

文章编号: 0258-7025(2001)11-1021-03

光纤拉曼放大器增益系数与噪声系数的 实验研究

陈健 张晋 彭江得 刘小明 范崇澄 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 采用 1480 nm 波长抽运,对 TrueWave™,DCF 和 DSF 三种通信光纤在 1.5 μm 波段的拉曼增益系数进行了实验测量和比较;针对用作光接收机或 EDFA 前端预放大的光纤拉曼分布放大器使用要求,对放大自发拉曼散射的噪声系数进行了实验测量,并与理论计算进行了比较。

关键词 光纤拉曼放大器,增益系数,噪声系数

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Fiber Raman Amplifier's Gain Coefficient and Noise Figure

CHEN Jian ZHANG Jin PENG Jiang-de

LIU Xiao-ming FAN Chong-cheng ZHOU Bing-kun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The Raman gain coefficients of TrueWave™, DCF and DSF fibers, which are pumped by 1480 nm LD are measured and compared. Because these distributed fiber Raman amplifiers are usually wanted as the pre-amplifiers of optical receiver, the noise figures of the fiber Raman amplifier are measured and calculated.

Key words fiber Raman amplifier, gain coefficient, noise figure

1 引言

光纤拉曼放大器利用传输光纤本身的非线性光学效应——受激拉曼散射对光信号进行直接光放大,无需在光纤中掺入特殊增益介质。光纤拉曼放大器的主要优点有:1)它的工作波段决定于抽运光波长,比如,将波长 1450 nm 的抽运光注入光纤,即可在 1550 nm 波段获得光增益,故采用不同波长的抽运光即可在光纤的整个通带内实现光放大。2)它是一种伴随抽运光而产生增益的“分布”放大器,使沿光纤的信号光功率不致变得太弱,因而有可能沿线路保持对信噪比的较好控制。3)这种“分布”放大特性还允许传输信号光功率保持在较低的水平,使光纤中的非线性光学效应、信号畸变及信道间的交叉串扰减弱。光纤拉曼放大器的这些特性是普通掺铒光纤放大器(EDFA)所无法比拟的,它将成为新一代高速宽带光通信网络中的理想光放大器。

鉴于光纤拉曼放大器通常用作光接收机或中继 EDFA 前的预放大器,本文在对若干常用光纤的拉曼增益系数进行实验测量和比较的同时,特别对源于放大自发拉曼散射的噪声系数进行了实验测量与理论计算的比较。

2 光纤拉曼放大原理

光纤中的拉曼放大基于石英光纤本身的非线性光学效应——受激拉曼散射。拉曼放大的小信号增益表示为^[1]

$$G = \exp(g_R P_p L_{eff} / A_{eff}) \quad (1)$$

其中, g_R 为光纤的拉曼增益系数,它由光纤芯材料的成分决定。 P_p 为抽运光功率, L_{eff} 为表征实际产生放大作用的光纤等效长度, A_{eff} 为光纤的等效模场面积。

拉曼放大的噪声主要来自两方面:一是自发拉曼散射光会与信号光一起同时被放大(ASE)而构成对放大信号的干扰;二是 ASE 与信号光在传输过程

中都会产生瑞利散射,某方向的 ASE 经瑞利散射反射并在相反方向获得拉曼增益,经过这种分布式多次反射和放大的 ASE 会引起光信噪比的恶化。本文主要测量研究这种 ASE 对噪声系数的贡献。

由于光纤拉曼放大是一种分布式放大,使用的光纤长达数千千米至数十千米,因而信号光在被放大的同时也会因传输损耗而衰减。为计算光纤拉曼放大器的噪声系数,可将分布式光纤拉曼放大器等效为一段有损耗而无增益的普通光纤级连一个有增益但无损耗的普通光放大器,从而可用该普通光放大器的噪声系数来等效光纤拉曼放大器的噪声系数。这样,光纤拉曼放大器的 ASE 噪声系数可通过下式来计算^[2]

$$NF = 10 \log \frac{1}{G} \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu \cdot B_0} + 1 \right) \quad (2)$$

