

文章编号: 1001-3806(2009)05-0449-03

## 分布式宽带光纤喇曼放大器的研制

周维军, 王荣波, 李泽仁

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究分布式光纤喇曼放大器研制过程关键技术, 采用数值分析与实验相结合的方法, 从理论上分析了受激喇曼散射耦合方程组, 并对抽运光、信号光之间相互作用过程进行数值模拟, 选择了满足增益要求的抽运源数目、波长和功率参量。实验上通过调节抽运功率配置, 得到了C+L波段信号净开关增益大于10dB, 平坦度小于1.6dB, 偏振相关增益小于0.4dB, 偏振模色散小于0.16ps。实验结果表明, 本系统选择的抽运源参量完全满足喇曼增益设计要求, 系统技术指标达到通信使用标准。

**关键词:** 光纤放大器; 抽运激光器; 开关增益; 增益平坦度

**中图分类号:** TN722 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.001

### Study of distributed broadband fiber Raman amplifier

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

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

**Abstract:** In order to study the key technology of distributed fiber Raman amplifier, combining the numerical simulation and the experiment, the power coupling equation group was analyzed in theory, and the reciprocity of the pumps and signal was calculated, then the number of pump source, wavelength and power satisfying the gain were obtained. The on-off gain of signals in C+L band up to 10dB, gain flatness less than 1.6dB, gain of polarization relativity less than 0.4dB, polarization mode dispersion less than 0.16ps were obtained by adjusting the pump power. The experiment results indicate that the pumps parameters fully satisfy Raman gain of the system, the technique parameters of the system meet communication standard.

**Key words:** fiber amplifier; pump laser; on-off gain; gain flatness

## 引言

随着社会的信息化发展, 用户对通信容量的需求日益增加, 在这种需求的推动下, 作为现代长途干线通信主体的光纤通信一直朝着高速率、大容量和无中继长距离传输的方向发展<sup>[1]</sup>。传统的掺铒光纤放大器1550nm附近约30nm的带宽已经远远不够用了, 不能满足目前通信系统的要求<sup>[2]</sup>。而分布式光纤喇曼放大器具有无中继长距离传输、大容量、宽带宽、低噪声指数等优点<sup>[3]</sup>, 能满足通信信号长距离传输、数字电视及可视电话等城市局域网中的巨大的应用需求<sup>[4]</sup>。因此, 研制具有提高传输系统容量、增加无电再生中继传输距离的商用化光纤喇曼放大器已经成为光纤通信领域的迫切需求。

光纤喇曼放大器是一种以石英光纤为基底的全波段光放大器, 可以实现光纤波段(1529nm~1610nm)

的光放大, 大大提高了通信的容量, 对光信号进行分布式放大, 大大降低了对抽运光的功率要求, 系统信号的信噪比高, 而且能有效抑制非线性光学效应, 进而增大光通信的传输距离<sup>[5]</sup>。另外, 光纤喇曼放大器是将通用的石英光纤做放大介质, 对光信号进行在线放大, 不需要特殊的放大介质, 通用性更好, 性价比更高, 应用更简单, 在通信信号长距离宽带传输、数字电视及可视电话等城市局域网中具有巨大的应用前景<sup>[6]</sup>。作者利用理论分析与实验相结合的方式, 对光纤喇曼放大器的关键技术进行了研究, 最终研制出一台分布式宽带光纤喇曼放大器。

## 1 信号放大原理

光纤喇曼放大器基于光纤中的受激喇曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)机制。研究发现, 石英光纤具有很宽的SRS增益谱, 并在13.2THz附近有一较宽的主峰。如果一个弱信号与一强抽运光波同时在光纤中传输, 并使弱信号波长置于抽运波的喇曼增益带宽内, 弱信号光即可得到放大。在喇曼放大过程中, 除信号光与抽运光通过喇曼过程发生能量交换外,

