

双重瑞利散射导致的多路干涉噪声对光纤喇曼放大器噪声系数的影响

崔 晟^{1,2} 马晓明² 刘劲松³

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 深圳职业技术学院电子通信工程系, 广东, 深圳 518055)

(3 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 在没有对喇曼增益分布做任何假设的情况下, 利用所推导的光纤喇曼放大器噪声系数的解析表达式, 研究了不同光纤长度、不同信号输入功率、不同增益、不同瑞利散射下双重瑞利散射导致的多路干涉噪声对喇曼放大器噪声系数的影响。结果表明随着光纤长度, 信号输入功率、喇曼增益和瑞利散射的增加, 多路干涉噪声对噪声系数的劣化越严重。但通过合理的优化光纤长度、控制喇曼增益可以取得噪声和增益间的最佳平衡。

关键词 光纤喇曼放大器; 噪声系数; 瑞利散射; 多路干涉

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光纤喇曼放大器 (Fiber Raman Amplifier, FRA) 是利用受激喇曼散射效应 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 对信号进行放大的, 因而不需要对光纤进行任何特殊的掺杂, 只要有合适波长的泵浦源就可以对任何波段的信号进行放大。到目前为止, 光纤喇曼放大器已经成为实现高速、大容量, 远距离光波通信最为有效技术手段之一^[1~3]。由于喇曼增益系数较低, 这就意味着光纤喇曼放大器中的增益光纤长度一般超过数公里。由于在这么长光纤内难以做到折射率分布完全一致, 因此瑞利散射效应会造成分布于光纤内各处的反射事件的发生。这样到达接收器的信号光分为两个部分: 直接到达的和由于被多次反射而延迟到达的。平方率探测器中两者之间的非相干叠加就会产生拍频噪声, 即所谓的多路干涉 (Multiple-Path Interference) 噪声。由于超过两次瑞利散射后信号功率很小, 一般只考虑到两次瑞利散射。因而这种类型的噪声也称为双重瑞利散射 (Double Rayleigh Scattering, DRS) 导致的多路干涉噪声, 这里简称为 DRS 噪声。DRS 噪声在增益光纤中来回反射得到了两次放大, 因而其功率比传统光波通信系统中的 DRS 噪声大得多, 成为限制光纤喇曼放大器性能的主要噪声之一^[4~7]。

本文首先推导出光纤喇曼放大器噪声系数 (Noise Figure, NF) 的解析表达式, 然后利用其研究 DRS 噪声对光纤喇曼放大器噪声系数的影响。以

前也有文献给出过光纤喇曼放大器噪声系数的解析表达式, 但仅仅考虑了放大的自发喇曼散射 (Amplified Raman Spontaneous Scattering) 噪声^[4~6]。或者仅仅在增益均匀分布的假设条件下考察了 DRS 噪声的对噪声系数的影响^[7], 其计算误差较大。本文在推导噪声系数的解析表达式时没有对增益的分布做任何假设, 并且同时考虑了放大的自发喇曼散射噪声 (包括其瑞利背向散射部分) 和 DRS 噪声, 以及 DRS 偏振特性和功率谱特性, 其计算精度高于同类文献^[4~7]提出的方法。

1 DRS 噪声功率的计算

如图 1, 假设信号的第一次和第二次瑞利散射

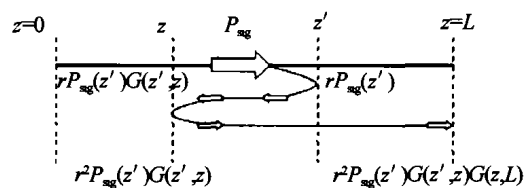


图 1 DRS 噪声功率的计算

Fig. 1 Calculation of DRS noise power

分别发生在 z' 和 z 处, 则 z 处得到总的一次反射信号功率为

$$\int_z^L P_{sig}(z') r G(z', z) dz' \quad (1)$$

式中 $G(z, z')$ 代表信号从 z 到 z' 点所获的净增益, $r = \gamma S$ 代表瑞利反射率 (Rayleigh reflection rate), 其中 γ 为瑞利散射损耗系数 (Rayleigh scattering loss factor), S 为瑞利散射背向俘获因子 (recapture factor)^[6]。对整个光纤路径积分即得到光纤输出端 L 处总的二次反射信号功率为

$$P_{DRB} = \int_0^L r \left[\int_z^L P_{sig}(z') r G(z', z) dz' \right] G(z, L) dz \quad (2)$$

