

多路干涉对光纤拉曼放大器噪声因数的影响*

梅进杰 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 考虑了多路干涉与拉曼自发辐射噪声具有不同的谱分布特性, 推导出信号的背向瑞利散射导致的多路干涉对光纤拉曼放大器噪声因数影响的解析表达式, 给出了考虑多路干涉后光纤拉曼放大器的噪声因数的光学测量方法。分析了不同开关增益、不同输入信号功率、不同增益光纤背向瑞利散射情况下多路干涉对光纤拉曼放大器噪声因数的劣化程度。随着拉曼增益的增加, 输入信号功率越大、背向瑞利散射越大, 多路干涉的影响越大。

关键词: 信息光学; 光纤拉曼放大器; 噪声因数; 瑞利散射; 多路干涉

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

噪声因数(Noise Figure, 缩写为 NF)是衡量放大器噪声性能的最有效参量之一。噪声因数定义为放大器输入端信噪比(SNR)与输出端信噪比的比值。在电域的低频放大器中, 噪声功率被标准化为热噪声温度, 噪声因数仅取决于放大器本身附加的噪声功率。由于光放大器噪声不是加性噪声, 定义噪声因数时, 信噪比不能直接定义为信号光功率与噪声光功率的比值, 其噪声功率在电域定义为理想光接收机输出光电流的方差, 在光域定义为光子数目的均方起伏。

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。拉曼增益系数的值较低, 意味着拉曼放大器中增益光纤长度典型值为公里量级。在这么长增益光纤内, 放大器有较大的信号和拉曼放大自发辐射(ASE)背向瑞利散射(BRS)发生。放大器内放大自发辐射的瑞利背向散射及其放大, 导致放大自发辐射功率增加, 降低信号与放大自发辐射噪声功率比; 信号的瑞利背向散射引起多路干涉(MPI), 使信号受到瑞利散射噪声干扰, 导致放大器性能下降。瑞利散射对光波通信系统性能的影响在理论和实验上都作过研究^[1~3], 显示多路干涉引起检测后信号的强度噪声, 导致接收机灵敏度的降低。

以前分析拉曼放大器的噪声因数, 考虑过背向

瑞利散射的影响^[1,4], 但仅仅考虑拉曼自发辐射的背向瑞利散射, 将其作为拉曼自发辐射的一部分。本文同时分析信号和拉曼自发辐射的多次瑞利散射对拉曼放大器噪声因数的影响, 并且考虑到信号多路干涉噪声与自发辐射噪声具有不同的分布特性, 提出更符合实际的噪声因数分析和测量方法。

2 拉曼放大器的噪声因数

对于理想的光接收机, 平方律探测后总噪声为

$$N_{\text{total}} = N_{s, \text{shot}} + N_{s, \text{sp}} + N_{\text{sp-sp}} + N_{\text{sp, shot}}, \quad (1)$$

其中 $N_{s, \text{shot}}$ 、 $N_{\text{sp, shot}}$ 分别为光放大器输出的信号和放大自发辐射散粒噪声, $N_{s, \text{sp}}$ 为信号与自发辐射拍频噪声, $N_{\text{sp-sp}}$ 为自发辐射与自发辐射拍频噪声。在高增益条件下, 自发辐射功率远小于信号功率, 等式右边后两项可忽略不计。前两项分别为

$$N_{s, \text{shot}} = 2h\nu GP_{\text{in}}, \quad (2)$$

$$N_{s, \text{sp}} = 4GP_{\text{in}}\rho_{\text{ASE}}, \quad (3)$$

其中 h 为普朗克常量, ν 为信号光频率, G 为光放大器增益, P_{in} 为光放大器输入功率, $\rho_{\text{ASE}} = h\nu n_{\text{sp}}(G-1)$ 为放大自发辐射功率谱密度, n_{sp} 为噪声提高因子。

光放大器噪声因数为^[5]

$$F^{\text{N}} = \frac{R_{\text{in}}^{\text{SN}}}{R_{\text{out}}^{\text{SN}}} = \frac{N_{\text{total}}}{2h\nu G^2 P_{\text{in}}} = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{2\rho_{\text{ASE}}}{h\nu} \right) = \frac{1}{G} [1 + 2n_{\text{sp}}(G-1)], \quad (4)$$

