

# 不同传输光纤喇曼放大器双瑞利散射噪声性能分析

梅进杰 鲁平 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

**提要** 分析比较了三种光纤拉曼放大器(FRA)的双瑞利散射(DRS)交调信号比,以及 DRS 导致的功率代价。在相同条件下,色散位移光纤(DSF)FRA 的增益最大,由 DRS 导致的交调信号功率比、功率代价也最高。抽运功率增加,DRS 噪声性能急剧下降。

**关键词** 光纤拉曼放大器, 双瑞利散射, 交调, 功率代价

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## Double Rayleigh Scattering Noise Performance Analysis of Different Transmission Fiber Raman Amplifiers

MEI Jin-jie LU Ping LIU De-ming HUANG De-xiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The crosstalk-to-signal ratio and the power penalty caused by double Rayleigh scattering of different fiber Raman amplifiers are investigated. Under the same pump power, the gain of dispersion shifting fiber Raman amplifier is the highest, and its crosstalk-to-signal ratio and power penalty are also the highest. The double Rayleigh scattering noise performance of fiber Raman amplifier decreases rapidly as the pump power increases.

**Key words** fiber Raman amplifier, double Rayleigh scattering, crosstalk, penalty

### 1 引言

近来演示的超宽带波分复用(WDM)技术将系统带宽潜力扩展到太比特量级。传输光纤的发展提供了 1.2~1.7  $\mu\text{m}$  的低损耗可用窗口,但没有合适的掺稀土元素光纤放大器,能覆盖这个 70 THz 的实用范围。光纤拉曼放大器(FRA)在宽波长范围能提供光放大和高输出功率,具有低噪声、几乎无限带宽等属性。

瑞利散射是硅基光纤拉曼放大器性能的最重要决定因素之一。双瑞利散射(DRS)对光波通信系统性能的影响在理论和实验上都作过研究<sup>[1,2]</sup>,显示 DRS 导致检测后信号的强度噪声,导致接收机灵敏度降低。

光纤拉曼放大器使用传输光纤作为放大介质。为了选择合适的传输光纤,有必要分析比较使用不同光纤类型的拉曼放大器噪声性能。近来有部分文献讨论了不同光纤类型的受激拉曼散射(SRS)对 WDM 光通信系统的影响<sup>[3,4]</sup>,主要是分析 SRS 对信道功率分配的影响,确定 SRS 阈值功率。本文分

析纯硅芯光纤、标准单模光纤、色散位移光纤用作拉曼放大时,光纤拉曼放大器的增益特性、双瑞利散射导致的交调、功率代价。

### 2 理论基础

光纤拉曼放大器是非线性光纤光学的重要应用。石英光纤具有很宽的受激拉曼散射增益谱,并在 13 THz 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拉曼增益带宽内,弱信号光即可得到放大。这种基于 SRS 机制的光放大器称为光纤拉曼放大器。如果信号光强比抽运光强小得多,抽运耗尽可以忽略不计,则在光纤长度  $L$  处,单波长连续光抽运的 FRA 小信号增益为:

$$G = \exp\left(\frac{g_R P_{p0} L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} - \alpha_s L\right) \quad (1)$$

式中  $g_R$  为光纤的拉曼增益系数,  $P_{p0}$  为输入抽运光功率,  $A_{\text{eff}}$  为拉曼光纤的有效面积,  $\alpha_s$  为光纤对信号

光的损耗系数,  $L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)]$  为  $\alpha_p$  不为零引起的拉曼有效长度,  $\alpha_p$  为光纤对抽运光的损耗系数。硅基光纤的拉曼增益系数很低, 拉曼放大器的增益光纤长度一般为 km 量级。在如此长的光纤链路内, 双瑞利散射噪声导致系统性能严重降低。近似认为每单位长度光纤增益为常数<sup>[2]</sup>, 在放大光纤的输出端, 双瑞利散射导致的交调信号比为

$$\frac{P_r(L)}{P_s(L)} = \frac{r^2 L^2}{4(\ln G)^2} (G^2 - 2\ln G - 1) \quad (2)$$

