

文章编号: 0258-7025(2003)06-0537-04

分布光纤拉曼放大器多路干涉的 两种新分析方法

梅进杰, 刘德明, 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 在总结目前存在的分布光纤拉曼放大器瑞利散射噪声性能分析方法的基础上, 提出了两种新分析方法。第一种方法给出一个简单的解析表达式。第二种分析方法是在解析式的基础上进行迭代, 计算精度得到较大提高, 而计算时间大大减少。

关键词 光电子学; 分布光纤拉曼放大器; 多路干涉; 瑞利散射

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Two Novel Methods for Analyzing Multipath Interference in Distributed Fiber Raman Amplifiers

MEI Jin-jie, LIU De-ming, HUANG De-xiu

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

Abstract Based on the summarizing and comparing the analyzing methods in existence for multipath interference (MPI) resulted from backward Rayleigh scattering in distributed fiber Raman amplifiers, two novel methods are presented. A simple analytical expression is developed in the first method. The evolution of optical powers within each step is calculated by a semi-analytical method in the second so that the MPI calculating time can be saved and the precision can be improved.

Key words optoelectronics; distributed fiber Raman amplifiers; multipath interference; Rayleigh scattering

1 引 言

随着高功率抽运激光器技术的成熟, 光纤拉曼放大器(FRA)重新引起人们的极大兴趣。拉曼放大器以传输光纤作为增益介质实现分布放大, 具有高增益、高饱和输出功率、低噪声、宽带宽、工作波长不受限制等特点, 成为下一代超长距离、超大容量密集波分复用系统的关键技术。近来使用 45km 的透明分布拉曼放大器(DFRA)和掺铒光纤放大器(EDFA), 演示了基于 DFRA 的长距离环路传输实验, 在 7200 km 的光纤上传输了 100 Gb/s 的总容量^[1]。用三波长抽运在 1550 nm 窗口实现了将近

100 nm 增益带宽的拉曼放大器^[2]。

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千米量级。在这么长光纤内, 放大器有较大的信号和放大自发辐射(ASE)瑞利背向散射发生。放大器内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^[3~6], 显示多路干涉导致检测后信号的强度噪声, 导致接收机灵敏度的降低。

收稿日期: 2001-11-30; 收到修改稿日期: 2002-05-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划招标项目(2001AA31228Z)。

作者简介: 梅进杰(1970—), 男, 讲师, 华中科技大学光电子工程系博士生, 主要从事 DWDM 光通信系统、宽带光纤放大器的研究与开发。E-mail: jinjiemei@yahoo.com.cn

本文在总结目前存在的瑞利散射噪声性能分析方法的基础上,提出了两种新的分析方法,可以提高计算精度,减少计算时间。通过对 DFRA 内的多路干涉进行重新分析,可以得出一些有用的结论。

2 分析方法比较

分布拉曼放大器内瑞利散射导致的 MPI 定义为放大器输出端瑞利散射噪声功率与信号功率之比。第一种方法^[5]将分布拉曼放大器增益在整个增益光纤长度内作为常数,进行近似,放大光纤输出端 MPI 为

$$\text{MPI} = k^2 \left(\frac{e^{2g_0L} - 2g_0L - 1}{4g_0^2} \right) \quad (1)$$

其中 g_0 为放大光纤平均增益系数, k 为单位长度的瑞利背向散射系数, L 为增益光纤的长度。该近似忽略了瞬态过程和偏振的影响,以及增益光纤中抽运功率的变化。由于分布拉曼放大器增益光纤长度一般为几十千米,抽运功率在如此长光纤内的损耗达到 6 dB 以上,忽略抽运功率的变化,导致计算结果出现较大误差。