作者简介: 周维军(1979-), 男, 助理研究员, 主要从事光纤通信器件、光纤传感器和激光技术方面的研究。

E-mail: zhouxin787@163.com

收稿日期: 2008-08-28; 收到修改稿日期: 2008-11-17

同时还存在光纤的吸收以及自发喇曼辐射过程。对于多波长抽运光纤喇曼放大器的模拟,影响增益的主要是损耗和喇曼效应项,而噪声项忽略可以不考虑,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作用,所以,可以采用以下简化模型进行分析<sup>[7]</sup>:

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

式中,  $z$  是传输距离,  $P_k(z)$ ,  $P_j(z)$  分别为第  $k$  个和第  $j$  个信号光或者抽运光的功率;喇曼增益为  $g_{k,j} = g_R(\nu_k, \nu_j) / (K_{\text{eff}} A_{\text{eff}})$ ,  $K_{\text{eff}}$  为偏振相关系数 ( $1 \leq K_{\text{eff}} \leq 2$ ),  $A_{\text{eff}}$  是光纤纤芯有效面积;  $\nu_k, \nu_j$  分别为第  $k, j$  个信号光或者抽运光的频率,  $g_R$  为喇曼增益系数,  $\alpha_k$  为光纤对第  $k$  个信号光或者抽运光的衰减系数;式中第 1 项为损耗项,第 2 项为第  $k$  个信号或者抽运从高频部分由于喇曼效应吸收的功率,第 3 项是它对低频部分形成抽运而损失的功率。设从 1 ~  $N$  频率是按照降序排列的,正负号分别代表正向和反向传输。从(1)式可以看出,不仅抽运光与信号间存在相互喇曼作用,抽运光与抽运光之间、信号光与信号光之间也存在着相互喇曼作用。其中,抽运间的相互喇曼作用在抽运光波长跨距比较大时更为明显。

## 2 数值模拟

为了降低分布式光纤喇曼放大器研制的风险,提高本系统的可靠性,需要对分布式光纤喇曼放大器抽运与信号、信号与信号、抽运与抽运之间的相互作用过程进行数值模拟分析,进一步了解信号功率、抽运功率在光纤中演化过程,给出光纤喇曼放大器信号增益与各参量因素之间的关系,用于对所购置的器件指标提出参考。数值模拟包括以下几个方面:抽运波长、功率的选择;抽运源数目对增益的影响;信号增益平坦度的调整方法;抽运源参量及增益平坦度的优化;光学非线性效应的抑制及光信号信噪比的改进;系统噪声的分析等。

使用简化数学模型设计的 C + L 波段喇曼放大器,利用打靶法模拟了后向分布式喇曼放大器,在数值计算中,假设光纤长度  $L = 50$  km, 光纤有效面积  $A_{\text{eff}} = 80 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ , 光纤对信号的衰减系数  $\alpha_s = 0.2 \text{ dB/km}$ , 光纤对抽运光的衰减系数  $\alpha_p = 0.24 \text{ dB/km}$ , 对于信号光和抽运光  $K_{\text{eff}} = 2$ , 另外,在(1)式中忽略了自发辐射噪声、瑞利散射噪声以及其它噪声。系统设计中信道数 80, 信道间隔 100GHz, 每个信道功率为 0.1mW。采用后向抽运源方式, 功率均为 200mW。沿着光纤后向

