

文章编号: 1001-3806(2004)03-0333-04

## 多泵浦喇曼放大器简化模型设计及泵浦优化

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, 济南 250100)

**摘要:** 对多泵浦光纤喇曼放大器(FRA)功率传输方程进行了合理简化,得到密集波分复用系统(DWDM)信号合成喇曼增益的数学模型,分析了受激喇曼散射(SRS)对信号喇曼增益的影响。并在该简化模型基础上介绍了一种对泵浦波长分布和输入功率进行优化计算的方法,实现了超宽带平坦的喇曼增益谱,为多泵浦FRA在DWDM系统中的应用提供了有价值的参考。

**关键词:** 多泵浦光纤喇曼放大器;受激喇曼散射;合成喇曼增益;后向泵浦;泵浦优化  
**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

### Simplified model design and pump optimization of multi-pumped fiber Raman amplifiers

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 amplifiers (FRA) are reasonably simplified, a mathematical model of composite Raman gain of multi-signals in dense wavelength division multiplexed system (DWDM) amplified by multi-pumped FRA is built, and the influence of stimulated Raman scattering (SRS) on Raman gain is analyzed. Based on such a simple and effective model, an algorithm to optimize pump wavelength distribution and input power is introduced and the ultra broad and flat Raman gain spectra are implemented. All the simulation and analyses supply 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; pump optimization

## 引言

与掺铒光纤放大器(EDFA)相比,光纤喇曼放大器(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喇曼放大器<sup>[1]</sup>,更以利用多个泵浦光来实现增益谱的宽带和平坦而备受关注。同时,随着密集波分复用(DWDM)技术越来越广泛地应用到通信系统中,系统的复杂性在不断地增加,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,并将其运用于DWDM通信系统的仿真研

究成为必要。本文中主要研究多泵浦FRA的建模方法,合理简化功率传输方程并利用有效的数值计算方法构造出数学模型,考虑了不同信号间的受激喇曼散射(SRS)作用,得到DWDM系统多路信号的合成喇曼增益;然后分析多泵浦光源个数、波长和功率对多路信号增益曲线的影响,经过泵浦优化,实现了超宽带平坦的喇曼增益谱。

## 1 多泵浦FRA简化模型

### 1.1 多泵浦FRA功率传输方程的简化

多泵浦FRA的放大原理是受激喇曼散射,功率传输方程表示为<sup>[2]</sup>:

$$\frac{dP^{\pm}(z, \nu)}{dz} = \mp \alpha(\nu) P^{\pm}(z, \nu) \pm \gamma(\nu) P^{\pm}(z, \nu) \pm P^{\pm}(z, \nu) \sum_{\xi > \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} [P^{\pm}(z, \xi) + P^{\mp}(z, \xi)] \pm h\nu \sum_{\xi > \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{\text{eff}}(\xi)} [P^{\pm}(z, \xi) + P^{\mp}(z, \xi)] \times$$

作者简介:凌洁(1979-),女,硕士研究生,主要从事光通信系统和计算机仿真方面的研究。

E-mail: lingjie@mail.sdu.edu.cn

收稿日期:2003-07-15;收到修改稿日期:2003-09-09

$$\left[ 1 + \frac{1}{e^{h(\xi-\nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \mp P^\pm(z, \nu) \cdot \sum_{\xi < \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} \cdot [P^\pm(z, \xi) + P^\mp(z, \xi)] \mp 2h\nu P^\pm(z, \nu) \cdot \sum_{\xi < \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{\text{eff}}(\xi)} \left[ 1 + \frac{1}{e^{h(\xi-\nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \quad (1)$$

$P^+$ 和 $P^-$ 分别代表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, $\alpha$ 为光纤衰减系数, $\gamma$ 为瑞利后向散射系数, $g_R(\nu - \xi)$ 是频率分量 $\nu$ 和 $\xi$ 之间的喇曼增益系数, $A_{\text{eff}}$ 是光纤有效面积, $K_{\text{eff}}$ 是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6项,依次为:光纤衰减,瑞利后向散射,泵浦和泵浦、泵浦和信号、信号和信号之间的喇曼效应,放大器自发辐射噪声(ASE),由于喇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,(1)式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方程进行了有效地简化。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,(1)式简化为:

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

$$C(z, \nu) = \sum_{\xi > \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} \cdot P^\pm(z, \xi) - \sum_{\xi < \nu} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}(\xi)} \cdot P^\pm(z, \xi) - \alpha(\nu) \quad (3)$$

在简化(2)式和(3)式的基础上,可以实现多泵浦FRA中信号功率的数值计算。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(4)式所

