

多泵浦拉曼放大器增益特性的仿真与分析

凌洁,李康,孔繁敏,刘艳,郭毅峰

(山东大学信息科学与工程学院,山东 济南 250100)

摘要:合理简化了多泵浦光纤拉曼放大器功率传输方程,利用多步平均功率法进行数值计算得到了密集波分复用系统信号的合成拉曼增益。借助该简化模型研究了多泵浦光源的个数、输入功率和波长分布对信号拉曼增益的影响,简单分析了实现超宽带平坦拉曼增益的多泵浦波配置原则,为多泵浦光纤拉曼放大器在密集波分复用系统中的应用提供了有价值的参考。

关键词:多泵浦光纤拉曼放大器; 受激拉曼散射; 合成拉曼增益; 后向泵浦

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0138-04

Simulation and analysis of gain characters of multi-pumped fiber Raman amplifier

LING Jie, LI Kang, KONG Fan-min, LIU Yan, GUO Yi-feng

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Power propagation equations of multi-pumped fiber Raman amplifier (FRA) were reasonably simplified, and multi-step average power method was applied to compute composite Raman gain of multi-signal in dense wavelength division multi-plexed system (DWDM) amplified by multi-pumped FRA. Based on such a simple and effective model, the influence of the number, input power and wavelength distribution of multi-pump on Raman gain was researched. The rules of implementing the ultra broad and flat Raman gain bandwidth were analyzed. All simulation and analysis provided valuable references for the application of multi-pumped FRA in DWDM system.

Key words: Multi-pumped fiber Raman amplifier; Stimulated Raman scattering; Composite Raman gain; Backward pump

0 引言

密集波分复用系统(DWDM)解决了长距离光纤传输对通信容量和系统扩展的需求,同时也带来新的问题,即如何提高光纤传输系统的容量、实现全光网

络、增加无中继的传输距离等。与掺铒光纤放大器(EDFA)相比,光纤拉曼放大器(FRA)具有全波段可放大的特性和可利用传输光纤在线放大的优点,同时具有优越的低噪声和宽带增益,这使得 FRA 逐渐在光放大器家族中占据重要地位,特别是近年提出的多泵浦光纤拉曼放大器^[1]更以利用多个泵浦光来实现

收稿日期:2003-06-17; 修订日期:2003-08-08

作者简介:凌洁(1979-),女,山东临沐人,硕士,主要从事光纤通信系统和计算机仿真方面的研究。

增益谱的宽带和平坦而备受关注。

同时,随着 DWDM 越来越广泛地应用到通信系统中,系统的复杂性也在不断地增加,光纤通信系统的计算机辅助设计(CAD)变得非常重要,这也使得对多泵浦 FRA 进行数学建模,并运用于 DWDM 通信系统的仿真研究成为必要。文中主要研究多泵浦 FRA 的建模方法,并在构造的一个简单有效的模型基础上,得到 DWDM 系统多路信号的合成拉曼增益;然后分析多泵浦光源不同配置对多路信号增益曲线的影响,实现了超宽带平坦的拉曼增益谱。

1 理论分析

1.1 多泵浦 FRA 简化模型的建立

多泵浦 FRA 的放大原理是受激拉曼散射(SRS),功率传输方程表示为^[2]:

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

式中 P^+ 和 P^- 分别表示前向和后向传输的光功率; z 为光信号在光放大器中的传输距离; α 为光纤衰减系数; γ 为瑞利后向散射系数; $g_r(\nu - \xi)$ 为频率分量 ν 和 ξ 之间的拉曼增益系数; A_{eff} 为光纤有效面积; K_{eff} 为泵浦光和斯托克斯光之间的极化状态因子,通常取随机状态 $2^{[3]}$; h, k, T 分别表示普朗克常数、玻耳兹曼常数和绝对温度。公式等号右侧包含六项:光纤衰减,瑞利后向散射,泵浦和泵浦、泵浦和信号、信号和信号之间的拉曼效应,放大器自发辐射噪声,由于拉曼功率转移引起的泵浦消耗以及热噪声^[4]。