为提高计算精度,必须考虑抽运功率的变化,第二种方法直接从信号功率演变的差分等式出发,进行数值模拟^[3]。前向、后向传输功率的差分等式为

$$\begin{aligned} \frac{dP_s^+(z)}{dz} &= C_R P_p(z) P_s^+(z) + k P_s^-(z) - \alpha_s P_s^+(z) \\ \frac{dP_s^-(z)}{dz} &= -C_R P_p(z) P_s^-(z) - k P_s^+(z) + \alpha_s P_s^-(z) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $P_s^+(z)$, $P_s^-(z)$ 分别为前向、后向信号光功率, C_R 为拉曼增益系数,距离 z 处后向抽运功率为 $P_p(z) = P_{p0} e^{-\alpha_p(L-z)}$, α_s , α_p 分别为信号波长、抽运波长处的光纤损耗系数, P_{p0} 为入纤抽运功率。 $+kP_s^-(z)$ 和 $-kP_s^+(z)$ 项来源于瑞利散射。这里忽略了抽运光的瑞利散射。当小信号放大时,信号和噪声功率在任意位置远低于抽运功率,可不考虑抽运谱耗尽。

由于不知道边界条件 $P_s^-(0)$, 解答(2)式需要多级反复迭代,计算时间将相当长。在后面的计算中,忽略两次以上的光散射,仅包括单、双瑞利散射信号和噪声,只得到近似解。

为减少计算时间,第三种方法^[7]将分布拉曼放大器分段处理,给出一个 MPI 近似解的解析表达式。为了近似分析,可将分布拉曼增益光纤分成一个线性损耗段和一个拉曼增益段,如图 1 所示,并假设两段内的损耗和增益都是均匀的。为简化分析,

同样需要忽略两次以上的光散射。拉曼放大器的 MPI 是拉曼增益段内的 MPI_g 与剩余光纤段的 MPI_l 的线性和

$$\text{MPI} = \text{MPI}_g + \text{MPI}_l \quad (3)$$

其中 $\text{MPI}_g = k^2 \left(\frac{e^{2g_0L_g} - 2g_0L_g - 1}{4g_0^2} \right)$, 增益段光纤长度 L_g 就是拉曼光纤有效长度 $L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha_p L}}{\alpha_p}$, 平均增益系数 $g_0 = \frac{G_R}{L_g} - \alpha_s$, G_R 为整个分布放大器的拉曼增益; $\text{MPI}_l = k^2 \left(\frac{e^{2\alpha_s L_l} + 2\alpha_s L_l - 1}{4\alpha_s^2} \right)$, 剩余线性损耗长度 $L_l = L - L_g$ 。

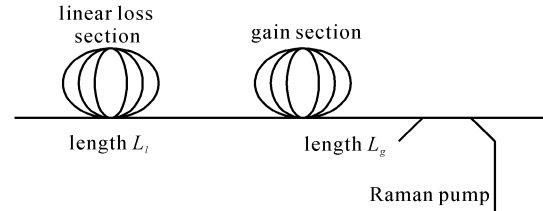


图 1 拉曼光纤分成一段线性损耗区和一段增益区
Fig. 1 Transmission fiber is divided into a linear loss section and a gain section

尽管该方法分段处理,计算精度较第一种方法有所提高,但在增益段内的拉曼增益系数变化依然较大,在增益较小时分段处理将带来更大误差。下面我们寻求一种计算精度进一步提高、而计算时间不是很长的瑞利散射噪声特性分析方法。

3 新方法

瑞利背向散射是分布拉曼光放大器内部无法消除的反馈机理,限制了放大器的性能。(2)式中的前向和后向传输信号光功率可简化为下面的差分等式

$$\begin{aligned} \frac{dP_s^+(z)}{dz} &= g \cdot P_s^+(z) + k \cdot P_s^-(z) \\ -\frac{dP_s^-(z)}{dz} &= g \cdot P_s^-(z) + k \cdot P_s^+(z) \end{aligned} \quad (4)$$

