

文章编号: 0258-7025(2001)12-1108-05

在瑞利散射影响下分布拉曼光纤放大器 噪声特性的解析解和参数优化

张 巍 彭江得 刘小明

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 光纤中的瑞利散射会对分布拉曼光纤放大器的噪声特性产生不利影响。通过忽略高次瑞利后向反射的影响,给出实际情况下(信号损耗不等于抽运损耗,考虑瑞利散射影响)分布拉曼光纤放大器噪声特性的解析解。利用此解析解,对分布拉曼光纤放大器的噪声特性进行了深入讨论并提出了选择抽运功率的一般原则。

关键词 拉曼光纤放大器,预放,瑞利散射,噪声系数

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

An Analytical Expression for the Impact of Rayleigh Scattering on Distributed Fiber Raman Amplifiers

ZHANG Wei PENG Jiang-de LIU Xiao-ming

(*Electronics Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract Rayleigh scattering in the transmission fiber will degrade the noise performance of fiber Raman amplifiers. In this paper, considering the impact of Rayleigh scattering in the transmission fiber, an analytical expression for the equivalent noise figure in a distributed fiber Raman amplifier is derived. This analytical expression is used to analyze the impact of Rayleigh scattering on the noise performance of a distributed fiber Raman amplifier and discuss the rule of pump power selection.

Key words fiber Raman amplifier, preamplifier, Rayleigh scattering, noise figure

1 引 言

近年来,具有宽带、低噪声特性的分布拉曼光纤放大器已经成为新一代光通信系统中的关键技术。与信号光同方向的抽运方式会将抽运光的幅度与偏振不稳定性引入到信号光中,严重影响信号质量^[1,2]。因此目前分布拉曼光纤放大器普遍采用反向抽运,利用分布式拉曼光纤放大器低噪声的特性将它作为接收机或 EDFA 的预放大器。

光纤中的瑞利散射会对分布拉曼放大器的性能产生不利影响:某方向的 ASE 经瑞利散射反射并在相反方向获得拉曼增益,这种对 ASE 的分布式多次反射和放大会引起光信噪比的恶化^[3];同样地,信号光也会经由这种分布式多次反射和放大而对原有信号形成交扰^[4],影响信号的质量。虽然早在 70 年

代就有人注意到瑞利散射有可能会对光纤拉曼放大的噪声特性造成恶化^[5],但是由于拉曼光纤放大器实用条件还不成熟,对这一问题未做深入研究。并且,针对拉曼光纤放大器的定性的理论分析普遍采用信号损耗近似等于抽运损耗的假设,这与实际情况不符。90 年代中期以后,随着光通信系统的进一步发展和大功率拉曼抽运源的出现,分布式拉曼放大器进入实用化阶段。近年来, S. R. Chinn 给出了在信号损耗等于抽运损耗,忽略瑞利散射的条件下分布式拉曼光纤放大器的解析解^[6]。P. B. Hansen 等则利用包含瑞利散射项的描述分布式拉曼预放的微分方程组,通过数值求解发现,考虑到瑞利散射的影响,分布拉曼光纤放大器的抽运功率有一个最优值,当抽运功率超过它时,输出光信噪比将会迅速恶化^[3]。

本文通过忽略高次瑞利散射影响,给出了实际情况下(信号损耗不等于抽运损耗,考虑瑞利散射影

响)分布式拉曼预放噪声特性的解析解,并利用数值解结果来验证此解析解的有效性。本文中還利用此解析解对分布拉曼预放的噪声特性进行了深入讨论并提出了分布拉曼放大器抽运功率选择的原则。

2 微分方程组的解析解

在信号损耗与抽运损耗不相等,并且考虑瑞利散射的实际条件下,描述反向抽运的分布式拉曼预放器正、反向 ASE 的微分方程为^[3,6]

$$\frac{d}{dz}N_s^+(z) = -C_r P_p(z) [N_s^+(z) + 1] + \alpha_s N_s^+(z) - r N_s^-(z) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz}N_s^-(z) = C_r P_p(z) [N_s^-(z) + 1] - \alpha_s N_s^-(z) + r N_s^+(z) \quad (2)$$

$$N_s^+(z) = \left(\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \right)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp \left[\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} z \right] \left[\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1 \right] P \left[\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \exp(-\alpha_p z) \right] \quad (4)$$

$$N_s^-(z) = \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p - \alpha_s + C_r P_p(0)} \exp \left[-\alpha_s z - \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \exp(-\alpha_p z) \right] \exp \left[\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} z \right] \{ 1 - \exp[-(\alpha_p - \alpha_s + C_r P_p(0))z] \} \quad (5)$$