FRA 泵浦光可采用与信号光同向或反向两种注入方式,因为后向泵浦注入可减小泵浦光与信号光相互作用的长度,从而减弱泵浦噪声对信号的影响,故

此处采用后向泵浦方式。这样公式(1)中就包含有前向信号光和后向泵浦光,为了降低模型结构复杂度,在不影响仿真精度的前提下对公式进行了有效的简化。在该数学模型中,考虑了泵浦光之间、信号光之间由于 SRS 引起的能量传递,光纤对不同波长信号不同的衰减系数^[5],同时忽略了瑞利后向散射功率和噪声功率损耗。这是因为在普遍应用的中等功率泵浦系统里,瑞利后向散射功率并不随信号放大而有较大的增加,因此同信号功率相比,瑞利后向散射能量对系统的影响可忽略不计^[6];而噪声功率只是信号功率的 10^{-7} ,在对信号功率的计算中也不加考虑。这样,公式简化为:

$$\frac{dP^{\pm}(z, \nu)}{dz} = \pm C(z, \nu) P^{\pm}(z, \nu) \quad (2)$$

$$\text{式中 } C(z, \nu) = A(z, \nu) - B(z, \nu) - \alpha(\nu) \quad (3)$$

$$A(z, \nu) = \sum_{\xi > \nu} \frac{g_r(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} P^{\pm}(z, \xi) \quad (4)$$

$$B(z, \nu) = \sum_{\xi < \nu} \frac{g_r(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} P^{\pm}(z, \xi) \quad (5)$$

在简化公式(2)~(5)的基础上,可以实现多泵浦 FRA 中信号功率的数值计算。文中采用多步平均功率法^[7]替代平均功率法^[8],从而提高了数值计算的准确性,具体方法为:先将放大器分为若干个连续的子放大器部分,以消除位置变量 z 的影响,每个部分的信号输出功率均用到前 4 步的计算值,如公式(6)所示,这样循环迭代得到的最后一个子放大器的输出功率就是整个放大器作用后的输出功率:

$$\begin{aligned} P^{\pm}(z_{j+1}, \nu) = & P^{\pm}(z_j, \nu) \exp\{ [55 C(z_j, \nu) - \\ & 59 C(z_{j-1}, \nu) + 37 C(z_{j-2}, \nu) - 9 C(z_{j-3}, \\ & \nu)] \Delta z / 24 \} \end{aligned} \quad (6)$$

$$P^{\pm}(z_1, \nu) = P^{\pm}(z_0, \nu) \exp[C(z_0, \nu) \Delta z] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P^{\pm}(z_2, \nu) = & P^{\pm}(z_1, \nu) \exp\{ [3 C(z_1, \nu) - \\ & C(z_0, \nu)] \Delta z / 2 \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P^{\pm}(z_3, \nu) = & P^{\pm}(z_2, \nu) \exp\{ [23 C(z_2, \nu) - \\ & 16 C(z_1, \nu) + 5 C(z_0, \nu)] \Delta z / 12 \} \end{aligned} \quad (9)$$

1.2 多泵浦 FRA 信号合成拉曼增益的表示

由于系统中存在前向信号和后向泵浦,初始条件分别在光纤的两端,单向迭代无法完成数值计算,因此利用上述数学模型首先得到多个泵浦波在放大器内的传输功率^[9],然后利用得到的泵浦功率来计算

多泵浦 FRA 中信号的开关拉曼增益。信号开关增益指泵浦开和关时的信号功率比,多泵浦作用下的拉曼增益可以表示为每个泵浦源对信号的拉曼增益之和:

$$G = \sum_i G_i \quad (10)$$

$$G_i = 10 \lg \frac{P_{i,\text{out}}}{P_{\text{out}}} \quad (11)$$

式中 i 为第 i 个泵浦波的作用; G_i 为泵浦波 i 产生的拉曼增益; $P_{i,\text{out}}$ 为泵浦波 i 作用下信号的输出功率; P_{out} 为无泵浦作用下信号的输出功率。

图 1 是利用上述方法得到的 5 个泵浦分别作用下多路信号的拉曼增益曲线,输入参数(光纤类型、长度、泵浦波长分布和功率等)与参考文献[6]相同。图 2 是相同条件下考虑泵浦间相互作用和不考虑泵浦间相互作用信号拉曼增益曲线的比较。可以看出,由于泵浦之间存在 SRS 作用,长波长泵浦光从短波长泵浦光处获得能量,使得长波长信号区拉曼增益明显增大。因此在数值计算过程中,必须考虑泵浦光和泵浦光之间的作用。本文同参考文献[6]有着非常相近的仿真结果,说明了该简化模型的有效性。