其中 $R_{\text{in}}^{\text{SN}}$ 、 $R_{\text{out}}^{\text{SN}}$ 分别为光放大器输入端与输出端信噪比。对于高增益的光放大器, 当 $n_{\text{sp}} \rightarrow 1$, F^{N} 噪声因数接近 3 dB 的量子极限。

* 国家高技术研究发展计划招标项目(2001AA31228Z)资助课题。

E-mail: jinjiemei@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-05-20; 收到修改稿日期: 2002-07-08

对于光纤拉曼放大器,必须考虑信号和放大自发辐射瑞利散射噪声的影响。沿几十公里长的光纤,有许多瑞利散射事件发生,每一次散射导致一个随机相位的干扰信号。不同相位的干扰信号叠加形成多路干涉。多路干涉噪声是原信号的延迟,在接收机中与信号非相干混合,产生拍频噪声。

在高开关拉曼增益条件下,光接收机输出总噪声功率为

$$N_{\text{total}} = N_{s,\text{shot}} + N_{s\text{-sp}} + N_{s\text{-sp,BRS}} + N_{s\text{-MPI}}, \quad (5)$$

其中 $N_{s\text{-MPI}}$ 为信号与多路干涉拍频噪声, $N_{s\text{-sp,BRS}}$ 为

信号与放大自发辐射背向瑞利散射拍频噪声。若不考虑瑞利散射项 $N_{s\text{-sp,BRS}}$ 和 $N_{s\text{-MPI}}$, 分布拉曼放大器的等效噪声因数可由(4)式得到

$$F_{\text{eq}}^{\text{N}} = \frac{1}{G_{\text{on-off}}} \left[1 + 2 \frac{\rho_{\text{ASE}}(f)}{h\nu} \right], \quad (6)$$

其中 $G_{\text{on-off}}$ 为拉曼开关增益, $\rho_{\text{ASE}}(f)$ 为拉曼自发辐射噪声功率谱密度。在光带宽 B_0 内,拉曼自发辐射近似为白噪声, $\rho_{\text{ASE}}(f)$ 为常量 ρ_{ASE} 。对于后向抽运的光纤拉曼放大器, $\rho_{\text{ASE}}(f)$ 可近似为^[6]

$$\rho_{\text{ASE}}(f) = h\nu \left(\frac{\alpha_p A_{\text{eff}}}{g_R P_{\text{pL}}} \right)^{\alpha_s/\alpha_p} \exp\left(\frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \right) \left\{ P\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) - P\left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \exp(-\alpha_p L) \right] \right\}, \quad (7)$$

其中 L 为拉曼放大光纤长度, g_R 、 A_{eff} 、 P_{pL} 分别为在抽运波长处的拉曼增益系数、光纤有效面积、光纤抽运功率, α_p 、 α_s 分别为抽运波长、信号波长处的光纤损耗系数, $\Gamma(x)$ 为伽马函数,

$$P(a, x) = 1/\Gamma(a) \int_0^x u^{a-1} e^{-u} du$$

为不完全的伽马函数。

若考虑拉曼自发辐射背向瑞利散射 $N_{s\text{-sp,BRS}}$ 的影响,为计算或分析拉曼放大器的噪声因数,(6)式中的 $\rho_{\text{ASE}}(f)$ 必须还包括拉曼自发辐射背向瑞利散射功率谱^[4]:

$$\rho_{\text{ASE}}(f) = h\nu \left\{ \left(\frac{\alpha_p A_{\text{eff}}}{g_R P_{\text{pL}}} \right)^{\alpha_s/\alpha_p} \exp\left(\frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \right) \left[P\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) - P\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} e^{-\alpha_p L} \right) \right] + \frac{R(\alpha_s/\alpha_p)}{1 - \alpha_s/\alpha_p + g_R P_{\text{pL}}/(\alpha_p A_{\text{eff}})} \exp\left(\frac{2g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) \left[\left(\frac{2g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right)^{1-2\alpha_s/\alpha_p} \Gamma\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} \right) P\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, \frac{2g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) - \left(\frac{2g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right)^{-g_R P_{\text{pL}}/(\alpha_p A_{\text{eff}}) - \alpha_s/\alpha_p} \Gamma\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} + 1 \right) P\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + \frac{g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} + 1, \frac{2g_R P_{\text{pL}}}{\alpha_p A_{\text{eff}}} \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