再将 $P_{\text{sig}}(z) = P_{\text{sig}} G(0, z)$, $G(z, z') = G(0, z')/G(0, z)$ ($z' > z$) 代入式(2)得到

$$P_{\text{DRB}} = \int_0^L r \left[\int_z^L P_{\text{sig}} G(0, z') r \frac{G(0, z')}{G(0, z)} dz' \right] \frac{G(0, L)}{G(0, z)} dz = P_{\text{sig}} G(0, L) r^2 \int_0^L G(0, z)^{-2} \int_z^L G(0, z')^2 dz' dz \quad (3)$$

在非饱和放大条件下,当增益光纤较短时,泵浦光功率传输损耗较小. 这时采用增益均匀分布假设是合理的,即增益满足式

$$G(0, z) = e^{gz} \quad (4)$$

式中 g 为增益系数(单位为 1/m). 此时将式(4)代入式(3)可得到 DRB 噪声功率为

$$P_{\text{DRB}} = P_{\text{sig}} G r^2 \left(\frac{e^{2gL} - 2gL - 1}{4g^2} \right) = P_{\text{sig}} G r^2 L^2 \left(\frac{G^2 - 2\ln G - 1}{4(\ln G)^2} \right) \quad (5)$$

当增益光纤较长时,泵浦光功率衰减很大,采用这样的假设会带来较大的计算误差. 此时增益可采用下式描述(后向抽运方式非饱和放大条件下)^[4]

$$G(0, z) = \exp \left[-\alpha_s z + C_R P_{p0} e^{-\alpha_p L} \frac{(e^{\alpha_p z} - 1)}{\alpha_p} \right] \quad (6)$$

式中 $\alpha_{s,p}$ 分别为信号和泵浦光波长处光纤损耗系数, C_R 为喇曼增益系数, P_{p0} 为泵浦功率. 假设 $\alpha_s \approx \alpha_p \approx \alpha$, 将式(6)代入式(3)式后得 DRB 噪声功率为^[9]

$$P_{\text{DRB}} = P_{\text{sig}} G_{\text{on-off}} e^{-\alpha L} \frac{r^2}{\alpha^2 A} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{A} \right] \left[(1+A) - G_{\text{on-off}}^2 e^{-2\alpha L} (1+Ae^{\alpha L}) + \frac{A^2}{e^A} (Ei(Ae^{\alpha L}) - Ei(A)) \right] - (1 - e^{-\alpha L}) \left[1 + \frac{1+e^{-\alpha L}}{2A} \right] \right\} \quad (7)$$

式中 $G_{\text{on-off}}$ 为开关增益. $A = 2C_R P_{p0} e^{-\alpha L} / \alpha$, $Ei(x) = \int_{-\infty}^x (e^u / u) / du$. 在 α_s, α_p 相差较大时取 $\alpha = (\alpha_s + \alpha_p) / 2$.

2 光纤喇曼放大器噪声系数的解析表达式

光接收机输出的总噪声功率为

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2 + \sigma_{\text{sig-sp}}^2 + \sigma_{\text{sp-sp}}^2 + \sigma_{\text{sig-DRS}}^2 + \sigma_{\text{DRS-DRS}}^2 \quad (8)$$

式中 σ_{shot}^2 代表散粒噪声, σ_{th}^2 代表热噪声, $\sigma_{\text{sig-sp}}, \sigma_{\text{sp-sp}}, \sigma_{\text{sig-DRS}}, \sigma_{\text{DRS-DRS}}$ 分布代表信号和放大的自发喇曼散射间的,放大的自发喇曼散射间的,信号和 DRS 间的,DRS 间的拍频噪声. 其中 $\sigma_{\text{th}, \text{sp-sp}, \text{DRS-DRS}}$ 比较小,可以忽略. 因而噪声系数为

$$NF = \frac{1}{G} \left(\frac{\sigma_{\text{sig-sp}}^2}{\sigma_{\text{shot}}^2} + \frac{\sigma_{\text{sig-DRB}}^2}{\sigma_{\text{shot}}^2} + 1 \right) \quad (9)$$

对于分布式光纤喇曼放大器(Distributed Raman Amplifier, 简称 DRA),增益 G 一般取开关增益(on-off gain),此时的 NF 称为等效噪声系数,其数值可

