

文章编号: 0253-2239(2002)02-0193-04

多波长抽运宽带光纤拉曼放大器的数值模拟与优化*

童 治 魏 淮 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 采用平均功率分析算法对多波长抽运宽带光纤拉曼放大器进行了细致的数值模拟, 并根据多抽运拉曼增益谱的特点和不同抽运波长对增益斜率的不同影响提出了一种新的有效的抽运优化算法. 并利用这种方法对 10 波长抽运的光纤拉曼放大器进行了优化, 获得了 70 nm 带宽上增益谱波动低于 0.5 dB 的结果.

关键词: 激光技术; 光纤拉曼放大器; 平均功率分析; 抽运优化; 增益波动

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

近几年来, 由于对通信带宽需求的不断增长, 光纤拉曼放大器重新受到了广泛的研究和重视. 相比稀土掺杂光纤放大器, 拉曼放大器具有灵活的信号增益范围, 只要有合适的抽运波长就可以对不同波长范围的信号提供增益; 并且由于在普通光纤中也可以产生拉曼增益, 所以采用光纤拉曼放大器可以方便的实现现有光纤上的系统直接扩容, 节省投资. 特别是利用传输光纤作为增益介质的分布式光纤拉曼放大器由于具有优良的噪声性能而得到了广泛的应用^[1,2].

为了获得平坦宽带的增益谱, 应用于密集波分复用系统的拉曼放大器大都采用多波长半导体激光器抽运的结构, 可以获得带宽范围为 80 nm, 波动小于 0.2 dB 的宽带增益谱^[3]. 但由于不同抽运波长之间存在着由于拉曼效应引起的由短波长到长波长的能量转移^[4], 因此必须对不同抽运波长的入纤功率进行优化才能获得较小的增益波动. 目前关于抽运优化方法的报道很少, 文献[5]采用模拟退火算法对抽运功率进行了优化, 这种算法对于抽运波长数较

多, 信道数较大的情况需要很长的计算时间.

本文对多波长抽运光纤拉曼放大器进行了细致的数值模拟. 并提出了一种新的抽运优化方法. 在短时间内对多个抽运波长(8 个以上)的入纤功率进行优化可以获得 70 nm 增益带宽上增益谱波动小于 0.5 dB 的结果.

2 多波长抽运光纤拉曼放大器的数值模型

多个抽运、多信道拉曼放大过程的模拟是非常复杂的, 它涉及到抽运光到信号光, 抽运光到抽运光, 信号光到信号光之间的拉曼增益过程, 还包括自发辐射噪声和自发热噪声的产生以及后向瑞利散射的放大过程. 更精致的模型还要包括非线性效应如受激布里渊散射、高阶斯托克斯波以及反斯托克斯波的产生. 在一般的情况下, 后述的几种影响可以忽略, 我们可以写出描述多抽运宽带拉曼放大器增益过程的功率耦合方程^[6]:

$$\begin{aligned} \frac{dP^\pm(z, \nu)}{dz} = & \mp \alpha(\nu) P^\pm(z, \nu) \pm \gamma(\nu) P^\mp(z, \nu) \pm P^\pm(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{eff} A_{eff}(\xi)} [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \pm \\ & h\nu \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{eff}(\xi)} [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \left[1 + \frac{1}{\exp[h(\xi - \nu)/(kT)] - 1} \right] \Delta\nu \mp \\ & P^\pm(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{\nu g_R(\nu - \xi)}{\xi A_{eff}(\nu) K_{eff}} [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \mp 2h\nu P^\pm(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{eff}} \times \\ & \left[1 + \frac{1}{\exp[h(\xi - \nu)/(kT)] - 1} \right] \Delta\nu, \end{aligned} \quad (1)$$

* 国家 863 高科技计划(2001AA122012) 和国家自然科学基金(60177027) 资助课题

E-mail: tongzhi11@263.net

收稿日期: 2001-12-24; 收到修改稿日期: 2002-03-01

式中 ν, ξ 分别代表信道及抽运的频率, $P^\pm(z, \nu)$ 代表正反向不同频率的功率, $\alpha(\nu)$ 和 $\gamma(\nu)$ 分别为不