其中 $R = rS/2\alpha_s$ 为瑞利背向散射, r 为瑞利散射系数, S 为瑞利散射背向俘获因子。因为背向瑞利散射 R 比较小,上式忽略了两次以上的光散射,只考虑放大自发辐射的双瑞利散射(DRS)。

由于多路干涉是原信号的延迟,其功率谱分布与信号谱相同。仅通过测量信号带外的放大自发辐射噪声功率来预测光纤拉曼放大器的噪声因数,将

给系统分析带来较大误差,必须考虑信号带内多路干涉的影响。信号与多路干涉拍频噪声功率为^[7]

$$N_{s\text{-MPI}} = \frac{R^2 \alpha_s^2 L^2}{(\ln G)^2} (G^2 - 2\ln G - 1) G^2 P_{\text{in}}^2, \quad (9)$$

其中 G 为拉曼放大器的净增益。考虑信号的多路干涉后,分布拉曼放大器等效噪声因数为

$$F_{\text{eq}}^{\text{N}} = \frac{1}{G_{\text{on-off}}} \left[1 + 2 \frac{\rho_{\text{ASE}}(f)}{h\nu} \right] + \frac{N_{s\text{-MPI}}}{2h\nu G^2 P_{\text{in}} B_0} e^{-\alpha_s L} = \frac{1}{G_{\text{on-off}}} \left[1 + 2 \frac{\rho_{\text{ASE}}(f)}{h\nu} \right] + \frac{R^2 \alpha_s^2 L^2}{(\ln G)^2} \frac{(G^2 - 2\ln G - 1)}{2h\nu B_0} P_{\text{in}} e^{-\alpha_s L}. \quad (10)$$

可以看出,考虑多路干涉后,拉曼放大器的噪声因数与信号相关,这是由于光放大器噪声因数定义

的局限性。如果采用修正的噪声因数定义^[5],将光放大器的噪声定义为光信号电场幅度的均方扰动,

则拉曼放大器的噪声因数与信号无关。

(10)式写成可测量的形式为

$$F^N = \frac{1}{G_{\text{on-off}}} \left(1 + \frac{P_{\text{ASE}}}{h\nu B_0} \right) + \beta_{\text{MPI}} \frac{P_{\text{in}}}{2h\nu B_0} e^{-\alpha_s L}, \quad (11)$$

其中 P_{ASE} 为光谱分析仪在光带宽 B_0 内测量的放大自发辐射噪声功率, β_{MPI} 为修正的时域消光法^[8] 在光带宽 B_0 内测量的信号多路干涉噪声功率与信号功率之比。

3 分析结果

利用(10)式考察多路干涉对噪声因数的影响。图1为纯硅酸盐芯光纤(SCF)和色散位移光纤(DSF)分布拉曼放大器的等效噪声因数随抽运功率的变化,虚线为不考虑瑞利散射情况,点线为考虑放大自发辐射及其双瑞利散射情况,实线为考虑多路干涉后的情况。为便于比较,图1的计算使用与参考文献[1]相同的拉曼放大器参量,抽运波长为1453 nm,信号波长为1555 nm,光带宽取0.2 nm,瑞利背向散射分别为 $R_{\text{SCF}} = -31.9$ dB、 $R_{\text{DSF}} = -29.9$ dB。当不考虑放大自发辐射和信号的多次瑞利散射,抽运功率越大,噪声因数越小,光纤拉曼放大器噪声性能越好。考虑放大自发辐射的双瑞利散射后,光纤拉曼放大器存在最小噪声因数,但不同光纤拉曼放大器存在不同的最优抽运功率,或最佳增益。本文的分析与以前的测量结果^[1]相当一致。考虑信号的多路干涉后,同样存在最佳抽运功率和最小噪声因数,但最优抽运功率减小,最小噪声因数增大(可由光纤拉曼放大器灵敏度的测量得到证明^[1]),大增益下的拉曼放大器噪声因数急剧增大。抽运功率比较小时,信号和放大自发辐射的背向瑞利散射对光纤拉曼放大器的噪声因数几乎没有影响。