能低于量子极限 3 dB^[5-7]. 知道 $\sigma_{\text{sig-sp}}^2 / \sigma_{\text{shot}}^2 = 2P_{\text{sp}} / h\nu B_o$ ^[10], 其中 P_{sp} 为放大的自发喇曼散射噪声功率, B_o 为光滤波器带宽. 对于后向抽运的 FRA 可得^[4,6,7]

$$\frac{\sigma_{\text{sig-ASE}}^2}{\sigma_{\text{shot}}^2} = \frac{2P_{\text{sp}}}{h\nu B_o} = 2q^{-(\alpha_s/\alpha_p)} \exp(q) \left\{ P \left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, q \right] - P \left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p}, qe^{-\alpha_p L} \right] \right\} + \frac{2r}{2\alpha_p (1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q)} \exp(2q) \cdot \left[(2q)^{1-(2\alpha_s/\alpha_p)} P \left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, 2q \right) - (2q)^{-q-(\alpha_s/\alpha_p)} \cdot P \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1, 2q \right) \right] \quad (10)$$

其中 $q = C_R P_{p0} / \alpha_p$, $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ 为伽马函数,

$P(a, x) = \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt$ 为不完全伽马函数. 式(10)右边第一项代表忽略瑞利散射下获得的前向传输的 ASE 噪声功率,第二项考虑瑞利散射后增加的前向 ASE 噪声功率. ASE 光的频谱近似于白噪声,而 DRS 光的频谱近似于信号光^[9]. 因而对 $\sigma_{\text{sig-DRB}}^2 / \sigma_{\text{shot}}^2$ 的计算不能套用式(9). 信号和 DRS 的拍频噪声功率的计算需要考虑以下两点:第一,只有与信号光同偏振的 DRS 光(用 P_{DRS} 代表)才对 $\sigma_{\text{sig-DRB}}^2$ 有贡献,并且 $P_{\text{DRS}}^0 = 5P_{\text{DRS}} / 9$ ^[11]. 第二,由于 DRS 光具有与信号近似的频谱, $\sigma_{\text{sig-DRB}}^2$ 的大小实质上取决于信号的调制方式(或信号带宽 B_s)、光滤波器的带宽(B_o)和电滤波器带宽(B_e). 在假设 $B_o \gg \{B_s, B_e\}$ 的情况下有^[12]

$$\frac{\sigma_{\text{sig-DRB}}^2}{\sigma_{\text{shot}}^2} = \frac{\frac{5}{9} P_{\text{DRS}}}{h\nu (B_e^2 + \frac{B_s^2}{2})^{1/2}} \quad (11)$$

至此将式(7)、(10)、(11)代入式(9)即可分别得到光纤喇曼放大器噪声系数的解析表达式(如果将式(7)替换为式(5)则得到的是在增益均匀分布假设下的结果).

3 计算与分析

现在利用本文提出的解析表达式对 DRS 噪声对喇曼放大器噪声系数的影响进行研究. 为了便于和以前的实验测量和数值计算结果加以比较,这里采用的参量同文献[6]、[7]和[13]. 如图 2 为纯硅酸盐芯光纤(SCF)和色散位移光纤(DSF)分布式喇曼放大器($L=100$ km)等效噪声系数随泵浦功率的变化. 图中虚线为文献[6]的计算结果和文献[13]的测量结果,两者均不考虑 DRS 噪声对等效噪声系数的影响. 实线为考虑 DRS 噪声后本文计算结果. 从图中可以看出无论是否考虑 DRS 噪声都存在一

个最优的泵浦功率使得等效噪声系数最小,并且对应于不同的光纤类型有不同的最优泵浦功率. 在泵浦功率较小时 DRS 噪声对等效噪声系数的影响可以忽略(虚实线重合),但随着泵浦功率的增高,DRS 噪声功率不断增加,导致等效噪声系数迅速上升(虚实线分开),并使得最优泵浦功率有所减小.

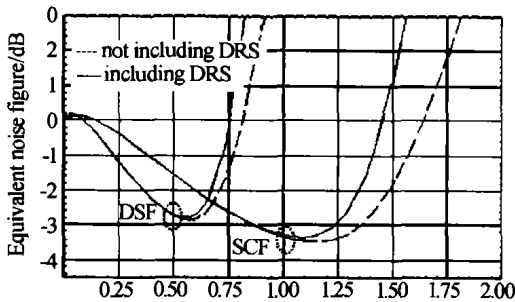


图2 等效噪声系数与泵浦功率的关系
Fig. 2 Equivalent NF versus pump power

图3为分别采用本文提出的方法和文献[7]提出的方法(采用增益均匀分布假设)计算得到的噪声系数随泵浦功率的变化. 其中(a)图中光纤长度为50 km, (b)图中光纤长度为100 km,其余所有参量同图1. 由图中可以看出在光纤长度较短时采用本文方法和采用文献[7]中方法得到的结果十分接近,但光纤较长时两者间差异非常明显. 考虑到较长的增益光纤长度下泵浦光的损耗,放大器中增益分布不可能是均匀的,采用本文提出的噪声系数解析式得到的结果应该比增益均匀假设下的结果更接近于实验测量的结果. 实验测量结果也表明当增益光纤较长时,实际 DRS 噪声功率比增益均匀分布假设下的计算结果要大,而且泵浦功率越高越明显^[9,13],这与图2(b)中的实线和虚线随泵浦功率的变化趋势