同频率处的光纤损耗和后向瑞利散射系数, h 、 k 、 T 分别为普朗克常量、玻尔兹曼常量和开氏温度, 这里取 $T = 300$ K。 $\Delta\nu$ 代表等效自发辐射带宽。另外 K_{eff} 是抽运和信号之间的偏振因子, 由于采用普通光纤且传输距离很长, 可以认为抽运和信号间偏振混乱, $K_{\text{eff}} = 2$ 。最后, $g_{\text{R}}(\nu - \xi)$ 为短波长到长波长的拉曼增益系数, 与两波长间的频率差和抽运波长有密切关系^[11]; $A_{\text{eff}}(\nu)$ 表示不同频率处的有效面积, 可以用高斯模场分布来近似计算^[12]。(1) 式右边第二项描述瑞利散射的影响, 第四项描述了自发拉曼散射噪声和自发热噪声的产生, 最后两项考虑了抽运(或信号)的拉曼消耗。需要指出的是, 由于拉曼放大器的宽带增益谱和很宽的抽运波长范围, 为了尽量减小模拟的误差, 应当将(1) 式中的每个参量都与频率建立关系, 否则会导致较大的误差。

上述方程实际上是一个两点多边值的常微分方程组, 对它的求解可以采用打靶法或松弛迭代法^[7]。但当信道很多并且抽运波长也较多的情况下, 采用上述方法求解要花费大量的时间。这里我们采用平均功率分析算法^[8,9], 将传输光纤分为 N 段, 每段上认为各频率信道(或抽运)的增益与距离 z 无关, 因此可以利用平均功率解析求出每段上正反向的输出功率, 并且使得在各小段上乃至整个传输光纤上的边界条件都满足, 就可以得到方程组的近似解, 这种方法比传统的 R-K 法提高了 10~20 倍的速度, 而且能保证足够的精度。通过实验, 采用 25 段的划分就可获得满意的精度。

在本文的计算中, 我们采用文献[10] 的 $g_{\text{R}}/A_{\text{eff}}$ 的测量数据, 如图 1。光纤参量为 Corning 的 SMF-28 的典型参量, 光纤长度 30 km。在 1.55 μm 的损耗为 0.2 dB/m, 在 1.45 μm 的损耗为 0.24 dB/m。瑞利散射系数在 1.6 μm 波长时为 $5.8 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ 。并且我们只考虑抽运间频率间隔相等的情况, 也是实际应用中

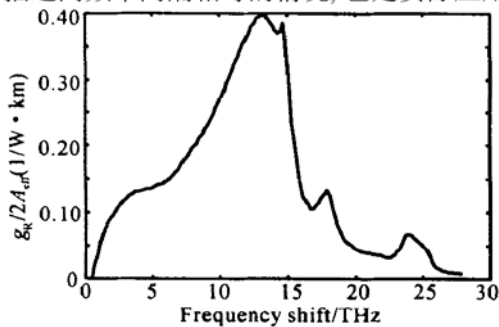


Fig. 1 Raman gain coefficient $g_{\text{R}}/2A_{\text{eff}}$ of SMF at different frequency shift using 1.45 μm pump

常见的情况^[10]。这里我们采用反向抽运的结构以减小抽运到信号的串话影响。使用 10 个抽运源, 抽运间隔 1.2 THz, 抽运频率范围从 210.52 THz 到 199.72 THz(相当于 1.425 μm 到 1.50 μm), 单个最大抽运输出功率 200 mW; 设置 100 个信道, 信道频率范围从 196.08 THz 到 186.03 THz(相当于 1.53 μm 到 1.61 μm), 信道间隔 100 GHz。

3 多波长抽运入纤功率的优化

由(1) 式可见, 由于存在拉曼散射导致的由短波长到长波长信道(或抽运)的能量转移, 因此如果每个抽运波长的输入功率都相同则会产生严重的增益不均衡。因此要获得宽带平坦的增益谱, 必须对每个抽运波长的入纤功率进行细致的调节, 即抽运优化。但由于多波长抽运拉曼增益过程的复杂性以及多抽运调节的多自由度, 因此对抽运功率的优化是相当困难的。我们认为可以从多抽运拉曼放大器的增益谱形状的特点以及不同抽运波长对增益斜率的不同影响效果出发, 找到一种有效的优化方法。

实际上, 在多波长抽运的光纤拉曼放大器的增益谱上存在着类似于周期起伏的波动形状, 波动的峰值点我们称为波动峰(wave crest), 这是由多个抽运产生的增益谱互相叠加形成的。对于具有相同频率间隔的多抽运情况, 如果抽运频率固定, 那么这些波动峰的频率位置也固定, 不随抽运功率的变化而改变(如图 2), 并且可以认为具有距离波动峰频率最近的峰值拉曼增益频率的抽运对其贡献最大, 因此这些波动峰可以与不同频率的抽运建立对应关系, 作为抽运功率调节的参考。另一方面, 不同的抽运波长对于增益谱的斜率的影响是不同的, 波长越长的抽运功率变化对增益谱斜率的影响越大, 而最短的抽运波长几乎对增益斜率没有影响, 只改变增

