为第 k, j 个信号(或者抽运)的功率, $g_{k,j} = \frac{g_R(\nu_k, \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}}$ 为喇曼增益系数; K_{eff} 是偏振相关系数($1 \leq K_{\text{eff}} \leq 2$), A_{eff} 是光纤的有效面积, ν_k, ν_j 分别是第 k, j 个信号(或抽运)的频率; α_k 是在第 k 个信号(或抽运)波长上的衰减系数。(1) 式中右边第 1 项为损耗项,第 2 项是第 k 个信号(或抽运)从高频部分因为喇曼效应吸收的功率,第 3 项是它对低频率部分形成抽运而损失的功率,假定从第 1 个到第 N 个频率是按降序排列的。正负号分别代表前向与后向传输。

考虑到不同光纤的喇曼增益系数曲线有所差别,需要寻找合适的峰值幅度和 $\Delta\nu$ 值,使模拟的结果与实际系统尽可能的一致。图 1 为 50km 的标准模光纤(standard mode fiber, SMF)在 1450nm 波长、100mW 功率抽运情况下的拟合增益曲线。Stokes 频移取 13.2THz,喇曼系数最大。图 2 为 SMF28 在不同信号波

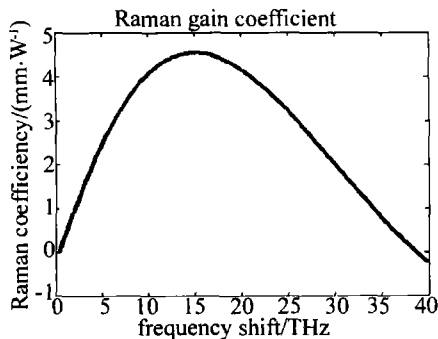


Fig. 1 Lorentz gain curve

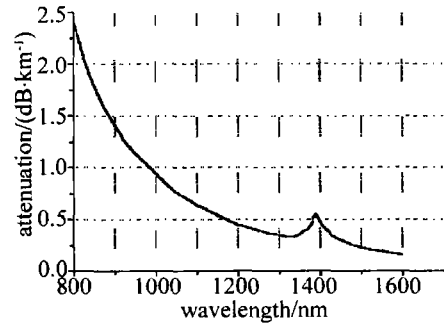


Fig. 2 Fiber attenuation curve

长处光纤衰减系数的测试结果曲线,在 1390nm 附近存在吸收峰,且随着波长的减少,信号衰减系数快速增加。

2 数值模拟结果分析

功率耦合方程(1)式描述了信号光与抽运光相互作用过程,同时给出了影响喇曼增益的相关因子,方程左侧的正负号表示信号光、抽运光沿光纤传输的方向。为了研究抽运光与对不同波长信号光的相互作用及信号光、抽运光沿光纤的变化,这里对功率耦合方程进行了数值分析和计算,计算模型分别为前向抽运和后向抽运两种,对(1)式的求解,前向抽运时,属于初值问题,也就是信号和抽运初始值位于光纤的同一端,可以采用 4 阶 Runge-Kutta 法得到结果。对于后向抽运,属于边值问题(信号和抽运光功率分别位于光纤的两端),计算起来比较复杂,一般采用平均功率法、打靶法等,需要多次迭代修正才能得到比较满意的结果,特别是抽运功率初值的预测对计算结果有着很大的影响。

数值模拟中抽运光波长参量选取分别为:1420nm (P_{p1}), 1435nm (P_{p2}), 1445nm (P_{p3}), 1455nm (P_{p4}), 1465nm (P_{p5}) 和 1475nm (P_{p6}), 功率均为 0.2W; 信号光为 C + L 波段(1530nm ~ 1610nm), 功率均为 0.1mW, 信道数 80, 光纤为 Corning 公司的 SMF28 单模光纤, 长度 50km。图 3、图 4 是通过数值模拟得到的 6 抽运源、80 信道喇曼放大器结果, 其中图 3 为喇曼抽运激光功率沿光纤变化过程, 数值计算曲线从上

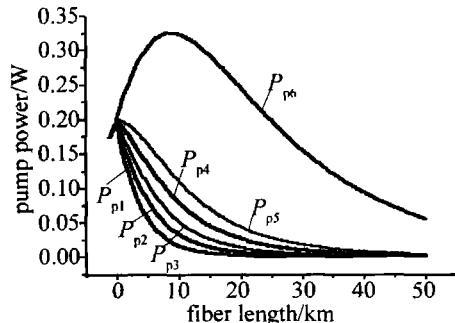


Fig. 3 Forward pump power distribution along the fiber

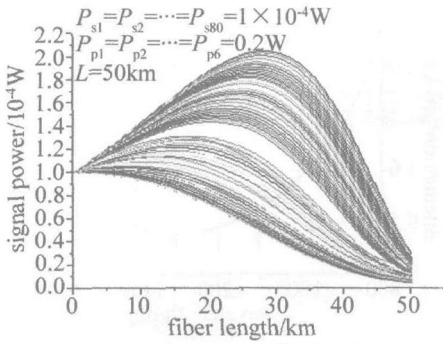


Fig. 4 Forward signal power distribution along the fiber

到下频率依次减少。由图可知,波长为 1475nm 抽运光功率开始增加,直到增加到最大,然后快速下降到最小。抽运光频率越高,低频抽运光和信号光吸收其功率也就越多,使其功率下降也就越快。低频抽运光如 1465nm 和 1475nm,由于吸收了高频抽运光功率,其功率开始增加,然后由于喇曼效应,功率一部分转移到信号光,造成信号光功率的增加,另外一部分由于光纤作用而损耗。前向 80 信道信号光功率的计算结果如图 4 所示,信号光开始增加到最大,然后开始下降到最小。