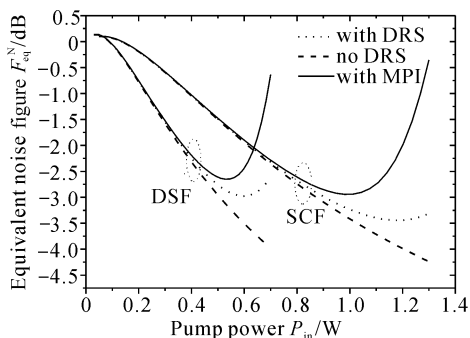


Fig. 1 Equivalent noise figure of FRAs for SCF and DSF

图2为不同输入信号功率下色散位移光纤拉曼放大器的噪声因数随开关增益的变化,所有参量与

上图相同。不考虑多路干涉,最佳增益为30 dB,最低噪声因数为-2.98 dB。考虑多路干涉后,当输入信号从-15 dBm增加到0 dBm,最佳增益从28.3 dB减小到21.4 dB,最低噪声因数从-2.84 dB增加到-1.78 dB,35.2 dB增益下的等效噪声因数从-1.88 dB增加到5.68 dB。输入信号功率比较小时,考虑多路干涉前后的噪声因数差异很小,多路干涉对噪声因数的影响不大。当输入信号功率大于-5 dBm,35.2 dB增益下的等效噪声因数已经超过2 dB,多路干涉将噪声因数劣化到难以容忍的程度,此时,光纤拉曼放大器的低噪声优点丧失殆尽。要使多路干涉对噪声因数的劣化不超过1 dB,在30 dB增益下,输入信号功率不能超过-10 dBm。

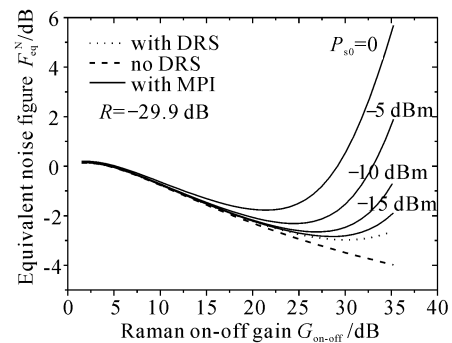


Fig. 2 Equivalent Noise Figure of DSF Raman amplifiers for different input signals power

图3为不同背向瑞利散射下色散位移光纤拉曼放大器的噪声因数随开关增益的变化,输入信号功率为-10 dBm。随着背向瑞利散射从-35 dB增大到-25 dB,仅考虑放大自发辐射的双瑞利散射和考虑信号的多路干涉两种情况下的拉曼放大器的最低等效噪声因数逐渐增大,但增加的幅度不同,仅考虑放大自发辐射的双瑞利散射情况下的最低噪声因数从-3.51 dB增加到-2.38 dB,考虑多路干涉情况下的最低噪声因数从-3.34 dB增加到-1.64 dB,增加明显加快。同样,两种情况下的最佳开关增益

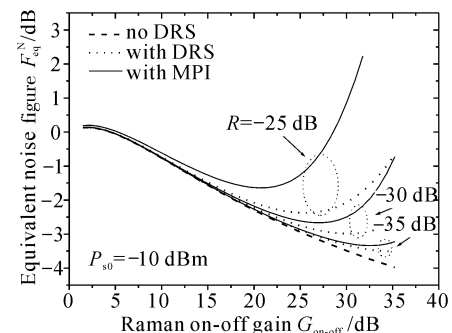


Fig. 3 Equivalent Noise Figure of DSF Raman amplifiers for different backward Rayleigh scattering

逐渐减小,减小的幅度不同,前一种情况的最佳增益从35.2 dB减小到25.7 dB,后一种情况从32.6 dB减小到20.5 dB。当背向瑞利散射 R 比较小时,两种情况下的噪声因数相差不大,多路干涉对拉曼放大器的等效噪声因数影响很小。当背向瑞利散射 R 比较大,多路干涉对噪声因数的影响相当严重。当 $R = -25$ dB,在30 dB的拉曼开关增益下,多路干涉使噪声因数从-2.07 dB增加到0.88 dB。

图4为拉曼开关增益保持为30 dB时,不同输入信号功率下等效噪声因数随瑞利背向散射的变化。背向瑞利散射越大,多路干涉对噪声因数的影响随输入信号功率的增加越剧烈。对于输入信号功率从-15 dBm增加到-5 dBm,当 $R = -25$ dB,噪声因数从-0.92 dB增加到3.99 dB,但当 $R = -30$ dB,噪声因数从-2.83 dB增加到-1.59 dB。