抽运功率演化过程如图 1 所示,数值计算结果证明在标准条件下使用上述数学模型(即(1)式)成功地解决了后向抽运喇曼系统问题。

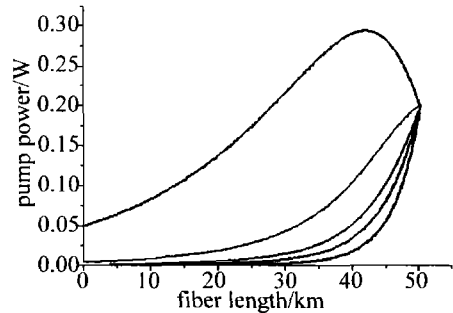


Fig. 1 The pump power changing along the fiber

图 1、图 2 中给出了光纤放大介质中的信号功率、抽运功率演化过程,后向抽运从光纤末端输入并沿着

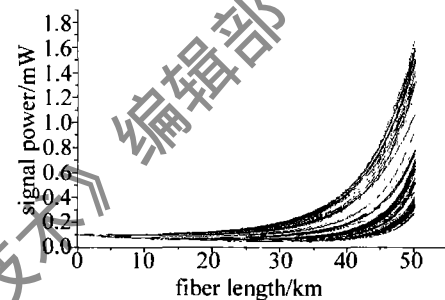


Fig. 2 The signal power changing along the fiber

光纤向前衰减,发射抽运功率的 5 条曲线随着光纤长度快速下降。从沿着光纤分布的抽运功率图 1 和图 2 可以看出,不同抽运光波之间的相互作用有着重大的意义,由于信号光作用使得抽运光在衰减之前,一些抽运光功率得到了放大。

由于诸多影响因素的制约,在喇曼增益谱设计时,不能将抽运光各自的增益谱作简单的线性叠加后作为放大器的增益谱,而必须考虑到各抽运源之间的相互作用,图 3 是 5 个抽运源功率均为 200mW 时的增益分布曲线。从图中可以看出,增益最小 4.5 dB,最大

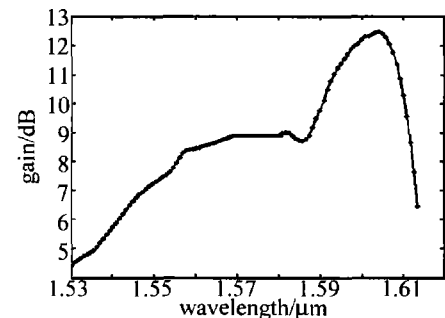


Fig. 3 The gain distribution at the same pump power

12dB,平坦度大于 7.5dB,增益平坦度非常差。

选择合适的抽运波长组合将有助于光纤喇曼放大器信号增益平坦度的优化。为了改善光纤喇曼放大系统的增益平坦度,常用方法是调节抽运光功率。因此,调整抽运功率后通过数值模拟。图 4 为抽运功率调整

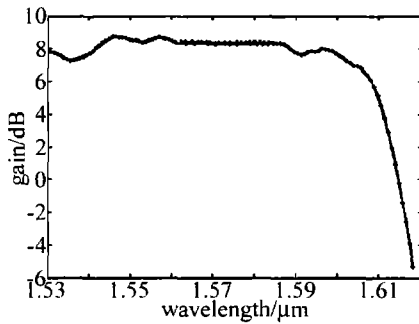


Fig. 4 Flat distribution of on-off gain after power adjustment

后的喇曼增益谱分布,可知,喇曼增益平坦度得到了明显的提高,在 C + L 波段信号增益起伏仅仅是 0.75 dB。

### 3 系统指标测试

系统设计采用数值模拟所获得的抽运源及参量,并通过合波器和隔离器对抽运源及信号源进行耦合,从而构成分布式宽带光纤放大器。研制的分布式宽带光纤喇曼放大器原理样机如图 5 所示。

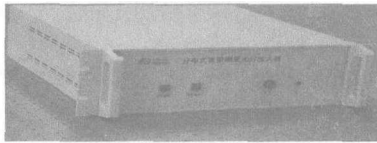


Fig. 5 Fiber Raman amplifier

分布式光纤喇曼放大器系统技术指标测试采用的光信号源为 Agilent 8164A,工作波长范围 1509 nm ~ 1641 nm,信号功率 0 mW ~ 10 mW 连续可调;光谱仪为 HP86142A,测量光谱范围为 600 nm ~ 1700 nm,偏振控制仪为 HP8169A,偏振态控制范围 0° ~ 360° 连续可调。图 6 为 C + L 波段的信号开关增益测试结果,从