示,这样,循环迭代得到的最后1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:

$$P^\pm(z_{j+1}, \nu) = P^\pm(z_j, \nu) \exp\{ [55 \cdot C(z_j, \nu) - 59 \cdot C(z_{j-1}, \nu) + 37 \cdot C(z_{j-2}, \nu) - 9 \cdot C(z_{j-3}, \nu)] \cdot \Delta z / 24 \} \quad (4)$$

$$P^\pm(z_1, \nu) = P^\pm(z_0, \nu) \exp[ C(z_0, \nu) \cdot \Delta z ] \quad (5)$$

$$P^\pm(z_2, \nu) = P^\pm(z_1, \nu) \exp\{ [3 \cdot C(z_1, \nu) - C(z_0, \nu)] \cdot \Delta z / 2 \} \quad (6)$$

$$P^\pm(z_3, \nu) = P^\pm(z_2, \nu) \exp\{ [23 \cdot C(z_2, \nu) - 16 \cdot C(z_1, \nu) + 5 \cdot C(z_0, \nu)] \cdot \Delta z / 12 \} \quad (7)$$

## 1.2 SRS对信号合成喇曼增益的影响

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中信号的开关喇曼增益。信号开关增益定义为泵浦开和关时的信号功率对数比,多泵浦作用下的合成喇曼增益可以表示为每个泵浦源对信号的喇曼增益之和:

$$G = \sum_i \text{Olg} \frac{P_{i,\text{out}}}{P_{\text{out}}} \quad (8)$$

$i$ 代表第 $i$ 个泵浦波的作用, $P_{i,\text{out}}$ 表示泵浦波 $i$ 作用下信号的输出功率, $P_{\text{out}}$ 表示无泵浦作用下信号的输出功率。

图1中是利用上述方法得到的5个泵浦分别作用下多路信号的喇曼增益曲线,输入参数(光纤类

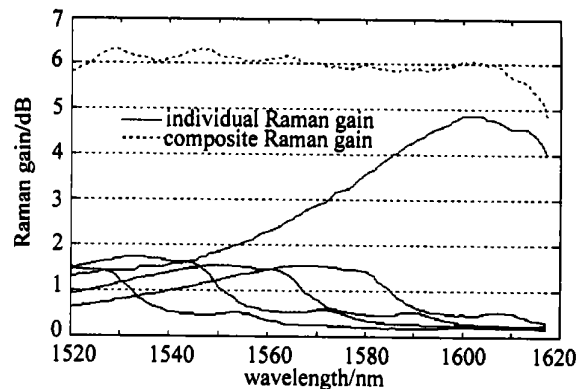


Fig. 1 Composite Raman gain pumped by five pumps respectively

型、长度、泵浦波长分布和功率等)与文献 $^{[6]}$ 中的相同。图2中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喇曼增益曲线的比较。可见,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,使得长波长信号区喇曼增益明显增大。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。同时,与NAMIKI

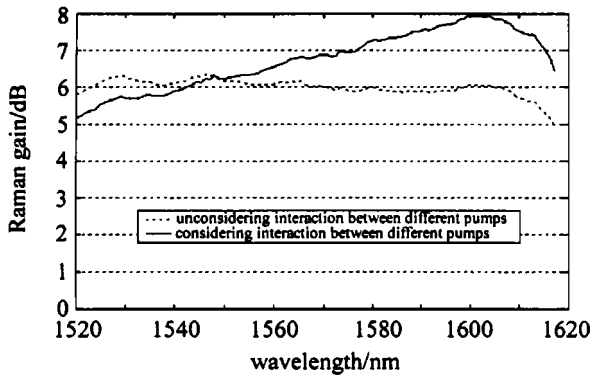


Fig. 2 Influence of interaction between different pumps

等人<sup>[6]</sup>的仿真结果非常相近,说明了该简化模型的有效性。

当对较宽波长范围内多路信号进行放大时,信号与信号间的 SRS 作用也是不能忽略的。图 3 中给出了 12 个泵浦作用下 1520nm~1620nm 波长范围内 100 路信号喇曼增益曲线,可以看出,不考虑信号间相互作用时长波长区信号的喇曼增益明显小于考虑信号相互作用时的喇曼增益,这说明和泵浦波长一样,短波长信号也会对长波长信号传递能量,同时损耗自身能量。因此,在对多泵浦 FRA 建模时,必须考虑泵浦与泵浦,泵浦与信号,信号与信号间的相互作用。