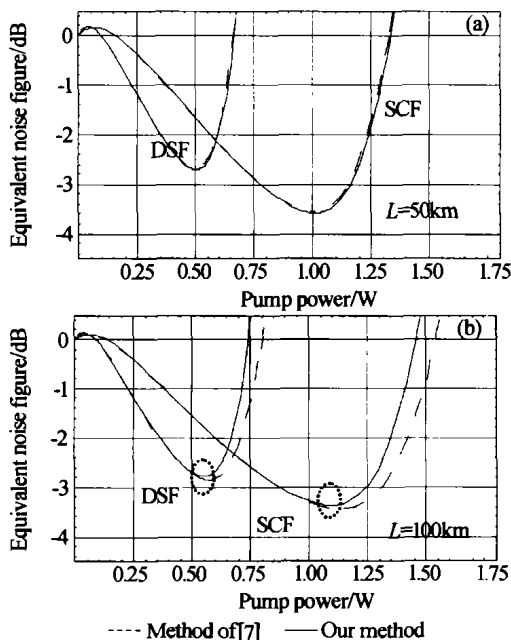


图3 等效噪声系数与泵浦功率的关系曲线
Fig. 3 Equivalent noise figure versus pump power

是一致的.

图4为计算得到色散位移光纤喇曼放大器在不同信号输入功率下,等效噪声系数随开关增益的变化. 其中实线和虚线分别为采用本文方法和文献[7]中方法得到的结果. 点线代表不考虑 DRS 噪声的结果. 图中从左到右信号的输入功率依次为-5, -10 和 -15 dBm. 其它所有参量同图1. 从图中可以看出随着信号功率的增加,DRS 噪声对等效噪声的劣化越严重. 在开关增益为25 dB时当信号功率从-15 dBm增加到-5 dBm时,噪声系数从-2.7 dB上升到0.5 dB. 存在一个最优的增益使得噪声系数最小,超过此增益后 DRS 噪声会导致等效噪声系数迅速上升. 从图中还可以看到文献[7]的结果明显低估了 DRS 噪声的影响. 图5为信号输入功率为-20 dBm,增益为20 dB情况下,集总式色散补偿光纤(DCF)喇曼放大器噪声系数随光纤长度的变化. 色散补偿光纤在泵浦和信号波长处的损耗分别为0.49 dB/km和0.58 dB/km,喇曼增益系数为 $2.3 \times 10^{-3}/(\text{mW})$. 图中实线代表考虑 DRS 噪声,虚线代表不考虑 DRS 噪声. 从上到下三条实(虚)线分别代表瑞利反射率为 $2 \times 10^{-7}/\text{m}$ 、 $1.5 \times 10^{-7}/\text{m}$ 和 $1 \times 10^{-7}/\text{m}$ 时的计算结果. 从图中可以看出当光纤长度较短时,DRS 噪声对噪声系数得影响不大(虚实线基本重合),随着光纤长度的增加,DRS 噪声对噪声系数的劣化越严重(虚实线逐渐分开). 在增益光纤为10 km时噪声系数到达最小值,此时需要的泵浦功率为451.7 mW. 当光纤的瑞利反射率减少 $1 \times 10^{-7}/\text{m}$,可以使得噪声系数下降2dB. 因此在

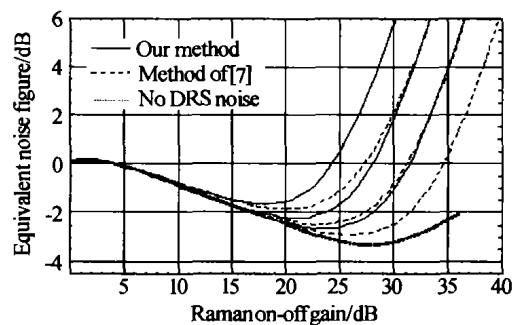


图4 NF与 $G_{\text{on-off}}$ 间的关系曲线
Fig. 4 Equivalent noise figure versus Raman on-off gain

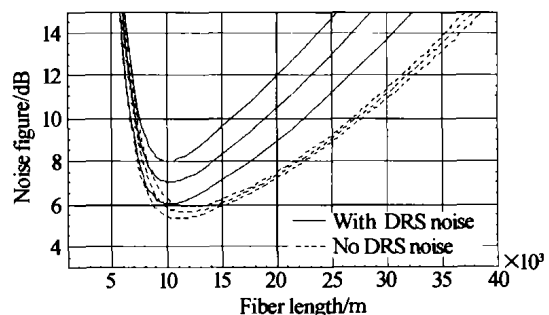


图5 NF与光纤长度的关系曲线
Fig. 5 Noise figure versus fiber length

设计集总式色散补偿光纤喇曼放大器时应该对色散补偿光纤的长度进行适当优化,以保证在补偿特定的色散的同时还具有高增益低噪声系数的特性.如果采用多级放大,第一级应该采用低瑞利散射的光纤,同时在每级间加入隔离器,这样可以有效的降低整个多级放大的噪声系数.

