

文章编号: 0253-2239(2003)07-0819-4

# 用简化模型实现多波抽运拉曼光纤放大器的 优化设计\*

何敬锁<sup>1,2</sup> 郭同文<sup>1</sup> 雷波<sup>1</sup> 顾婉仪<sup>1</sup> 徐大雄<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)  
(<sup>2</sup> 首都师范大学物理系, 北京 100037)

**摘要:** 提出了一种优化设计多波抽运拉曼光纤放大器的方法。在不影响系统性能的前提下采用了合理的简化算法以减少运算时间,能够在给定信号光频宽和抽运个数等参量要求下得到符合增益平坦度性能要求的抽运功率和波长的优化配置结果。

**关键词:** 拉曼光纤放大器; 抽运配置; 优化设计; 增益特性

中图分类号: TN723.3 文献标识码: A

## 1 引 言

随着宽带光网络的飞速发展,原有的掺铒光纤放大器(EDFA)放大手段已不能满足对带宽的需求,具有宽带增益、低噪声等优良性能的拉曼光纤放大器(FRA)日益受到关注<sup>[1,2]</sup>。其中,分布式、反向、多波抽运拉曼光纤放大器尤其具有许多优良的性能:采用传输光纤直接作为放大介质,可以简化设计并降低工程成本;多波抽运方式,适当选择抽运光的波长和功率,可以实现对任意波段的平坦放大,对扩展波分复用(WDM)的带宽具有重要意义;分布式放大可以使信号光的功率在沿光纤传输过程中被放大,减少非线性效应的产生,从而降低噪声指数;由于拉曼放大是瞬时产生,采用正向抽运很容易使抽运光的功率扰动耦合进信号光,使信号光的相对强度噪声(Relative intensity noises,简称 RIN)增大。而采用反向抽运方式,会将抽运的这种扰动平均,使信号光不受其影响。

现行光纤放大器的设计工作多集中在如何建立精确的数学模型,可以在给定抽运数量、波长分布、光纤类型等参量的条件下计算出增益以及平坦度等结果<sup>[3~5]</sup>。但是人们更为关心的是如何配置各种参量尤其是抽运功率和波长才能达到预期的性能要求,使拉曼光纤放大器的设计更接近实际的应用要

求。现在多采用人工根据工作经验进行抽运的配置,但是由于抽运与抽运、信号光与抽运光之间的受激拉曼作用以及拉曼增益系数与抽运波长有关等诸多因素的影响会造成工作异常复杂<sup>[6,7]</sup>,尤其是在进行多波抽运、宽带放大器设计时复杂性更显突出。近期这方面的工作开始受到人们的关注<sup>[8]</sup>。

本文提出的优化设计多波抽运拉曼光纤放大器的方法,采用了合理的简化手段,既能减少运算量,又保证了结果的可靠性,可以在给定信号光频宽和抽运个数等参量要求下得到符合增益平坦度性能要求的抽运优化配置结果,弥补了一般拉曼光纤放大器设计软件只能计算增益而不能求抽运配置的缺陷。为了验证方法的可靠性,在拉曼增益起伏在 1 dB 内的条件下,用该模型分别研究了 C 波段抽运数目为 1、2 时以及 C+L 波段 4 个抽运的配置情况,通过 15 min 和 3 h 的计算,得到了满足设计要求的抽运配置结果。并将抽运配置结果与文献和其他的模拟软件进行了对比分析,结果令人满意,证明此方法可为多波抽运拉曼光纤放大器的设计提供快捷、可靠的抽运波长和功率配置结果。

## 2 理论分析

### 2.1 抽运波长、功率配置对增益的影响

多波抽运拉曼光纤放大器的增益特性与抽运波长、功率配置之间存在以下关系,这些关系直接影响到增益值和增益平坦度的具体结果。

首先,拉曼光纤放大器利用硅光纤中的内在属

\* 国家 863 计划和国家自然科学基金(90104003)资助课题。

E-mail: hejingsuo@263.net

收稿日期:2002-06-17; 收到修改稿日期:2002-08-02

性来进行信号的放大。对于单个抽运来说,拉曼增益系数与抽运和信号光之间的频移有关。图 1 是归一化的拉曼增益系数与频移之间的关系曲线,可以看出,当抽运频率超过信号频率约 13.2 THz (100 nm) 时有最大拉曼增益,然后在两侧降低。因此,在多波抽运拉曼光纤放大器中,每个抽运都会对应一个能够获得最大增益的信号光,然后对其他信号光根据频移的大小产生不同的放大,叠加结果造成增益的起伏变化。