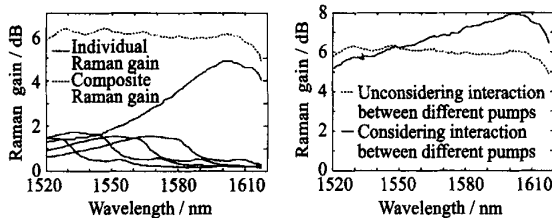


图 1 5 个泵浦分别作用下的合成拉曼增益

Fig. 1 Composite Raman gain pumped by five pumps respectively

图 2 泵浦间相互作用对拉曼增益的影响

Fig. 2 Influence of interaction between different pumps on Raman gain

2 多泵浦 FRA 增益特性的分析

虽然目前市场上已出现了输出功率可达 200~300 mW 的高功率半导体激光器,但为了得到 DWDM 系统中多路信号较宽波长范围内的平坦增益,仍需要多个激光泵浦源偏振复用来提供足够的光功率。同时由于 SRS 过程复杂,存在泵浦和泵浦、泵浦和信号、信号和信号之间的相互作用,因此恰当地选择泵浦光源的个数、功率和波长是实现多泵浦拉曼放大器超宽带增益平坦的关键。

文中以多个泵浦光源对 100 路信号放大为例,利

用上述多泵浦 FRA 数学简化模型,分析了泵浦波个数、功率选择和波长分布对合成拉曼增益性能的影响。实验中光纤为色散移位光纤(DSF),放大器传输距离为 25 km,根据 ITU-T 标准,100 路光信号中心频率从 1520 nm 开始每间隔 120 GHz 取一路,前向输入功率均为 0.5 mW。

2.1 泵浦源个数对拉曼增益的影响

泵浦源放置个数对多路信号放大作用的影响可以通过对不同泵浦源个数作用下拉曼增益曲线的比较得到。图 3 中的两条曲线分别代表 5 个泵浦波(1420, 1435, 1450, 1465, 1495 nm)和 3 个泵浦波(1420, 1450, 1495 nm)作用下的拉曼增益,可以看出,在达到相同的平均拉曼增益值时,较多泵浦个数能实现更好的多路信号的平坦增益。也可以看出,恰当安排多泵浦波长和功率分布后,泵浦波个数越多, DWDM 信号的拉曼增益曲线的波动越小。当然,这并不意味着无限制地增加泵浦数目,选择合适的泵浦个数可以有效地节省系统成本,得到满意的多路信号放大效果。

2.2 泵浦波功率对拉曼增益的影响

图 4 中 12 个泵浦波频率分别为 212.2, 211.1, 210.2, 209.2, 208.2, 207.3, 206.2, 205.3, 204.2, 203.3, 200.1, 199.3 THz,总输入泵浦功率为 637 mW,虚线表示的泵浦波输入功率均相同,实线表示的泵浦波输入功率和波长分布如图 5 所示。从图中可以看出,合理配置泵浦光的波长和输入功率,能实现 100 路信号很好的增益平坦,在 C+L 波段(1527~1607 nm),偏离度可达到 ± 0.1 dB。