其中 $P(\cdot)$ 为不完全伽马函数。

为研究瑞利散射对分布式拉曼放大器噪声特性的影响,需要在方程(1)(2)中包含瑞利散射项,这样会使方程求解困难。考虑到单位长度瑞利散射作用很弱,在多径反射中,反向 ASE 的第一次前向反射并同信号一起放大而产生的附加噪声是瑞利散射影响的主要成分,故可忽略高次反射而使方程简化,从而得到解析解。求解的过程分为三步:首先,在不考虑瑞利散射情况下求解方程(1),得到在光纤中某

式中 $N_s^\pm(z)$ 为拉曼散射 Stokes 光子数,上标的正、负号分别表示与信号光同向或反向; $C_r P_p(z)$ 是单模光纤单位长度内一个偏振模的自发拉曼散射光子数, $C_r = g_r / b A_{\text{eff}}^{[3]}$, g_r 为光纤中的拉曼增益系数, A_{eff} 为单模光纤的模场面积, b 为表征偏振态影响的一个参数, $b = 1$ 对应抽运光与 Stokes 光完全同偏振, $b = 2$ 对应抽运光与 Stokes 光偏振态完全混乱的情况^[7]; α_s 和 α_p 分别为信号光和抽运光的损耗系数; $r = S \alpha_{rs}$ 为单位光纤长度上信号波长的瑞利反射率^[8], α_{rs} 为单位长度上的瑞利散射损耗, S 为瑞利后向散射俘获系数。 P_p 为反向抽运光功率,将 z 坐标原点选择在抽运注入点,即信号光输出点,忽略 Stokes 光对抽运光的消耗,则 P_p 的衰减规律表述为

$$P_p(z) = P_p(0) \cdot \exp(-\alpha_p z) \quad (3)$$

在忽略瑞利散射项的情况下,按 5,6 的思路方程组(1)~(3)有严格的解析解

$$N_s^+(z) = \left(\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \right)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp \left[\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} z \right] \left[\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1 \right] P \left[\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \exp(-\alpha_p z) \right] \quad (4)$$

$$N_s^-(z) = \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p - \alpha_s + C_r P_p(0)} \exp \left[-\alpha_s z - \frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} \exp(-\alpha_p z) \right] \exp \left[\frac{C_r P_p(0)}{\alpha_p} z \right] \{ 1 - \exp[-(\alpha_p - \alpha_s + C_r P_p(0))z] \} \quad (5)$$

点 ξ 处的反向 ASE 光子数,可以利用(5)式的结果;然后,将此反向 ASE 光子数与单位长度瑞利反射系数 r 相乘,得到 ξ 处反射到正向的 ASE 光子数;最后,用正向自发拉曼散射 Stokes 光子数和反射到正向的 ASE 光子数之和代替正向自发拉曼散射 Stokes 光子数作为 $d\xi$ 段产生的正向 Stokes 光子数。按上述方法求解,得到在信号输出端($z = 0$)的输出 ASE 光子数

$$N_s^+(0) = q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp(q) I \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1 \right) P \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, q \right) + \frac{r}{2\alpha_p \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q \right)} \times \exp(2q) \left[(2q)^{-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} I \left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} \right) P \left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}, 2q \right) - (2q)^{-q-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} I \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1 \right) P \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1, 2q \right) \right] \quad (6)$$

式中定义

$$q = C_r P_p(0) / \alpha_p \quad (7)$$

这是一个描述分布拉曼放大器特性的参数,反映抽运强度和光纤参数的综合作用。式(6)右边第一项是忽略瑞利散射项的正向 ASE 光子数,与(4)式相同。第二项是瑞利散射对 ASE 造成的影响。

分布拉曼预放的等价噪声系数 NF 根据等价分立放大器来定义^[3,4],即

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{P_{\text{ASE}}}{E_{\text{ph}} B_0} \right) = \frac{1 + 2N_s^+(0)}{G} \quad (8)$$