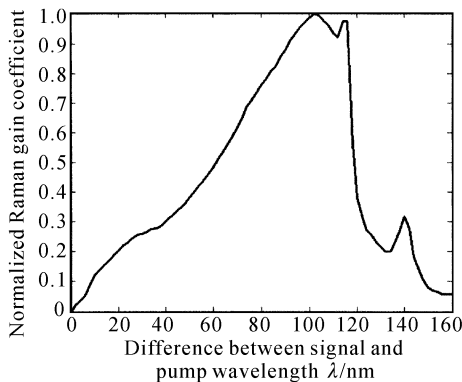


Fig.1 Relation between Raman gain coefficient and difference of wavelength between pump and signal

另外,经过研究,发现不同抽运的拉曼增益曲线形状是相似的,但增益峰值不同,满足波长反比定律。对同一个信号光来说,即使功率相同,波长不同的抽运造成的增益有着强弱区别,即长波长的抽运对信号光的放大要比短波长抽运弱,很明显也会形成增益的不均匀分布。具体用下式表示:

$$g_i(\Delta\lambda) = g_0(\Delta\lambda) \cdot (\lambda_0/\lambda_i), \quad (1)$$

(1) 式中  $g_i(\Delta\lambda)$ 、 $g_0(\Delta\lambda)$  为抽运波长分别为  $\lambda_i$  和  $\lambda_0$ , 并与信号波长相差相同均为  $\Delta\lambda$  时的拉曼增益系数,可以看出拉曼增益系数  $g$  和抽运波长  $\lambda$  之间存在反比关系。其次,对增益平坦度存在影响的另一个重要因素来源于抽运之间的拉曼增益作用,即短波长抽运对长波长抽运会产生拉曼放大;同样,短波长信号光也会对长波长信号光产生同样的作用。这是由于拉曼散射的作用使能量由短波长向长波长传递造成光功率的重新分配。

## 2.2 所用模型

本模型的基本思路是通过筛选的方法找到符合条件的抽运波长以及对应功率。在计算模型中,初始参量包括:信号光的范围 ( $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$ ) 以及功率  $P_{s0}$ , 信道数目  $n$ , 所需抽运数量  $m$ , 抽运入纤功率矩阵  $\{P_{p\min} \sim P_{p\max}\}$ 。然后根据拉曼散射的特点,由信号波长确定抽运波长的可选矩阵  $\{(\lambda_{\min} - 110 \text{ nm}) \sim$

$(\lambda_{\max} - 90 \text{ nm})\}$ 。从抽运波长和功率矩阵中选择  $m$  个组合带入模型,在计算出的增益结果中再进一步选择符合条件的配置。为了减小运算时间,除采取优化筛选算法外,还对模型进行合理的简化,例如,在  $m$  个抽运中,如果波长位于中心波长的同侧则不必进行筛选运算,符合理论分析。抽运功率的间隔大小也会对时间造成影响。在光纤中,反向传播的抽运光和正向信号光功率沿光纤传输的变化可以用下式表示:

$$\frac{dP_{p\nu}}{dz} = aP_{p\nu} - P_{p\nu} \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu,\nu}}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_{p\mu} + P_{p\nu} \sum_{\mu < \nu} \frac{\nu}{\mu} \frac{g_{\nu,\mu}}{2A_{\text{eff}}} P_{p\mu}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{s\nu}}{dz} = -aP_{s\nu} + P_{s\nu} \sum_{i=1} \frac{g_{i\nu}}{2A_{\text{eff}}} P_{p\mu}, \quad (3)$$

其中  $\mu$ 、 $\nu$  表示光波频率,  $P_{p\nu}$  和  $P_{s\nu}$  分别表示频率  $\nu$  极小范围内的抽运和信号光功率,  $P_{p\mu}$  为在频率  $\mu$  附近的抽运光,  $a$  表示光纤的衰减系数,  $A_{\text{eff}}$  表示光纤在频率  $\nu$  的有效面积,  $g_{\mu\nu}$  表示低频光  $\nu$  由于高频光  $\mu$  的作用而产生的拉曼增益参量。

从模型中可以看出,抽运光之间的相互作用得到考虑,而由于信号光的功率相对较弱,对其他信号光和抽运光的影响较小因此可以进行简化。另外,考虑到本模型的主要目的是要得到符合增益平坦度要求的抽运配置结果,并且舍去自发拉曼散射和瑞利散射等噪声项,因为这些噪声不会影响放大器的整体增益谱线的形状<sup>[8]</sup>。

## 3 计算结果与分析

采用的反向拉曼光纤放大器的构成如图 2 所示:所用光纤为 15 km 单模光纤,抽运光反向注入与信号光传输方向相反。信号光得到均匀放大由右端输出,增益及增益平坦度由抽运波长和功率以及数量决定。