式中  $G$  是 FRA 的净增益,  $P_r(L)$  为交调功率,  $P_s(L)$  为信号功率,  $r$  是瑞利散射系数。(2) 式忽略了增益光纤内偏振影响、抽运功率的变化。对于低损耗光纤, 在 20 km 长度内, 忽略抽运功率的变化对交调信号比的计算精度影响很小。

由双瑞利散射噪声导致的 FRA 系统功率代价为<sup>[1]</sup>

$$\text{Penalty (dB)} = -10 \log \left[ 1 - \frac{NQ^2 P_r(L)}{2 P_s(L)} \right] \quad (3)$$

式中  $N$  是 FRA 的数目,  $Q^2$  是误比特率为  $\text{BER} = \text{erfc}(Q)/2$  时的信噪比。(3) 式使用高斯交调模型, 并假设信号光和瑞利散射光的偏振方向是任意的。

### 3 性能分析

图 1 为抽运功率等于 0.75 W 时, 纯硅芯光纤 (PSCF)、长飞的标准单模光纤 (YOFC SMF)、康宁的色散位移光纤 (Corning DSF) 在不同长度下, 作为增益介质的光纤拉曼放大器增益。随着光纤长度的增加, 抽运光功率迅速转换到信号光上, 增益迅速增加。对于分布式 FRA, 并不是光纤越长, 增益越大, 而是有最佳长度。且不同拉曼光纤的最佳长度不

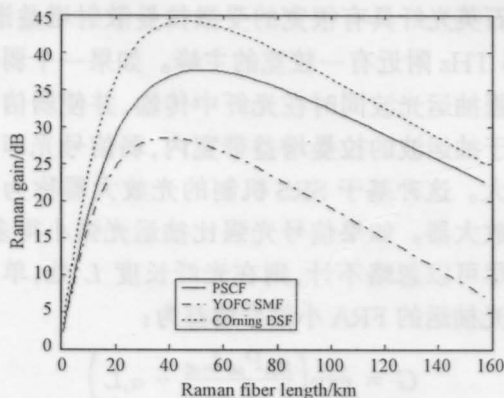


图 1 光纤长度不同时的拉曼增益

Fig. 1 Raman gain for different fiber length

同, 这是由于不同光纤对抽运光功率的损耗不同。PSCF 损耗最低, 拉曼光纤有效长度最长, 最佳长度最长。不同光纤的参数不同, 增益变化较大。DSF 的有效面积最小, 其拉曼增益最大, 最大增益为 44 dB。SMF 的拉曼增益系数最小, 有效面积最大, 所以其最大增益只有 28 dB。

图 2 为三种拉曼光纤的双瑞利散射交调信号功率比, 粗线和细线分别代表抽运功率为 0.75 W、0.5 W, 图 2(a) 是两种抽运功率情况下实际的交调信号比, 为便于比较, 图 2(b) 将抽运功率为 0.75 W 时的交调信号比曲线移到抽运功率为 0.5 W 的交调信号比曲线一起。光纤长度增加, 拉曼增益增加, 交调信号比上升。DSF 的 FRA 在相同抽运功率、相同光纤长度时的增益最大, 所以交调信号比最大。PSCF 的瑞利系数较小, 交调信号比较小, 尽管其增益比 SMF 的增益大, 但其交调信号比与 SMF 的交调信号比差异很小。抽运功率为 0.75 W、光纤长度为 12 km 时, DSF 的 FRA 交调信号比相对于另外两种 FRA 大将近 13 dB。抽运功率越大, 拉曼增益越大, 交调信号比越大。从图 2(b) 可以看出, 抽运功率越大, 拉曼增益增加越快, 交调信号比增加得越快。