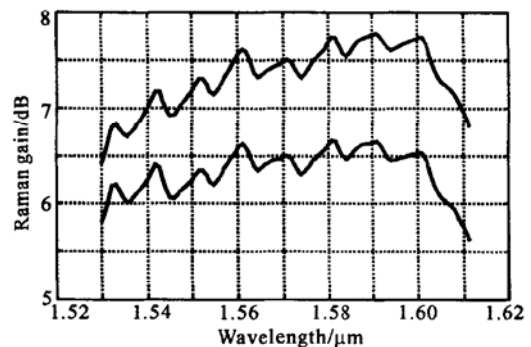


Fig. 2 Calculated Raman gain spectra with multiwave crests of fixed wavelength positions at different pumps' output power

益谱的幅度。利用这两个重要特点,我们提出了一种新的有效的抽运优化方法。

首先为了降低调节的自由度,加快优化速度,可以先把多个抽运源分成几组,每一组的几个抽运源输出功率一致调谐。分组的原则是波长最长的抽运源独立一组,波长越短则每组的抽运源个数可以越多。对于本文的 10 个抽运的情况,由短波长开始按 4 3 2 1 的抽运个数划分成 4 组就足够了。其次,以波动峰的增益值作为参考点,每个波动峰对应拉曼增益峰值频率距离其最近的抽运(第一个和最后一个抽运波长可以分别与所需增益范围内最短和最长波长的信号增益相对应,作为第一个和最后一个参考点),然后按以下步骤进行调节:

1) 计算输出增益谱以及所需信号增益范围内的最大增益波动 R , 并比较波长最短的参考点与其它参考点增益值的大小。若有参考点小于第一个参考点的增益值,则加大该参考点所对应的抽运频率所在组的输出功率,再重新计算输出增益谱及比较参考点;若都大于第一个参考点,则降低最大参考点对应的抽运频率所在组的输出功率,再计算增益谱及 R 。值得注意的是,不同频率范围的一组抽运调节的幅度不同,频率越低则调节的幅度越小,也即应该有不同调节权重,并且对不同的增益波动 R 调节的幅度也不同, R 越小则调节的幅度应该越小。

2) 比较调节前后的增益波动 R ,若小于未调节前,则继续第一步操作;否则减小上一步的调节量,直到 R 变小为止。当 R 小于所要求的值时,停止计算。

上述第一步与第一个参考点的比较是为了保持较高的增益值。在上述调节过程中,第一组抽运实际上是不调节的,因为它们对于增益斜率的影响很小。选择合适的调节因子,采用上述方法在奔腾 III 800 MHz 的计算机上可以在几分钟内将 70 nm 范围 10 dB 以上的波动优化为 1.2 dB 以下。最后,当增益谱波动较小时(< 1 dB)再用上述方法就很难进一步优化,此时需要对单个抽运的输出功率进行微调才能获得进一步的优化结果,优化的步骤与上述算法一致,只是将对一组抽运的同时调节变为对单个抽运功率的更小幅度的调节。对单个抽运的细致调节所需要的计算时间稍长一些,但如果目标增益谱波动值不是很严格的话(< 0.8 dB),则可以比较快地得到抽运优化结果。

图 3 为计算得到的未经优化时的拉曼增益谱,此时每个抽运的输出功率均为 200 mW。如前所述输出增益谱严重不均衡,增益波动达 10 dB 以上;图

4 是经过抽运分组优化后的增益谱结果,此时在 1532~1602 nm 共计 70 nm 的带宽上增益波动小于 1.2 dB;图 5 是经过单个抽运细致调节后的最后优

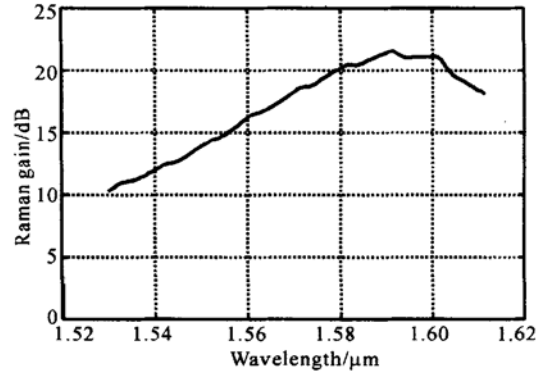


Fig. 3 Calculated Raman gain spectra pumped by 10 pumps with each 200 mW output power