其中 G 为拉曼放大的开关增益(倍数), B_0 为光滤波器带宽, P_{ASE} 为带宽 B_0 内的 ASE 功率。其中, P_{ASE} 可以通过下式来计算

$$P_{f_{min}}(L) = \frac{hc^2 B_0}{\lambda_s^3} \cdot \frac{g_R P_p(0)}{A_{eff}} \cdot \exp(-\alpha_s L) \cdot \int_0^L \exp(\alpha_s - \alpha_p \xi) \cdot \exp \left\{ \frac{g_R P_p(0)}{\alpha_p A_{eff}} [\exp(-\alpha_p \xi) - \exp(-\alpha_p L)] \right\} d\xi \quad (3)$$

其中, L 为光纤长度, α_s , α_p 分别为信号光和抽运光在光纤中的损耗系数。

应当指出,按上述等效模型计算光纤拉曼放大器噪声系数的(2)式中,没有计及光纤损耗对噪声系数的影响。这样,所得到的等效光放大器的噪声系数应为负值。

3 拉曼增益与噪声系数实验测量

由于正向抽运(抽运光与信号光同向)将抽运光强度与偏振的不稳定性引入信号光中,将会引起信道间的串扰。因此,光纤拉曼分布放大器通常采用反向抽运方式。

实验装置如图 1 所示。采用 1480 nm 半导体激

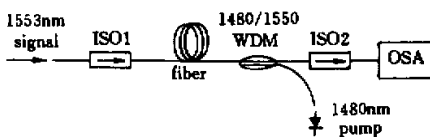


图 1 光纤拉曼放大器实验装置图

Fig. 1 Fiber Raman amplification setup

光抽运,抽运光通过 1480/1550 WDM(信号光的插入损耗为 0.1 dB)光纤耦合器从光纤一端注入,输入端和输出端分别接光隔离器 ISO1 和 ISO2(插入损耗 < 0.3 dB,隔离度 > 40 dB)以防止光反馈,用光谱仪 OSA(ANDO)进行输出光的检测。

3.1 光纤拉曼 ASE 谱的观测

在图 1 所示装置中,先不输入 1553 nm 信号,并将 ISO1 反向,采用 140 mW 的 1480 nm 激光抽运一段色散位移光纤,通过 OSA 从左、右两端分别观测正向和反向 ASE 谱,如图 2 所示。图 2(a)所示的正向输出谱左侧出现较强的谱带,中心波长 1466 nm,这是残余的抽运光;而在图 2(b)反向输出谱的相同波长处则观测到较弱的谱峰,这是反射抽运光引起的。从图 2 看到,无论正向 ASE 谱还是反向 ASE 谱,Stokes 拉曼散射谱峰值均位于 1568 nm 波长附近,移频量约 102 nm, -3 dB 增益带宽均约 45 nm;但反向 ASE 谱比正向 ASE 谱要强得多(约高 6 dB),这是因为抽运光功率沿光纤从右到左按指数衰减分布,致使正向 ASE 的放大随传输距离越来越弱,而反向 ASE 的放大随传输距离越来越强;正因如此,图 2(b)的反向输出谱在 1620 nm 后出现了新的光谱带,峰值位于 1670 nm 处,距前级 Stokes 散射谱峰也是 102 nm,说明这是较强的前级反向 ASE 产生的次级拉曼散射光谱。

3.2 光纤拉曼增益系数的测量

按图 1 所示装置,采用波长 1553 nm 的信号源,使用 Lucent 公司的 24.5 km TrueWave™ 光纤, 21 km 的 DSF 光纤和 20 km 的 DCF 光纤,分别测得不同光纤中小信号拉曼增益与抽运功率的关系曲线,如图 3 所示。由图可见,在各种光纤中,小信号增益与抽运功率呈线性关系,与式(1)给出的结果一致。从图 3 明显看到,DCF 的拉曼增益最大,而 DSF 和 TrueWave™ 光纤的小信号拉曼增益相近。

根据图 3 给出的实验值,由(1)式分别计算三种光纤的拉曼增益系数 g_R ,结果列于表 1。比较可见,DCF 光纤的拉曼增益系数 g_R 最大,DSF 次之,DCF 最小。由此可见,为了获得高的拉曼增益,应当选用拉曼增益系数较大,模场有效面积较小的光纤。

3.3 光纤拉曼放大噪声系数的测量

仍采用图 1 所示装置,分别测量了 24.5 km 的 TrueWave™ 光纤、21 km 的 DSF 光纤和 20 km 的 DCF 光纤的 ASE 噪声功率及噪声系数。