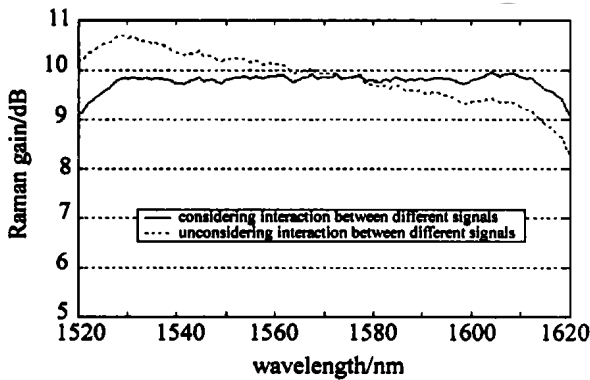


Fig. 3 Influence of interaction between different signals

## 2 多泵浦 FRA 优化设计

多信道喇曼增益平坦度与多泵浦喇曼放大器泵浦源个数、输入功率和波长分布有密切的关系,因此,为了实现超宽带平坦的喇曼增益,必须对泵浦信号初始参数进行合理配置,这需要遵循一定的优化算法。基于上文中给出的多泵浦 FRA 简化模型,介绍了一种实现平坦喇曼增益的优化算法,并给出了计算结果。

在进行优化计算之前,首先需要确定泵浦的个数、泵浦波长和输入功率值选取的范围,假定所有泵

浦的功率和波长均在该范围内取值。 $G, L, M, N, G_n$  分别表示预期平坦喇曼增益值,光纤长度,泵浦个数,信号个数和第  $n$  路信号的喇曼增益,由 (2) 式可知,  $G_n$  是泵浦频率  $\vec{f}(f_1, f_2, \dots, f_M)$ , 泵浦输入功率  $\vec{P}(P_1(L), P_2(L), \dots, P_M(L))$  和波长小于该信号波长的信号频率  $\vec{f}'(f'_1, f'_2, \dots, f'_{n-1})$ , 信号输入功率  $\vec{P}'(P'_1(L), P'_2(L), \dots, P'_{n-1}(L))$  的函数,由于信号频率和输入功率是确知的,则多信号喇曼增益波动  $E_R$  可以表示成  $\vec{f}$  和  $\vec{P}$  的函数<sup>[9]</sup>:

$$E_R(\vec{f}, \vec{P}) = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |G - G_n(\vec{f}, \vec{P})|^2} \quad (9)$$

$E_R$  取值越小,全局喇曼增益平坦性越好,具体实现步骤如下:(1)在确定的泵浦波长和输入功率范围内随机选取足够多的  $m$  个样本  $(\vec{f}, \vec{P})$  作为泵浦参数输入;(2)利用上面提供的功率计算方法分别对  $m$  个样本计算多信号喇曼增益,得到  $m$  个  $E_R(\vec{f}, \vec{P})$  值,取出其中  $k$  个  $E_R$  最小的样本;(3)任意选取  $k$  个样本中的两个,分别对波长和功率值取数学平均,得到  $k(k+1)/2$  新的样本;(4)对新的样本重复利用上述方法进行计算,直到相邻两次计算得到的  $E_R$  最小值之差小于某一阈值,则一次优化计算结束。

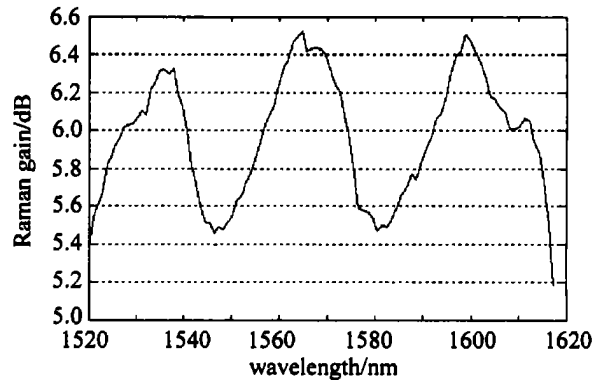


Fig. 4 The optimal Raman gain pumped by 3 wavelengths

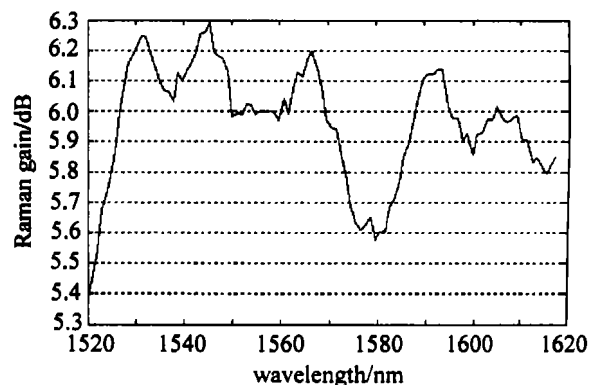


Fig. 5 The optimal Raman gain pumped by 5 wavelengths

图 4 和图 5 是根据该优化算法实现的不同个数泵

浦作用下的  $C+L$  波段(1527nm~1607nm)最佳平坦喇曼增益,泵浦波长选择范围为 1400nm~1500nm,输入功率在 300mW 以内。图 4 中 3 个泵浦波长分别为 1427.8nm,1456.9nm,1494.1nm,输入功率为 146.24mW,93.776mW,99.366mW。图 5 中 5 个泵浦波长依次为 1421.2nm,1434.5nm,1452.4nm,1472.5nm,1499.2nm,输入功率 73.924mW,80.398mW,70.991mW,36.068mW,79.243mW。