图 5、图 6 为后向抽运喇曼光纤放大器数值模拟计算结果。后向抽运激光自信号输出端输入,与信号

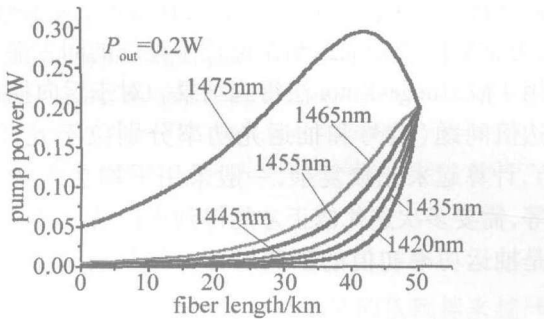


Fig. 5 Backward pump power distribution along the fiber

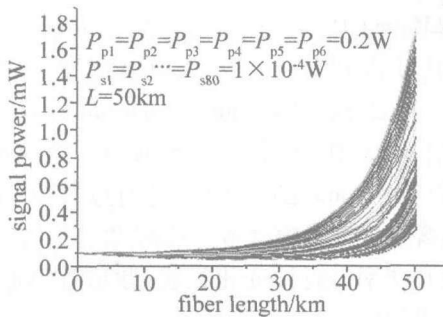


Fig. 6 Backward signal power distribution along the fiber

方向相反,从图 5 中可以看出,光纤输出端抽运功率均为 0.2W,其中波长为 1475nm 激光功率开始随着传输距离的增加而增加,这是由于抽运光之间的非线性相互作用,低频抽运光吸收了高频抽运光功率而被放大,当功率达到最大后快速下降。波长为 1420nm, 1435nm, 1455nm, 1465nm 抽运功率从开始便快速下降,这是由于抽运与信号之间的非线性相互作用引起的。图 6 为后向抽运 C + L 波段信号光功率沿光纤分

布,可以看出,光纤从 0 ~ 35km 处,信号光功率沿着光纤缓慢减小,在 35km 后,由于信号光吸收了抽运光功率而被放大,使得信号光功率快速增加。这种效应对于信号在光纤中超长距离传输有着非常大的作用,不仅能够降低系统噪声,而且能够延长信号传输距离。

3 数值模拟结果比较

图 7、图 8 为前后向抽运条件下,抽运功率和信号功率沿光纤演化过程的比较。图 7 是 6 抽运激光器功

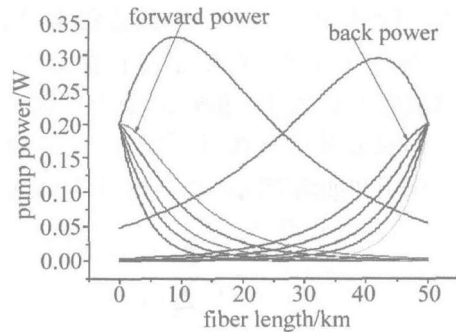
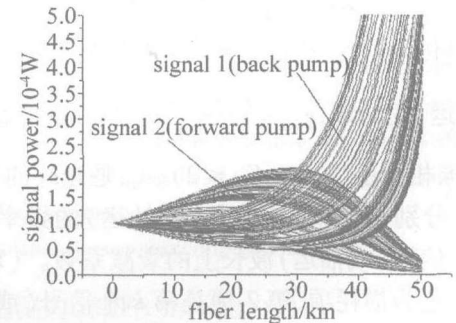


Fig. 7 Forward and backward pump power distribution along the fiber



率沿光纤的演变曲线,从图中可以看出,前后向抽运光功率变化呈对称性。图 8 为前、后向信号沿光纤演化过程结果对比,由图中对比可知,采用后向抽运方式的信号功率变化比采用前向抽运方式时要明显大,后向抽运时信号功率在绝大部分传输中基本维持在一定的功率水平上,体现了线性放大器的优点。而且从整个传输中的平均功率来看,前向抽运时信号平均功率要大于后向抽运时的情况,所以前向抽运时抽运功率的消耗也多一些。

4 结论

通过软件分别数值计算了在前向抽运和后向抽运喇曼放大系统中抽运功率、信号功率沿光纤的演变过程,得出了抽运功率和信号功率沿光纤传输过程中的分布情况:前向抽运系统中信号开始被放大,在最大处开始快速减小。低频抽运光的功率开始被放大的原因是由于抽运光之间的非线性相互作用引起的。后向抽