其中 G 为等价分立放大器的增益。 NF 的大小与等价分立放大器输入点的选取有关。当等价输入点选取在信号输出端($z = 0$)时,则 G 代表分布拉曼预放的开关增益: $G = \exp(q)$ 。因为等价分立放大器是物理上不可能实现的,因此等价噪声系数的大小随等效输入点的不同选取而变化,并且可以小于 2

(光放大器量子极限)甚至小于1。

利用(6)和(8)式,可得到分布拉曼放大器等价

$$NF = \exp(-q) + 2q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1\right) P\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, q\right) + \frac{r}{\alpha_p \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q\right)} \times \exp(q) \left[(2q)^{-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} I\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}\right) P\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p} + 1, 2q\right) - (2q)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1\right) P\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + q + 1, 2q\right) \right] \quad (9)$$

为了验证这一解析解的合理性,需要将解析解的结果与数值计算结果进行比较。数值计算利用迭代算法计算微分方程组(1)~(3)结合(8)式得到分布拉曼放大器的等价噪声系数。比较结果如图1,其中信号损耗 $\alpha_s = 0.175$ dB/km,抽运损耗 $\alpha_p = 0.226$ dB/km,单位长度瑞利反射率 r 在图上相应曲线旁标示。比较可见,在相当宽的抽运范围内解析解与数值解相当吻合。但是,当抽运功率过强时数值迭代的算法会不收敛。通过对输出光的计算可以看出此时分布拉曼放大器内由于瑞利散射的反馈作用 ASE 产生了自激形成激光振荡。在实际使用中分布拉曼放大器总要求工作在噪声性能较好的条件下,无需如此高的抽运功率,所以解析解完全可以取代数值解作为分布拉曼放大器的设计依据。从图1的结果可以看出随抽运功率从0逐渐增大,NF从0经开始一段上升之后便随抽运的增强而减小,这是无瑞利散射下分布拉曼放大器等价噪声系数的变化规律;当抽运功率进一步增强时,瑞利散射将逐渐起作用,NF在达到一个最小值后又很快增大,这一规律与文献[3]中的实验规律相符。

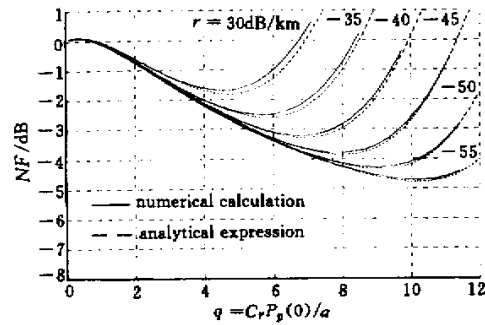


图1 解析解与数值解的比较

Fig.1 Comparison of the analytical expression and the numerical calculation

以上结果表明,由于瑞利散射的影响,分布式拉曼光纤放大器存在一个最优的抽运功率。在此抽运功率下,分布拉曼光纤放大器有最低的等价噪声系

噪声系数的表达式

数。从图1可以看出,当 r 为定值时, NF 的变化规律对应于图1中的某一条曲线,有唯一的最优 q 值。在此 q 值下, C_r 越大, q 值对应的输入抽运功率越小。当 C_r 为定值且 r 有变化时, r 越大,最优的 q 值就越小,相应的最优抽运功率越小,最优的 NF 值也越大。

3 解析解进一步分析

解析解结果(7)(9)两式可以在抽运功率较弱和较强的情况下得到简化。

当抽运功率较弱,即 q 较小时,(7)式主要是第一项的贡献。此时有

$$N_s^+(0) = q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp(-q) I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1\right) P\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, q\right) \quad (10)$$

相应的等价噪声系数公式

$$NF = \exp(-q) + 2q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1\right) P\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1, q\right) \quad (11)$$

这即是忽略瑞利散射项后,微分方程组的解析解。

当抽运较强,即 q 较大时,函数 $P(\dots, q)$, $P(\dots, 2q)$ 均可以近似为1。则有

$$N_s^+(0) = q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \exp(-q) I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1\right) + \frac{r}{\alpha_p} \exp(2q) I(2q) \frac{2\alpha_s}{\alpha_p} I\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}\right) \quad (12)$$

相应的等价噪声系数公式

$$NF = \exp(-q) + 2q^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} I\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_p} + 1\right) + \frac{2r}{\alpha_p} \exp(q) I(2q) \frac{2\alpha_s}{\alpha_p} I\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}\right) \quad (13)$$