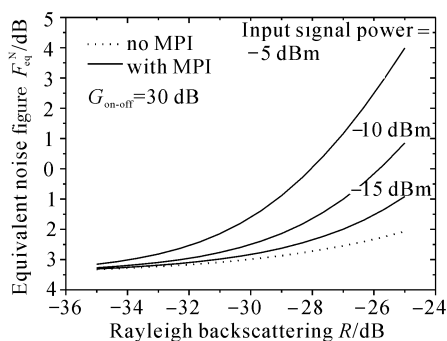


Fig. 4 Equivalent Noise Figure varying with backward Rayleigh scattering for different input signals power

图5为多路干涉对9 km的集总式色散补偿光纤(DCF)拉曼放大器噪声因数的影响。色散补偿光纤在1555 nm、1453 nm处的损耗分别取0.49 dB/km、0.58 dB/km,拉曼增益系数取 $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 。由于集总式光纤拉曼放大器的净增益一般在20 dB以上,输入信号光功率比较小,图中选取-20 dB到-10 dB变化。由于输入功率小,多路干涉对噪声因数的影响相对于分布式光纤

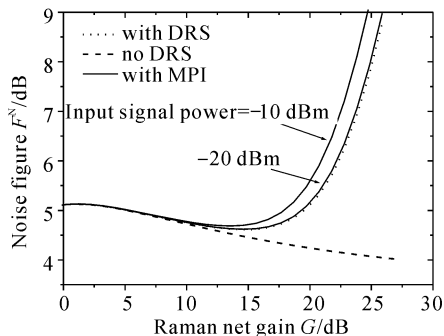


Fig. 5 Impact of MPI on noise figure of lumped FRA

拉曼放大器要小许多,放大自发辐射的双瑞利散射对噪声因数的影响占主导地位。对于该集总式光纤拉曼放大器,要使噪声因数小于8 dB,净增益不能超过25 dB。

结论 从光放大器噪声因数的定义出发,推导出信号的背向瑞利散射导致的多路干涉对光纤拉曼放大器噪声因数的影响的解析表达式。分析了不同开关增益、不同输入信号功率、不同增益光纤背向瑞利散射情况下,多路干涉对等效噪声因数的影响。分析表明,随着拉曼增益的增大,输入信号功率越大、背向瑞利散射越大,多路干涉对等效噪声因数的劣化越严重。当输入信号功率不超过-10 dBm,开关增益不超过30 dB,多路干涉对等效噪声因数的劣化不超过1 dB。由于集总式光纤拉曼放大器光纤长度比较短,输入信号功率比较小,多路干涉对噪声因数的影响不如放大自发辐射的双瑞利散射的影响严重。本文也给出了考虑多路干涉后光纤拉曼放大器的噪声因数的光学测量方法。

参 考 文 献

- 1 Hansen P B, Eskildsen L, Stentz A J *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):159~161
- 2 Jiang Wenning, Chen Jianping, Chen Yingli *et al.*. Suppression of double Rayleigh backscattering noise in optical fiber Raman amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):539~541 (in Chinese)
- 3 Wan P, Conradi J. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3):288~297
- 4 Zhang W, Peng J, Liu X *et al.*. An analytical expression of equivalent noise figure for distributed fiber Raman amplifiers with Rayleigh scattering. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(1~4):231~236
- 5 Haus H A. The noise figure of optical amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11):1602~1604
- 6 Chinn S R. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7):607~608
- 7 Wan P, Conradi J. Double Rayleigh backscattering in long-haul transmission systems employing distributed and lumped fibre amplifiers. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(5):383~384
- 8 Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R. Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):528~530

Impact of Multipath Interference on Noise Figure of Fiber Raman Amplifiers

Mei Jinjie Liu Deming Huang Dexiu

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

(Received 20 May 2002; revised 8 July 2002)

Abstract: The impact of multipath interference (MPI) on the noise figure of fiber Raman amplifier is studied. The noise figure is analytically expressed in terms of the Raman gain and the Rayleigh scattering parameters of the Raman fiber. The difference between the power spectral characteristics of the multipath interference noise and that of the Raman spontaneous emission noise is considered. It is demonstrated that the MPI can be a significant degrading factor to the noise figure when the Raman on-off gain and the input signal power are increased. A modified noise figure measuring method is proposed so that the noise figure accounts for the MPI deriving from the sum of Rayleigh backscattering signal components.

Key words: information optics; fiber Raman amplifiers; noise figure; Rayleigh scattering; multipath interference