(下转第 432 页)

为使输入图像在整个输入平面上都输出高的相关峰值,扩束准直光学系统输出的高斯光束腰斑直径应在32mm以上。此时,输入图像在输入平面上边缘处的输出相关峰值,相对于图2a所示的两输入图像对称中心在输入平面中心的情况,下降约10%。

因高斯光束当输出功率一定时,经光学系统扩束可使光场均匀性变好,但扩束后光场振幅或强度将变小,同样会使输出相关峰值降低,为使相关峰值保持不变,应提高激光器输出功率。例如腰斑半径1mm的高斯光束,扩束为腰斑半径32mm的高斯光束,若要求此时输入图像在光斑边缘处输出相关峰值刚好满足要求,则由高斯光束表示式,可求得腰斑半径1mm的高斯光束腰斑中心振幅应是腰斑半径32mm的高斯光束腰斑中心振幅的5.7倍,即激光器输出激光功率要足够大。

3 结论

通过定量分析JTC中输出相关峰值随照明高斯光束腰斑大小和输入图像中坦克图像位置的变化,表明当照明高斯光束腰斑半径较小时,高斯光束在入射平面上,场分布对JTC输出相关峰值有明显影响,为使输入图像在整个输入平面上都输出高的相关峰值,经扩束准直光学系统扩束后,输出的高斯光束直径要足够大。对图2所示的输入图像,使用GAX1型LCD上载

输入图像时,为保证输入图像在整个输入平面上任何位置都输出高的相关峰值,照明高斯光束腰斑直径应大于32mm,且激光器输出激光功率要足够大,其腰斑中心处振幅应为扩束后腰斑中心处振幅的5.7倍。

参考文献

- [1] SONG F J, JUTAMULIA S. Advanced optical information processing [M]. Beijing: Peking University Press, 1998: 60-74 (in Chinese).
- [2] LÜ N G. Fourier optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 321-325 (in Chinese).
- [3] SHEN X J, GAO H Q, WANG Y Zh, *et al.* Inaccurate joint transform correlation [J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 575-579 (in Chinese).
- [4] SHEN X J, LIU B Q, WANG Y Zh, *et al.* The relation between output correlation spot shape and length width ratio of input correlation image in the joint transform correlation [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 750-754 (in Chinese).
- [5] LI Ch, AN Y Y, ZENG X D. A novel phase-encoded amplitude-modulated joint transform correlator [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(30): 327-331 (in Chinese).
- [6] JUTAMULIA S. Joint transform correlators and their applications [J]. Proc SPIE, 1992, 1812: 233-243.
- [7] JUTAMULIA S, ASAKURA T. Rotation-invariant joint transform correlator [J]. Appl Opt, 1994, 30(21): 5440-5442.
- [8] LÜ B D. Laser optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 104-107 (in Chinese).
- [9] WANG B Zh, ZHAO Zh G, DUAN K L. Propagation properties of hollow Gaussian beams through an optical system with a hard-edged aperture [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 203-205 (in Chinese).
- [10] Acta Optical Sinica, 2003, 23(2): 194-196 (in Chinese).
- [5] KIDORF H, ROTTWITT K, NISSOV M, *et al.* Pump interactions in 100nm bandwidth Raman amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(5): 530-532.
- [6] NAMIKI S, EMORI Y I. Broadband Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division multiplexed high-power laser diodes [J]. Selected Topics in IEEE J Q E, 2001, 7(1): 3-16.
- [7] MEI J J, LIU D M, HUANG D X. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 350-351 (in Chinese).
- [8] LING J, LI K, KONG F M, *et al.* Simplified model design and pump optimization of multi-pumped fiber Raman amplifiers [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 334-336 (in Chinese).
- [9] WU B, LI K, KONG F M, *et al.* A study of the simulation algorithm for multi-pumped broadband Raman amplifier [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 411-413 (in Chinese).
- [10] JIANG H M, WANG Y F. Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 377-378 (in Chinese).

(上接第408页)

运时信号开始被缓慢减小,然后在距离光纤末端处快速增加。同时对前后向抽运条件下抽运功率和信号功率沿光纤演化过程进行了对比,并对结果进行了分析,给出了两者之间的差异,这为以后喇曼光纤放大器的设计提供了重要的参考。

参考文献

- [1] ISLAM M N. Raman amplifiers for telecommunications [J]. Selected Topics in IEEE J Q E, 2002, 8(3): 548-559.
- [2] MANDELBAUM I, BOLSHTYANSKY M. Raman amplifier model in single-mode optical fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(12): 1704-1706.
- [3] HE J S, GUO T W, GU W Y, *et al.* Study on optimal design broadband and flat-gain multi-wavelength pumped fiber Raman amplifier [J]. Journal of Optical Communication, 2003, 24(1): 2-5 (in Chinese).
- [4] TONG Z, WEI H, JIAN S S. Numerical simulation and optimization of broadband fiber Raman amplifiers using multi-wavelength pumps [J].