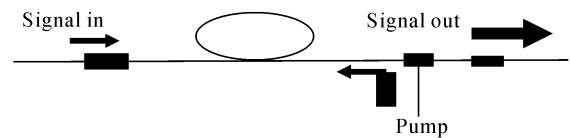


Fig.2 Configuration of backward pumped distributed Raman fiber amplifier

### 3.1 抽运之间的影响

为了验证所用模型的正确性研究了抽运之间存在的影 响,将波长分别为 1495 nm、1465 nm、1450 nm、1435 nm、1420 nm,功率为 100 mW 的 5 个抽运同时反向注入光纤,得到功率沿光纤的变化

关系如图 3 所示。可以看出：由于受激拉曼作用的影响，波长最长的抽运光获得放大，而波长最短的抽运光由于能量向长波长光的传递迅速衰减。结果与文献[7]报道一致。

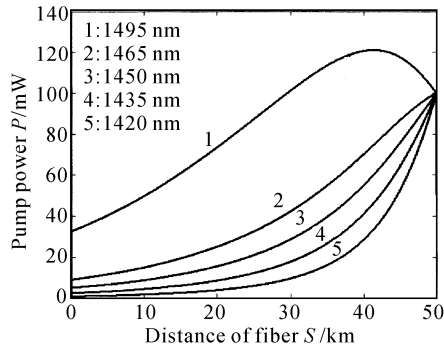


Fig. 3 Simulated evolution of pump power along fiber

### 3.2 C 波段拉曼光纤放大器的优化设计

一般的拉曼光纤放大器设计软件，如本文用于比较的 Optiwave 公司的放大器仿真工具，能在给定抽运条件下得到拉曼增益等结果，但不能解决人们更为关心的抽运如何配置才符合增益要求的问题。而本文提出的方法恰能解决此类问题。为验证本方法的实用性。在将增益平坦控制在 1 dB 以内的条件下，分别计算并得到了抽运数量为 1、2 时的抽运设计结果。发现抽运数量为 1 个时，抽运优化结果为波长 1445 nm、功率 500 mW。图 4 是采用此单抽运配置得到的拉曼增益曲线。图 5 为采用 Optiwave 公司的放大器设计软件计算的 C 波段抽运波长分别为 1445 nm(实线)、1450 nm(圆圈)、1455 nm(三角)、1460 nm(方块)，抽运功率均为 500 mW 时拉曼增益的比较结果，可见确实采用 1445 nm 抽运得到的增益最平坦。图 6 是两个抽运的结果，抽运波长在 1445 nm、1450 nm，功率为 (400 mW, 350 mW) (圆点) 或 (400 mW, 400 mW) (叉点) 时符合增益的要求，同样，为了比较结果的可靠性，用 Optiwave 公

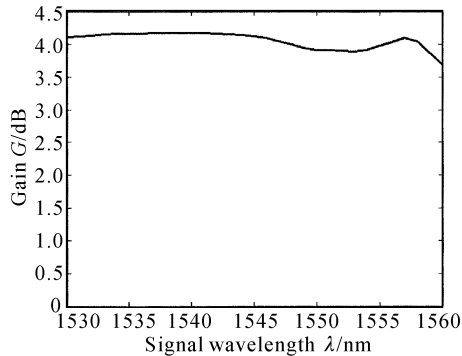


Fig. 4 Simulated gain spectrum of C-band and single pump FRA with optimal pump scheme

司的放大器设计软件进行其他波长配置的比较计算，在功率均为 400 mW 情况下， $\lambda_{p1}$  固定为 1445 nm， $\lambda_{p2}$  发生变化，分别为 1450 nm(实线)、1455 nm(虚线)、1460 nm(圆圈)和 1465 nm(三角)。结果如图 7 所示，证明了  $\lambda_{p1} = 1445$  nm， $\lambda_{p2} = 1450$  nm 的配置结果确实最佳。

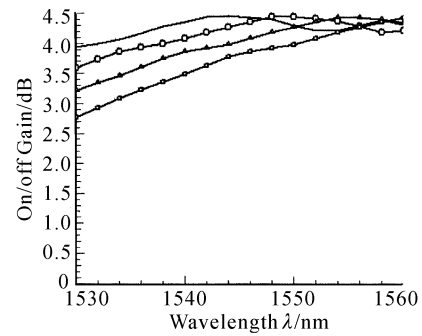


Fig. 5 Gain profile of other simulator with our optimal single pump result and other pump scheme in C-band