比较两图可以看出,5 个泵浦实现了比 3 个泵浦更好的信号平坦喇曼增益谱,同时也可以更加清楚地得到泵浦波长和功率设置的基本原则。由文献 [5] 中喇曼增益谱线看出,单一泵浦波长可以产生约 20nm 的平坦喇曼增益,泵浦频率和增益谱峰值相距约 13.2THz。根据图 1 所示合成喇曼增益计算方法,泵浦波长的恰当分布,可以使产生的喇曼增益峰值的位置相互均衡以实现平坦的叠加效果。同时由于泵浦与泵浦、信号与信号之间也会由于 SRS 作用产生能量传递,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。

### 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喇曼增益。利用多步平均功率法对多泵浦 FRA 简化功率方程进行数值计算,全面考虑了泵浦与泵浦,泵浦与信号,信号与信号间的相互作用,得到在 DWDM 通信系统中应用的多泵浦 FRA 的数学模型,并利用该模型分析了实现宽带平坦喇曼增益的泵浦

优化算法。分析结果表明,泵浦与泵浦、信号与信号之间的 SRS 作用对信号喇曼增益谱平坦性有非常大的影响,通过多泵浦波的个数、输入功率和频率间隔的适当搭配,可以实现 DWDM 系统多路信号超宽带平坦喇曼增益谱。

### 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]. *Electron Lett*, 1999, 35(16): 1355~1356.
- [2] KIDORF H, ROTTWITT K, NISSOV M *et al.* Pump interactions in a 100nm 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 [J]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, 4: 100~102.
- [4] NAMIKI S. Recent advances in Raman amplifiers [J]. *Opt Commun*, 2001, 5: 162~181.
- [5] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 3rd edition, New York: Academic Press, 2001. 299~300.
- [6] NAMIKI S, EMON Y. 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] LIU X M, ZHANG H Y, GUO Y L. A novel method for Raman amplifier propagation equations [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(3): 392~394.
- [8] MIN B, LEE W J, PARK N Y. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(11): 1486~1488.
- [9] ZHOU X, LU Ch, SHUM P *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.

(上接第 332 页)

菲涅耳数,由图中曲线得到:当  $F=0.230$ ,  $\delta(F)=0.11975$ (实线),  $F=0.216$ ,  $\delta(F)=0.11972$ (虚线),综合考虑实线和虚线的误差,可用二者平均值,即将  $F=0.223$  作为菲涅耳和夫琅和费衍射的判断标准,当  $F \leq 0.223$  是夫琅和费衍射,  $F > 0.223$  是菲涅耳衍射。

### 3 小结

使用标量衍射理论对均匀平面波通过两个非对称矩孔的衍射作了详细研究,采用在夫琅和费和非涅耳衍射的交界区 ( $F < 0.5$ ) 用轴上和轴外最大光强相对误差 12% 来区分两类衍射的方法,得到当  $F \leq 0.223$  是夫琅和费衍射,  $F > 0.223$  是菲涅耳衍

射的结论。这一方法更为直观,且物理图像清晰。所得结果与 GARCIA-SUCERQUIA 等<sup>[4]</sup>用菲涅耳波带法对两圆孔衍射研究结果一致。

### 参考文献

- [1] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. 5th ed, Oxford: Pergamon Press, 1993. 412~514.
- [2] 卢亚雄,吕百达. *矩阵光学* [M]. 大连:大连理工大学出版社, 1989. 55.
- [3] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. Mill Valley, CA: University Science Books, 1986. 634, 668.
- [4] GARCIA-SUCERQUIA J I, CASTANEDA R, MEDINA F F *et al.* Distinguishing between Fraunhofer and Fresnel diffraction by the Young's experiment [J]. *Opt Commun*, 2001, 200: 15~22.
- [5] GARCIA-SUCERQUIA J I, CASTANEDA R, MEDINA F F. Fresnel-Fraunhofer diffraction and spatial coherence [J]. *Opt Commun*, 2002, 205: 239~245.