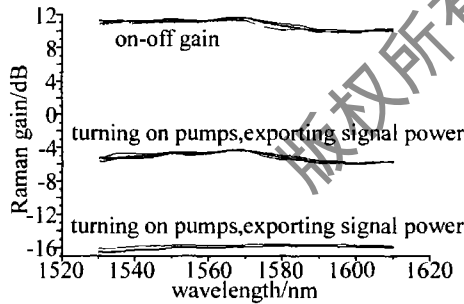


Fig. 6 Experiment results of the on-off gain

图 6 中可以看出,喇曼开关增益为 10 dB ~ 11.6 dB,增益平坦度小于 1.6 dB。图 7 为光纤喇曼放大器的偏振模式色散分布情况,从 1530 nm ~ 1610 nm 波段即 C + L 波段的偏振模式色散最大值小于 0.18 ps,最小值为 0.04 ps,图 8 为光纤喇曼放大器偏振相关增益测试结果,其中只给出波长为 1530 nm 和 1570 nm 处的偏振相关增益,可以看出,偏振相关增益小于 0.4 dB。通过测试可以确定本台分布式宽带光纤喇曼放大器样机达到了以下技术指标:可对 1530 nm ~ 1610 nm (C + L 波段) 波长范围内光信号进行放大;对 C + L 波段的光信号

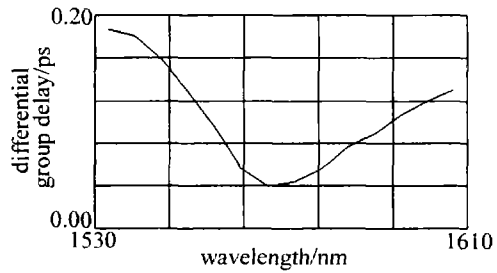


Fig. 7 Experiment result of the polarization mode dispersion

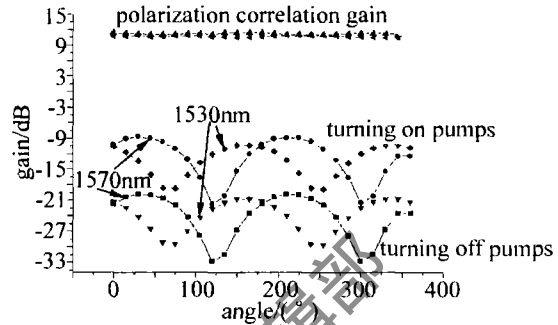


Fig. 8 Experiment results of polarization correlation gain

的开关增益均达到 10 dB 以上;对 C + L 波段的光信号的开关增益的平坦度小于 1.6 dB;偏振相关增益小于 0.4 dB;偏振色散在 1530 nm ~ 1610 nm 波长范围内均小于 0.18 ps;噪声指数 -1.67 dB ~ -1.96 dB。系统各项技术指标均能满足通信标准使用要求。

### 4 结论

通过遗传算法结合打靶法优化功率耦合方程并在小信号分析的基础上解决了反向抽运的边值问题,获得了 80 nm 带宽的光纤喇曼放大器系统,实现了 C + L 波段的信号增益大于 8 dB,平坦度小于 0.75 dB,为了验证计算结果的可靠性,通过搭建试验系统,并对系统的各项技术指标进行测试,获得了信号开关增益为 10 dB ~ 11.6 dB,平坦度小于 1.6 dB,偏振相关增益小于 0.4 dB,偏振色散小于 0.18 ps。综合比较试验结果和计算结果表明:两者之间有一定差异,这主要是由于试验系统中光纤熔接造成信号、抽运功率损耗引起的,而计算过程中没有考虑光纤熔接带来的损耗,这就使得抽运功率调整时,抽运激光器的功率输出值要比计算采用的功率值略高。因此,不同波长的抽运光在熔接点的损耗不同,从而造成试验信号开关增益、增益平坦度与计算结果存在一定差异。

### 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, BOLSHYANSKY M. Raman amplifier model in single-mode optical fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 12(15): 1704-1706.