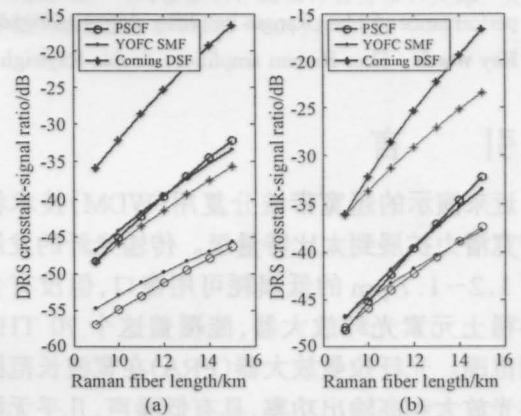


图 2 双瑞利散射交调信号功率比。(a) 实际曲线; (b) 不同抽运功率时的比较

Fig. 2 Double Rayleigh scattering signal crosstalk.

(a) Actual curve; (b) Contrast for different pumping power

图 3 为三种光纤 FRA 的功率代价比较, 无点线代表抽运功率为 0.5 W、100 个放大器的情况, 图 3(a) 中带点线代表抽运功率为 0.75 W、2 个放大器情况, 图 3(b) 中带点线代表抽运功率为 0.75 W、7 个放大器情况。可以看出功率代价强烈依赖 DRS 交调信号比, DSF 的 FRA 代价远远大于 PSCF、SMF 的 FRA 代价。对 DSF 的 13 km FRA, 抽运功率为 0.5 W、100 个放大器的功率代价, 与抽运功率为

0.75 W, 2个放大器的功率代价相当。对 PSCF 的 12 km FRA, 抽运功率为 0.5 W、100 个放大器的功率代价, 与抽运功率为 0.75 W、7 个放大器的功率代价相当。对应 SMF 则为 14 km 的 FRA。该图说明要增加传输距离, 保持较小的功率代价, 应该减小抽运功率, 以减小双瑞利散射。而且抽运功率对使用 DSF 作为增益介质的 FRA 代价的影响, 远远大于另外两种 FRA。

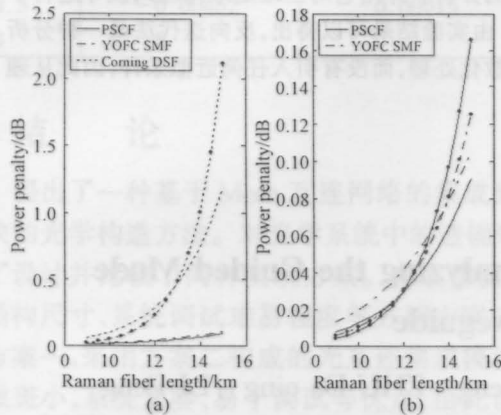


图3 不同光纤 FRA 的功率代价。  
 (a) 三种拉曼光纤的功率代价比较;  
 (b) 两种拉曼光纤的功率代价比较

Fig. 3 Penalty of FRA for different kind of fiber.  
 (a) for three kind of fiber;  
 (b) for two kind of fiber

### 4 结 论

对三种拉曼光纤放大器的 DRS 噪声性能作了分析比较。当抽运功率和拉曼增益增加时, 双瑞利散射导致交调信号比增加, 导致系统功率代价。特别是抽运功率增加时, DRS 引起系统性能急剧下降。用 DSF 作增益介质的 FRA, 在相同抽运功率和光纤长度下取得的增益最大, 但 DRS 交调信号比最大, 功率代价也最大。设计光纤拉曼放大器时, 必须选择瑞利散射系数小、增益合适的光纤介质, 以减小 DRS 对 WDM 系统性能的影响。

### 参 考 文 献

- 1 P. Wan, J. Conradi. Double Rayleigh backscattering in long-haul transmission system employing distributed and lumped fiber amplifiers. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(5): 383~384
- 2 P. Wan, J. Conradi. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3):288~297
- 3 S. Bigo, S. Gauchard, A. Bertainia *et al.*. Experimental investigation of stimulated Raman scattering limitation on WDM transmission over various types of fiber infrastructures. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6):671~673
- 4 P. M. Krummrich, R. E. Neuhauser, G. Fischer. Experimental comparison of Raman thresholds of different transmission fiber types. *ECOC, 2000, Tech. Dig.*, P. 1.5