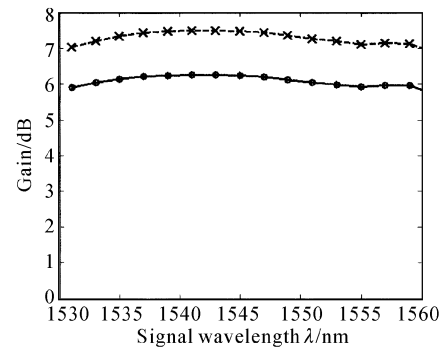


Fig. 6 Simulated Raman gain with optimal dual pump scheme result in C-band

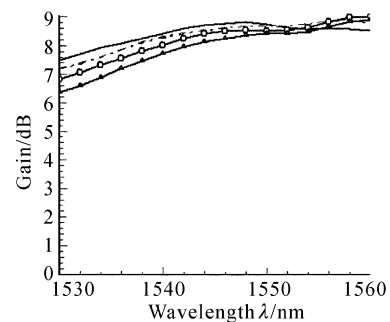


Fig. 7 Gain profile of other simulator with our optimal dual pump result and other pump scheme in C-band

### 3.3 C+L 波段多波抽运拉曼光纤放大器的优化设计

本方法的最大作用是为设计复杂的宽带多波抽运拉曼光纤放大器提供抽运配置参考，因此我们计算了信号光范围在 1530~1620 nm，抽运数量为 4

的优化配置结果,经过三个小时的运算,得到符合增益平坦度在 1 dB 内的 3 个抽运配置结果如图 8 所示,抽运波长分别为(1425 nm、1440 nm、1470 nm、1515 nm),对应功率分别为(400 mW、500 mW、500 mW、400 mW),曲线用“○”标注;抽运波长分别为(1425 nm、1440 nm、1455 nm、1500 nm),对应功率(500 mW、200 mW、500 mW、500 mW),曲线用“+”标注;还有抽运波长分别为(1425 nm、1440 nm、1455 nm、1500 nm),对应功率分别为(400 mW、200 mW、400 mW、500 mW),曲线用“×”表示。

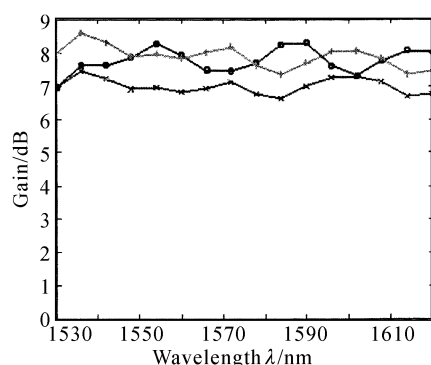


Fig. 8 Simulated Raman gain with optimal pump scheme in C+L-band, the number of pump is 4

**结论** 本方法以保证结果正确可靠为前提,通过合理简化缩短计算时间,实现了复杂的多波抽运拉曼光纤放大器的抽运功率和波长的优化配置,省却了复杂的人工配置过程。通过实际计算 C 波段和 C+L 波段的拉曼光纤放大器的配置,得到了增益平坦

度在 1 dB 以内的结果,并同其他模型进行了比较,证实了结果的可靠性,可以为波分复用系统中设计宽带多波抽运拉曼光纤放大器提供快捷可靠的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Namiki S, Emori Y. Recent advances in ultra-wideband Raman amplifiers. in *Proc. OFC 2000*, Baltimore, MD, 2000, FF1. 98~99
- 2 Masuda H. Review of wideband hybrid amplifiers. in *Proc. OFC 2000*, Baltimore, MD, 2000, TuA1. 2~4
- 3 Wang S, Fan C. Generalised attenuation coefficients and a novel simulation model for Raman fibre amplifiers. *IEE Pro. Optoelectron.*, 2001, **148**(3):156~159
- 4 Zhou Xiang, Chao Lu, Ping Shum *et al.*. A simplified model and optimal design of a mutliwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9):945~947
- 5 Yan Minhui, Chen Jianping, Jiong Wenning *et al.*. Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifier backward-pumped with multiple laser diode pumps. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9):948~950
- 6 Howard Kidorf, Karsten Rottwitt, Morten Nissov *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 530~532
- 7 Shu Namiki, Yoshihiro Emori. 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
- 8 Perlin V E, Herbert G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2):250~254
- 9 Chen Jian, Zhang Wei, Liu Xiaoming *et al.*. Design gain characteristic of dual-pump fiber Raman amplifier. APOC Beijing 2001. 216~221

## Optimal Design of Multiwave Pumped Fiber Raman Amplifier with Simplified Model

He Jingsuo<sup>1,2</sup> Guo Tongwen<sup>1</sup> Lei Bo<sup>1</sup> Gu Wanyi<sup>1</sup> Xu Daxiong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Optical Communication Center, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

(Received 17 June 2002; revised 2 August 2002)

**Abstract:** A novel method is developed to design the gain flat multiwave pumped fiber Raman amplifier. This method uses reasonable simple algorithm to reduce computing time but no effect on system performance. It can give the result of optimal pump wavelength and power scheme at the condition of given parameters of signal bandwidth and pump number.

**Key words:** fiber Raman amplifiers; pump scheme; optimal design; gain performance