增益系数 $g = C_R P_p(z) - \alpha_s$ 为净拉曼增益减去信号损耗系数。因为 g 随抽运功率沿光纤长度的变化而变化,该等式没有解析解。当增益系数 g 为常数时,可解得

$$\begin{aligned} P_s^+(z) &= \frac{P_s^+(0) \cdot [(q+g) \cdot e^{-q(L-z)} + (q-g) \cdot e^{q(L-z)}]}{(q+g) \cdot e^{-qL} + (q-g) \cdot e^{qL}} \\ P_s^-(z) &= \frac{P_s^-(0) \cdot [-k \cdot e^{-q(L-z)} + k \cdot e^{q(L-z)}]}{(q+g) \cdot e^{-qL} + (q-g) \cdot e^{qL}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $q = \sqrt{g^2 - k^2}$ 。可以借鉴上面的分段处理方法,线性损耗段的 MPI 计算方法不变,增益段内的拉曼增益系数依然平均处理,代入(5)式,即可算出前向信号功率与 MPI 噪声功率和

$$P_s^+(L_g) = \frac{P_s^+(0) \cdot 2q}{(q+g) \cdot e^{-qL_{\text{eff}}} + (q-g) \cdot e^{qL_{\text{eff}}}} \quad (6)$$

增益光纤段输出的信号功率可直接计算

$$P_s(L_g) = \exp(g_R P_{p0} / A_{\text{eff}} - \alpha_s L_{\text{eff}}) \quad (7)$$

则第四种方法得出的增益段 MPI 为

$$\text{MPI}_g = \frac{P_s^+(L_g) - P_s(L_g)}{P_s(L_g)} \quad (8)$$

该方法没有对散射次数作近似,可以预计其计算精度将略高于第三种方法。由于采用了相同的分段近似,这两种方法的计算精度应该相当接近。

要进一步提高计算精度,只有去掉分段近似,且考虑在不同光纤长度处抽运功率的变化。为减少计算时间,在抽运衰减系数很小的前提下,第五种方法使用一小段长度 Δz 内 $P_p(z)$ 的空间平均值来近似,(5)式可解得

$$P_s^+(\Delta z) = \frac{[P_s^+(0) \cdot (q+g) + P_s^-(0) \cdot k]}{2q} \cdot e^{q \cdot \Delta z} + \frac{[P_s^+(0) \cdot (q-g) - P_s^-(0) \cdot k]}{2q} \cdot e^{-q \cdot \Delta z}$$

$$P_s^-(\Delta z) = \frac{[-P_s^+(0) \cdot k + P_s^-(0)(q-g)]}{2q} \cdot e^{q \cdot \Delta z} + \frac{[P_s^+(0) \cdot k + P_s^-(0) \cdot (q+g)]}{2q} \cdot e^{-q \cdot \Delta z} \quad (9)$$

式中 $P_s^+(0), P_s^-(0)$ 为 Δz 光纤输入端前向、后向光功率。只要 Δz 足够小,或者光纤长度 L 分段适当多,则该方法的计算结果精度就足够高。由于该方法的计算只是简单的解析表达式,所以计算时间相对第二种方法大大减小。同第二种方法一样,由于不知道边界条件 $P_s^-(0)$,需要使用 Newton 迭代,Shooting 法等数值方法反复迭代。

4 计算结果

图 2 为当拉曼净增益变化时,用 5 种方法分别计算分布拉曼放大器的 MPI。拉曼增益光纤为 80 km 长的非零色散位移光纤(NZ-DSF),信号与抽运损耗分别为 0.2 dB/km,0.25 dB/km。可以看出,第三、第四种方法的分析结果几乎一致,是由于这两种方法都进行了相同的分段处理。由于图中纵坐标取值较大,无法看出两者的差别,实际上,第三种方