4 结论

本文在推导光纤喇曼放大噪声系数的解析表达式时同时考虑了 ASE 噪声(包括其瑞利背向散射部分)、DRS 噪声(包括其偏振特性和功率谱特性),以及增益的实际分布情况,所得的计算结果相比已有文献更加接近于实验测量的结果.利用本文提出的解析表达式对 FRA 的噪声性能进行了分析.结果表明随着光纤长度,信号输入功率、喇曼增益和瑞利散射的增加,DRS 噪声对噪声系数的劣化越严重.存在最优的增益光纤长度和增益大小可以取得噪声和增益间的最佳平衡.

参考文献

- 1 金尚忠,周文,张在宣. 混合型光纤喇曼放大器增益和带宽的研究. 光子学报, 2004, **33**(4): 428~430
Jin S z, Zhou W, Zhang Z X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 428~430
- 2 陶在红,常建华,孙小茵. 一种新颖的宽节光纤喇曼放大器优化设计方法. 光子学报, 2004, **33**(4): 435~438
Tao Z H, Chang J H, Sun X H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 435~438
- 3 姜海明,王亚非. 光纤喇曼增益系数的简捷测量. 光子学报, 2004, **33**(6): 666~668
Jiang H M, Wang Y F. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 666~668
- 4 Chinn S R. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers. *Electronics Letters*, 1997, **33**(7): 607~608
- 5 Wang S H, Fan C C. Distributed fiber Raman amplifiers: analytical expression of noise characteristics under complex conditions. *Optics Communication*, 2001, **198**: 65~70
- 6 Zhang W, Peng J, Liu X, et al. An analytical expression of equivalent noise figure for distributed fiber Raman amplifiers with Rayleigh scattering. *Optical Communications*, 2001, **198**(1~4): 231~236
- 7 Mei Jinjie, Liu Deming, Huang Dexiu. Impact of multipath interference on noise figure of fiber Raman amplifiers. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 652~655
- 8 Hartog A H, Gold M P. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers. *J Lightwave Technol*, 1984, **2**(2): 76~82
- 9 Parolari P, Marazzi L, Bernardini L, et al. Double Rayleigh scattering noise in lumped and distributed Raman amplifiers. *J Lightwave Technol*, 2003, **21**(10): 2224~2228
- 10 Haus H A. The noise figure of optical amplifiers. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(11): 1602~1604
- 11 van Deventer M O. Polarization properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers. *J Lightwave Technol*, 1993, **11**(3): 1895~1899
- 12 Winzer P J, Essiambre R J, Bromage J. Combined impact of double-Rayleigh backscatter and amplified spontaneous emission on receiver noise. *Proc Optical Fiber Communications Conf*, 2002, **203**(2): 734~735
- 13 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
- 14 Nissov M, Rottwitt K, Kidorf H D, et al. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers. *Electron Lett*, 1999, **35**(12): 997~998

Impact of Double Rayleigh Scattering Induced Multiple-Path Interference on Noise Figure of Fiber Raman Amplifiers

Cui Sheng^{1,2}, Ma Xiaoming², Liu Jinsong³

1 Institute of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071

2 Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055

3 State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2004-04-05

Abstract A more accurate analytical expression for the noise figure of fiber Raman amplifiers is derived. Then the impact of multiple-path interference induced by double Rayleigh scattering on the noise figure of fiber Raman amplifiers is studied. The results show that impact will be more serious when the fiber length, input signal power and Raman gain are increased. But the results also show that if the fiber length is optimized and Raman gain is properly controlled one can achieve the best trade-off between the noise and Raman gain.

Keywords Fiber Raman amplifiers; Noise figure; Rayleigh scattering; Multiple-path interference

Cui Sheng was born in 1976, in China. He received the B. S. and M. S. degrees from Xidian University, Xi'an, China, in 1999 and 2002, respectively. He is currently pursuing Ph. D degree. He has been working on the development of WDM systems. His current research interests are in the field of nonlinear optical amplifiers.