从图中还可以看出,由于泵浦与泵浦间存在 SRS 作用,泵浦波能量会从短波长泵浦转移到长波长泵浦,同时信号波与信号波之间也会由于 SRS 作

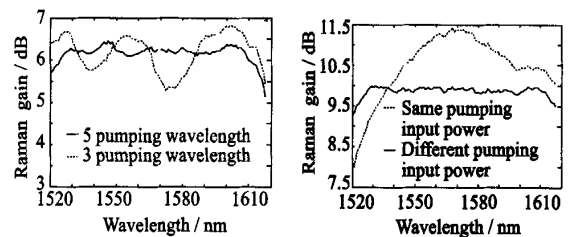


图 3 不同个数泵浦源作用下拉曼增益比较

Fig. 3 Comparison of Raman gain at different pumping numbers

图 4 多泵浦波不同功率分布的拉曼增益比较

Fig. 4 Comparison of Raman gain at different pumping powers

用产生能量传递,因此为了实现多路信号平坦的增益谱,需要在短波长区设置更大的泵浦光功率。

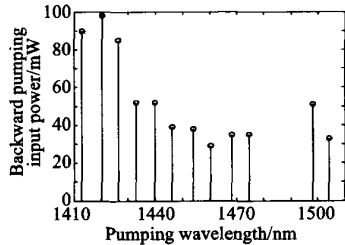


图5 12个泵浦的波长和输入功率分布

Fig. 5 Wavelength and power distribution of 12 pumps

2.3 泵浦波长对拉曼增益的影响

在泵浦波个数和输入功率相同的情况下,12个泵浦波的不同分布对拉曼增益的影响不同,如图6所示,实线表示12个泵浦波长,虚线表示12个泵浦波长在该波长范围内等间隔分布。从图中可以看到,与等间隔分布相比,泵浦波长的不等间隔分布能使多路信号放大后增益平坦度得到极大改善。图7给出的拉曼增益曲线是在泵浦波长等间隔分布时调整泵浦功率得到的,虽然也实现了很好的平坦度,但平坦带宽明显减小。因此多泵浦波长选取时应遵循一定的原则,由参考文献[5]中拉曼增益谱线看出,单一泵浦波长可以产生约20 nm的平坦拉曼增益,泵浦波长和增益谱峰值相距约13.2 THz。根据图1所示合成拉曼增益计算方法,各波长产生的拉曼增益峰值的位置需要相互均衡才能实现平坦的叠加效果。

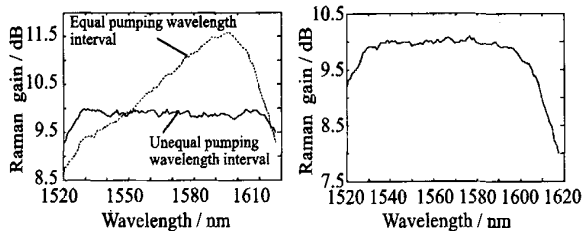


图6 多泵浦波不同波长分布的拉曼增益比较

Fig. 6 Comparison of Raman gain at different pumping wavelength distribution

图7 泵浦波长等间隔分布时最佳拉曼增益

Fig. 7 Optimal Raman gain at equal pumping wavelength interval

3 结论

FRA 具有全波段可放大和增益谱较宽的优点,

多泵浦 FRA 更可以通过合理配置实现超宽带平坦的拉曼增益。本文为多泵浦 FRA 在 DWDM 通信系统中的应用提供了有用的分析模型,提出对多泵浦 FRA 进行数学建模的简单有效的算法,得出合成拉曼增益的计算方法,并利用该模型分析了合成拉曼增益特性。研究表明,根据拉曼增益谱线的特点和泵浦与泵浦、泵浦与信号、信号与信号之间的 SRS 作用,多泵浦波的个数、输入功率和频率间隔的适当搭配可以实现 DWDM 系统多路信号功率非常好的增益平坦度。

参考文献:

- [1] Emori Y, Tanaka K, Namiki S. 100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength-channel WDM laser diode unit [J]. *Electro Lett*, 1999, 35 (16): 1355-1356.
- [2] Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M, et al. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11 (5): 530-532.
- [3] Fludger C, Maroney A, Jolley N. An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers[A]. *Optical Fiber Communication Conference*[C]. Baltimore, 2000, 4. 100-102.
- [4] Shu Namiki. Recent advances in Raman amplifiers[A]. *Optical Communication*, 2001, ECOC'01. 27th European Conference[C]. Netherlands, 2001, 5. 162-180.
- [5] Govind P Agrawal. *Nonlinear fiber optics*[M]. 3rd edition. New York: Academic Press, 2001. 299-300.
- [6] Shu Namiki, Yoshihiro Emon. Ultrabroad-band amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes[J]. *IEEE Journal on Select Topics Quantum Electron*, 2001, 7 (1): 3-16.
- [7] Xueming Liu, Hanyi Zhang, Yili Guo. A novel method for Raman amplifier propagation equations[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15 (3): 392-394.
- [8] Bumki Min, WonJae Lee, Namkyoo Park. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12 (11): 1486-1488.
- [9] Xiang Zhou, Chao Lu, Ping Shum, et al. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13 (9): 945-947.