(下转第 458 页)

左右混合层高度开始下降。对此给出的解释是:太阳未升起前,由近地面热对流引起的混合层高度较低,太阳升起后,在晴朗干净的天气情况下,地面开始存储大量的热能,地面上空能保持的热对流不断积累,而当大气层面处于不稳定状态时,热对流又与空气的垂直浮动有关,剧烈的热对流加快空气垂直浮动,混合层高度变高;又因为热对流造成自由大气向下浮动,同时云的反馈作用使地面接收的热辐射通量减少,地面温度偏低,大气湿度较大,因此,边界层高度在某一时间开始下降,夹带层厚度增加。总体来说,由近地层对流混合形成的城市边界层高度具有大气边界层典型的日变化特点,即早晚比较低,白天逐渐升高,在某一时间又开始下降,边界层高度变化一般在0.5km~2km范围之内。

#### 4 结论

从云高仪 Vaisala 实测大气后向散射系数廓线出发,在白天及夜间不同大气状况下用 Steyn 法获得大气边界层高度等参量,并对 2007-04-01 全天的观测结果进行了分析,获取了当天大气边界层结构及其全天变化的重要信息。应该指出,采用 Steyn 法的缺陷是,运用时要注意选择正确的初始值,剔除有云存在时的干扰因素,尤其当近地面空气被气溶胶含尘气流所覆盖时,无法进行有效的信息鉴别。在实际运用时,如果设备允许,可以选取云高仪法和无线电探空法等同时探测,比较所测混合层高度。同时有必要进行更多的资料积累,并结合边界层风、温、湿等要素垂直分布作

更深入细致的分析,为边界层、空气质量的研究提供科学依据。

#### 参考文献

- [1] DUPONT E, MENUT L, CARISSIMO B, *et al.* Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(6): 979-994.
- [2] ERESMAA N, KARPPINEN A, JOFFRE S M, *et al.* Mixing height determination by ceilometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(6): 1485-1493.
- [3] JOFFRE S M, KANGAS M, HEIKINHEIMO M, *et al.* Variability of the stable and unstable boundary-layer height and its scales over a Boreal forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(3): 429-450.
- [4] HAYDEM K L, ANLAUF K G. Pacific '93 lower fraser valley oxidant study aircraft data report [R]. Ottawa, Canada: Environment Canada Report, 1994: 268-278.
- [5] FRILOUD M, MITEV V, MATTHEY B, *et al.* Elevated aerosol stratification above rhine valley under strong anticyclonic conditions [J]. *Atmosphere Environment*, 2003, 37(13): 1785-1797.
- [6] MOK T M, RUDOWICZ C Z. A lidar study of the atmospheric entrainment zone thickness and mixed layer over HongKong [J]. *Atmospheric Research*, 2004, 69(3/4): 147-163.
- [7] MÜNKEL C, RÄSÄNEN J. New optical concept for commercial lidar ceilometers scanning the boundary layer [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5571: 364-374.
- [8] MÜNKEL C, ERESMAA N, RÄSÄNEN J, *et al.* Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 2007, 124(1): 117-128.
- [9] Vaisala Oyj Corporation. Vaisala ceilometer CL31 user's guide [M]. Vantaa, Finland: Vaisala Oyj, 2004: 121-123.
- [10] STEYN D G, BALDI M, HOFF R M. The detection of mixed layer and entrainment zone thickness from lidar backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1999, 16(7): 953-959.

(上接第 451 页)

- [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 Communications*, 2003, 24(1): 2-5.
- [4] HUANG J F, WU J X. MW-FRA and its pump optimization [J]. *Study on Optical Communication*, 2005(2): 53-55 (in Chinese).
- [5] TONG Z, WEI H, JIAN S S. Numerical simulation and optimization of broadband fiber Raman amplifiers using multi-wavelength pumps [J]. *Acta Optical Sinica*, 2003, 23(2): 194-196 (in Chinese).
- [6] MEI J J, LIU D M, HUANG D X. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 350-356 (in Chinese).
- [7] YANG X B, LIU D M, HUANG D X. Analysis of fiber Raman laser and multi-wavelength lasers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 410-414 (in Chinese).