这里以 20 km DCF 光纤为例,图 4 给出实验测得的 ASE 噪声功率和理论计算值的比较。其中

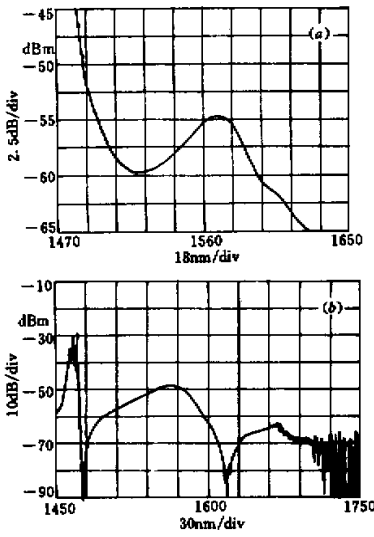


图2 正向(a)和反向(b)拉曼 ASE 谱

Fig.2 Forward (a) and backward (b) Raman ASE spectrum

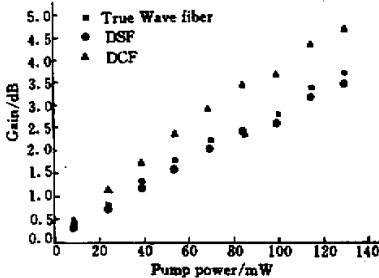


图3 不同信号功率下拉曼增益随抽运变化的规律

Fig.3 Gain curves versus pump power at different input signal power

表1 TrueWave™, DSF, DCF 光纤的拉曼增益特性

Table 1 Gain characteristics of TrueWave™, DSF, DCF

	TrueWave™	DSF	DCF
Gain G /dB	3.88	3.46	4.86
A_{eff} / μm^2	55	50	30
L_{eff} /km	13.1	10.12	7.06
g_R / $10^{-14} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$	2.67	2.81	3.39

ASE的理论计算值由(3)式求得, B_0 取光谱仪的滤波谱宽 0.153 nm, 信号光波长为 1553 nm, 信号光损耗 $\alpha_s = 0.538 \text{ dB/km}$, 抽运光损耗 $\alpha_p = 0.57 \text{ dB/km}$, 增益系数、有效模场面积的取值与表 1 中 DCF 光纤一致。由图可见, ASE 的测量值与理论计算值符合得很好。同样, 在 DSF 和 TrueWave™ 光纤中

获得了相似的结果。

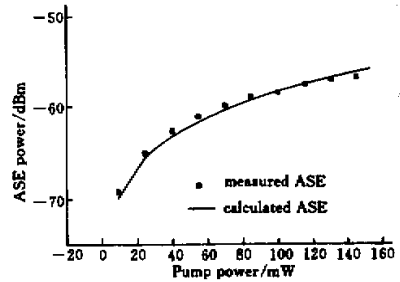


图4 ASE 噪声随抽运功率变化的规律

Fig.4 ASE power curves versus pump power

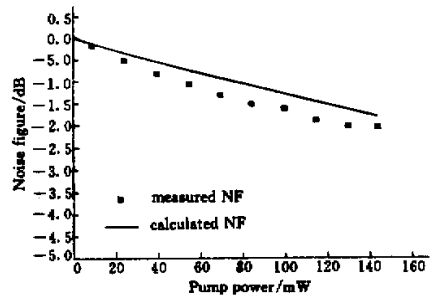


图5 噪声系数随抽运功率变化的规律

Fig.5 Noise figure curves versus pump power

图 5 给出实验测得的 20 km DCF 光纤的噪声系数和理论计算的噪声系数的比较。这里的噪声系数测量值是使用光谱仪直接测量的, 而噪声系数的理论值由式(2)求得。由于采用了等效模型, 可以看到图 5 中的噪声系数为负值, 且随着抽运的增大而逐渐减小。这是因为尽管 ASE 功率和增益都随着抽运功率的增大而增大, 但相对来说, 增益比 ASE 功率增长更快。

实验过程中, 由于抽运功率很低, 而此时瑞利散射对噪声系数的影响很小, 所以本文没有对瑞利散射进行实验研究。在获得大功率抽运源之后, 下一步就可以对瑞利散射对噪声系数的影响进行详细的研究。

参考文献

- 1 Yasuhiro Aoki. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems. *J. Lightwave Technology*, 1988, 6(7):1225~1239
- 4 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz et al.. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(1):159~161