法的结果比第四种稍小。当拉曼增益较小时,都有将近 1 dB 的误差。另外三种方法在小增益时,结果比较一致。由于第一种方法在很长距离内将增益系数作为常数,随着增益的增大,使计算的 MPI 减小。第五种方法忽略的因素最少,计算的 MPI 最精确,也最大,这刚好解释了以前测试的光信噪比与其理论预测值相比偏小^[6]。第二、第三种方法都忽略了两次以上的光散射,在大增益时的计算结果趋于一致。虽然第四种方法也考虑了多次散射,但在增益段内将增益近似为常数,其结果比第五种方法小。所有方法的分析结果都表明,随拉曼增益增加,分布拉曼放大器内的多路干涉都迅速上升,说明增益是导致 MPI 增加的最主要原因。

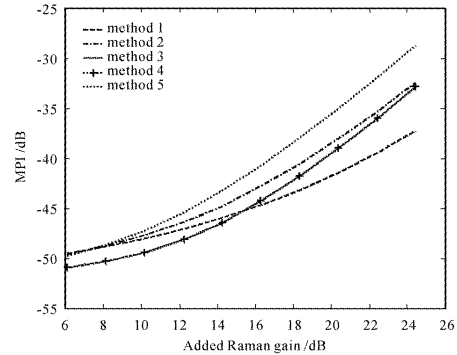


图 2 使用不同方法计算 MPI 的比较
Fig. 2 MPI calculated using five different methods

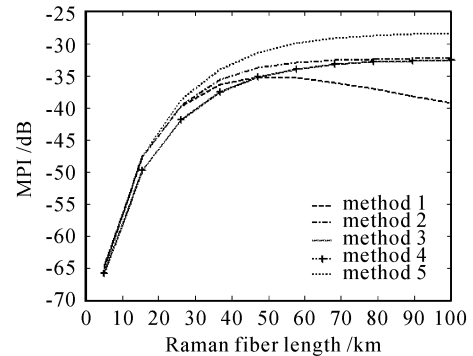


图 3 不同光纤长度时的 MPI 比较
Fig. 3 MPI calculated in various lengths of transmission fiber

图 3 比较了光纤长度变化时的 MPI 计算结果。在光纤长度很短时,拉曼增益比较小,不管如何近似,各种方法计算的 MPI 差异不大。当拉曼光纤较长时,由于各种方法近似程度不同,计算结果差异较大。如同前面所述原因,方法三、四的结果几何相同,且与方法二趋向一致。由方法一的结果可看出,

当光纤长度进一步增加, MPI 逐渐下降, 出现错误的结果。实际情况是, 当拉曼光纤长度进一步增加, MPI 基本保持不变, 这是因为拉曼增益主要集中在有效长度内, 在有效长度外的损耗段, MPI 非常小。所以设计分布拉曼放大器时, 增益超过有效长度, 并不会增加瑞利散射代价。

参 考 文 献

- 1 M. Nissov, C. R. Davidson, K. Rottwitt *et al.*. 100Gb/s (10×10 Gb/s) WDM Transmission over 7200km Using Distributed Raman Amplification [C]. European Conf. Optical Communication, Edinburgh, UK, 1997, Post Deadline Paper:9~12
- 2 S. V. Chernikov, S. A. E. Lewis, J. R. Taylor. Broadband Raman Amplifiers in the Spectral Range of 1480~1620 nm [C]. OFC'99, 1999, Paper WG6:117~119
- 3 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):159~161
- 4 J. L. Gimlett, N. K. Cheung. Effects of phase-to-intensity noise conversion by multiple reflections on gigabit-per-second DFB laser transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(6):888~895
- 5 Ping Wang, J. Conradi. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3):288~297
- 6 S. A. E. Lewis, S. V. Chernikov, J. R. Taylor. Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):528~530
- 7 C. R. S. Fludger, R. J. Mears. Electrical measurements of multipath interference in distributed Raman amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):536~545



本刊增页及更改出版日期启事

近年来, 由于来稿量较多, 而本刊的容量又有限, 为了缩短论文的发表周期, 故从 2004 年第 1 期起, 经上级有关部门批准, 本刊将从原来的 96 面增至 112 面, 出版日期从每月 20 日提前为每月 10 日。特此通知。

《中国激光》编辑部

2003 年 6 月