图2是利用弱抽运近似解析解(11)式和强抽运近似解析解(13)式计算的等价噪声系数与数值解的比较。其中信号损耗 $\alpha_s = 0.175$ dB/km,抽运损耗 $\alpha_p = 0.226$ dB/km,单位长度瑞利反射率 r 在图上相应曲线旁标示。可以看出两种近似解析解在各自范围内与数值解吻合得很好。

假设信号与抽运损耗相等 ($\alpha_s = \alpha_p = \alpha$) ,解析解可以进一步简化。

当抽运较弱时 (10) 式和 (11) 式分别简化为

$$N_s^+(0) = q^{-1} \exp(q) - (1 + q^{-1}) \quad (14)$$

$$NF = 2q^{-1} - \frac{1 + 2q^{-1}}{\exp(q)} \quad (15)$$

当抽运较强时 (12) 式和 (13) 式分别简化为

$$N_s^+(0) = q^{-1} \exp(q) + \frac{r}{a} \exp(2q) (2q)^{-2} \quad (16)$$

$$NF = \exp(-q) + 2q^{-1} + \frac{2r}{a} (2q)^{-2} \exp(q) \quad (17)$$

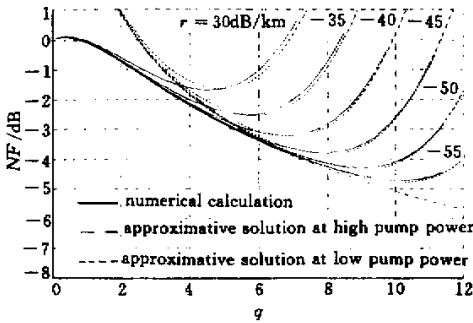


图 2 弱抽运近似和强抽运近似下简化的解析解与数值解的比较

Fig. 2 Comparison of numerical calculation and the approximative expression at high and low pump power

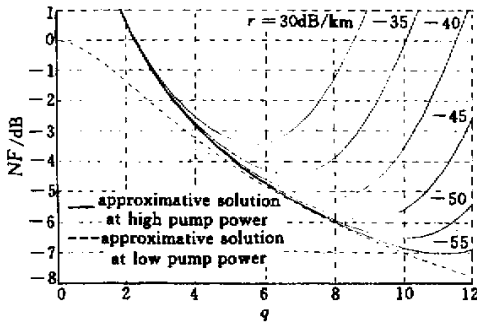


图 3 $\alpha_s = \alpha_p$ 近似下弱抽运和强抽运近似解析解

Fig. 3 Approximative expression at high and low pump power assuming that $\alpha_s = \alpha_p$

图 3 给出在抽运损耗等于信号损耗的假设下 ,弱抽运近似等价噪声系数的解析解 (15) 式和强抽运近似等价噪声系数的解析解 (17) 式的计算曲线 ,其中 $\alpha_s = \alpha_p = 0.2 \text{ dB/km}$,单位长度瑞利反射率 r 值在图上相应的曲线边标示。图中虚线是弱抽运下的

近似解 ,实线是强抽运下的近似解 ,等价噪声系数随抽运功率的变化规律与前述在信号损耗不等于抽运损耗假设下近似解 (11) (13) 得到的结果 (图 2) 一致。但是与图 2 比较可以看出 ,采用抽运损耗等于信号损耗的假设与实际情况相比 ,最优的 q 值偏大 ,最好的等价噪声系数也偏低。因此抽运损耗等于信号损耗的假设仅适用于定性分析 ,在定量计算上采用这一假设会有较大偏差。

4 参数优化

分布拉曼光纤放大器通常用作光接收机或 ED-FA 的预放 ,噪声特性应该是设计中优先考虑的问题 ,这就要求它的抽运功率应该满足最佳 q 值条件。然而 ,分布拉曼预放的开关增益与 q 值有关 ,这说明瑞利散射使分布拉曼预放的增益受到限制。光纤的 r 越小 ,所能达到的噪声特性越好 ,增益也越高。对于给定的瑞利散射系数 ,无论 C_r 的取值多大 ,分布式拉曼预放能达到的最低等价噪声系数和相应的增益总是一定的 ,但 C_r 越小 ,最优的抽运功率越大。因此 ,在分布拉曼预放系统中 ,希望 C_r 较大 ,以使用较低的抽运功率达到最优的噪声和增益特性。