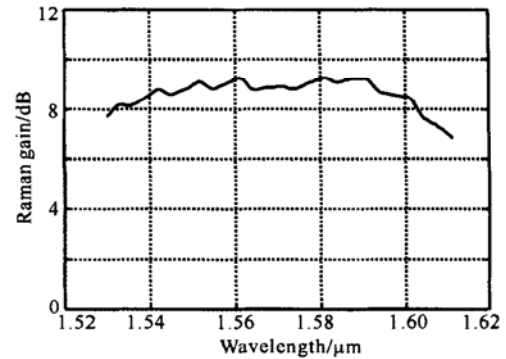


Fig. 4 Calculated gain spectra with 1.1 dB ripple from 1532~1602 nm after the first step optimization. 10 pumps' output power are 200 mW, 200 mW, 200 mW, 82 mW, 82 mW, 82 mW, 76 mW, 76 mW, 100 mW, respectively

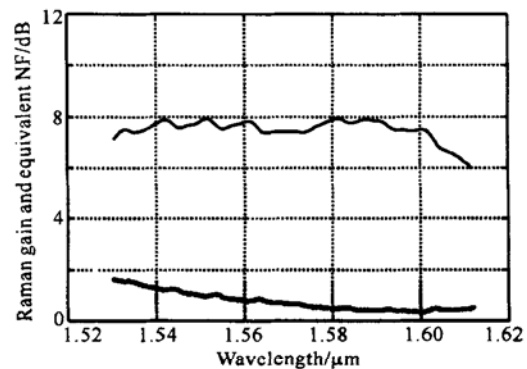


Fig. 5 Calculated gain spectra and equivalent NF after the final optimization of pumps' output power. A less than 0.5 dB gain ripple in 70 nm bandwidth from 1532 nm to 1602 nm had achieved. Output power of each pump is 200 mW, 200 mW, 200 mW, 176 mW, 54 mW, 82 mW, 53.5 mW, 72 mW, 72 W, 100 mW, respectively

化结果,在 70 nm 带宽上增益波动小于 0.5 dB,净增益 7 dB 以上。我们还计算了拉曼放大器的等效噪声指数,在短波长范围噪声指数的增加是由于接近抽运带的缘故^[9]。

结论 我们采用平均功率分析算法对多抽运光纤拉曼放大器进行了细致的数值模拟,并提出了一种有效的抽运优化方法,利用拉曼增益谱上的波动形状和不同抽运波长对增益斜率的不同影响,采用分组抽运调节和单个细致调节相结合步骤,可以在短时间内对多抽运结构的光纤拉曼放大器进行抽运优化,并获得了在 70 nm 带宽范围上增益谱最大波动小于 0.5 dB 的结果。

参 考 文 献

- 1 Hansen P B, Eskildsen L, Grubb S G *et al.*. Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplification. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1997, **9**(2): 262~ 264
- 2 Nielsen T N, Stentz A J, Rottwitz K *et al.*. 3. 28-Tb/s transmission over 3×100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 2000, **12**(8): 1079~ 1081
- 3 Emori Y, Matsushita S, Namiki S. 1-THz spaced multi-wavelength pumping for broadband Raman amplifiers. *ECOC '2000*, Paper 4. 4. 2. 73~ 74
- 4 Emori Y, Akasaka Y, Namiki S. Broadband lossless DCF using Raman amplification pumped by multichannel WDM laser diodes. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(22): 2145~ 2146
- 5 Yan M, Chen J, Jiang W *et al.*. Automatic design scheme for optical fiber Raman amplifiers backward pumped with multiple laser diode pumps. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 2001, **13**(9): 948~ 950
- 6 Kidorf H, Rottwitz K, Nissov M *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1999, **11**(5): 530~ 532
- 7 Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. New York: Wiley, 1994. 26 ~ 28
- 8 Hodgekinson T G. Improved average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1992, **4**(11): 1273~ 1275
- 9 Min B, Lee W J, Park N. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis. *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 2000, **12**(11): 1486~ 1488
- 10 Namiki S, Emori Y. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2001, **7**(1): 3~ 16
- 11 Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**(6): 276~ 278
- 12 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd ed. New York: Academic, 1995. 239 ~ 286

Numerical Simulation and Optimization of Broadband Fiber Raman Amplifiers Using Multi-Wavelength Pumps

Tong Zhi Wei Huai Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 24 December 2001; revised 1 March 2002)

Abstract: The broadband fiber Raman amplifiers pumped by multi-wavelength laser diodes are numerically simulated by using average power analysis method. A new method to optimize the pumping configuration efficiently is proposed based on the characteristics of multi-pumped Raman gain spectra and the fact that different pumps have different impacts on the gain slope. A fiber Raman amplifier pumped by 10-wavelength source is optimized and the gain ripple less than 0.5 dB in 70 nm gain spectra is obtained.

Key words: laser technique; fiber Raman amplifiers; average power analysis; pump optimization; gain ripple