在信号损耗不等于抽运损耗的强抽运情况下 , (13) 式中的负指数项可以忽略 (即等价噪声系数在增益较大时可以近似为 $NF \approx P_{ase} / GE_{ph} B_0 = 2N_s^+(0) / G$) (13) 式经以上近似后求极值得到超越方程

$$\frac{r}{\alpha_p} \Gamma\left(\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}\right) \left[(2q)^{\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} - \frac{4\alpha_s}{\alpha_p} (2q)^{1-\frac{2\alpha_s}{\alpha_p}} \right] \exp(q) - \frac{\alpha_s}{\alpha_p} q^{-1-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} = 0 \quad (18)$$

在信号损耗等于抽运损耗的强抽运条件下 ,由 (17) 式略去负指数项后求极值 ,得到超越方程

$$\frac{4q}{q-2} = \frac{r}{a} \exp(q) \quad (19)$$

数值解超越方程 (18) 或 (19) 可以确定给定传输光纤下的分布拉曼预放器最优的 q 值 ,进而得到最优的抽运功率。图 4 是利用 (18) 式和 (19) 式数值计算得到的最优 q 值随瑞利散射系数变化的规律。可以看出 ,最优 q 值与单位长度的瑞利反射率的分贝数呈近似线性关系。按抽运损耗与信号损耗不相等情况下的解析解 (18) 式计算的最优 q 值与数值计算符合得很好 ,而采用抽运损耗等于信号损耗假设下解析解 (16) 式计算的最优 q 值与数值解差距较大 ,

但定性的曲线趋向是一致的。这进一步说明抽运损耗等于信号损耗假设只适用于定性分析,定量计算会引入较大偏差。

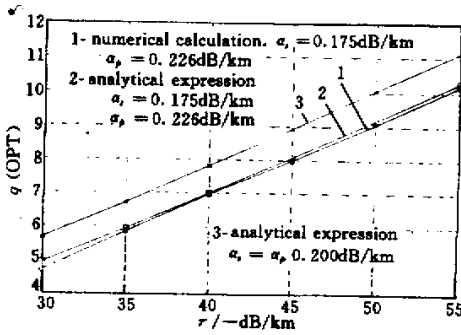


图4 最优等价噪声系数下的 q 值随瑞利反射率变化的规律

Fig.4 Optimal q of distributed Raman preamplifier vs Rayleigh reflection rate per unit length r

综上所述,利用所得的解析解,可以方便地进行分布式拉曼预放器参量的优化设计。在已知传输光纤物理参数的情况下,首先可以通过(18)式计算出最优的 q 值,然后通过(7)(13)(15)式和 $G = \exp(q)$, $q = C_r P_p(0) \gamma \alpha_p$ 得到最优等价噪声系数和相应的增益,并确定抽运功率的最优值。

5 结论

通过忽略高次瑞利后向反射效应,我们得到了分布拉曼放大器输出 ASE 光子数以及等价噪声系数的解析解。在弱抽运和强抽运近似条件下,我们得到了等价噪声系数的简化形式。通过与数值解的比较可以看出该解析解与数值解吻合得很好,可以作为分布拉曼光纤放大器研究与设计的理论指导。通过此解析解,我们对分布拉曼光纤放大器的主要参量(C_r, r)和主要性能指标(G, NF)之间的关系作了理论分析,指出 r 值决定了给定传输光纤下分布拉曼放大器可以达到的最好的等价噪声系数和相应的增益。而在给定 r 的条件下, C_r 决定了最优的抽运功率。最后给出了通过此解析解计算给定传输光纤的最优抽运功率和系统指标的方法。

参考文献

1 A. S. Siddiqui, G. G. Vienne. The effect of pump and signal laser fluctuations on the output signal from Raman and Brillouin optical fiber amplifier. *J. Opt. Comm.*, 1992,

13(1):33~36

- 2 F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy. Bandwidth of cross talk in Raman amplifier. *OFC94*, San Jose, CA, FC6
- 3 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman preamplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(1):159~161
- 4 M. Nissov, K. Rottwitt, H. D. Kidorf *et al.*. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1999, 35(12):997~998
- 5 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1972, 11(11):2489~2494
- 6 S. R. Chinn. Analysis of counter-pumped small-signal fiber Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1997, 33(7):607~608
- 7 R. H. Stolen. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, 15(10):1157~1160
- 8 A. H. Hartog, M. P. Gold. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1984, 2(2):76~82