

文章编号: 0258-7025(2002)07-0635-04

复杂条件下分布光纤拉曼放大器噪声特性的解析表达式

王四海, 范崇澄

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 在同时考虑抽运光和信号光之间不同偏振态、多波长抽运以及抽运光和信号光损耗系数不同的情况下, 导出了分布光纤拉曼放大器(DFRA)的等效噪声系数解析公式, 并据此定量研究了抽运光和信号光之间的偏振关系对 DFRA 特性的影响以及 DFRA 与掺铒光纤放大器(EDFA)级联时系统光信噪比(OSNR)的改善 Δ OSNR。指出: 随着 DFRA 开关增益的增加, Δ OSNR 会由线性增加逐渐变为对数增加而趋于饱和。解析结果与已发表文献的数值模拟结果基本吻合。

关键词 分布光纤拉曼放大器, 等效噪声系数, 光信噪比, 掺铒光纤放大器

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

Analytical Investigation on Noise Characteristics of Distributed Fiber Raman Amplifiers under Complex Conditions

WANG Si-hai, FAN Chong-cheng

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

Abstract Analytical expressions of equivalent noise figure and other noise characteristics of distributed fiber Raman amplifier (DFRA) are derived under complex conditions. These conditions include difference in polarization state and attenuation coefficients between pump and signal light as well as multiple-wavelength pumping. Accordingly, their impact on DFRA performance and optical signal to noise ratio improvement (Δ OSNR) of concatenated DFRA + EDFA is investigated. With increasing DFRA on-off gain, Δ OSNR increases first linearly and then logarithmically, resulting in saturation. Results of this work agree well with numerical simulation of existing work.

Key words distributed fiber Raman amplifier (DFRA), equivalent noise figure, optical signal to noise ratio (OSNR), erbium-doped fiber amplifier (EDFA)

1 引言

密集波分复用(DWDM)+光纤放大器技术是目前光通信系统中提高系统容量最有效的手段。与掺铒光纤放大器(EDFA)相比,光纤拉曼放大器(FRA)可在任意波长上得到宽带放大(仅受限于抽运光波长)^[1],可有效拓展系统传输带宽,特别是分布光纤拉曼放大器(DFRA)可提升系统光信噪比(OSNR)和/或降低信道功率,对于降低高速/超高速系统(信道码率 ≥ 10 Gb/s)的信号功率代价、延长系统通信距离具有重要意义,在近年的高速和/或长距离传输系

统中得到广泛应用^[2]。另一方面,DFRA本身的信号增益、增益平坦度以及单位增益成本等方面与EDFA相比均有较大差距,故在实用上常常是二者配合使用。在EDFA输入端加入反向拉曼抽运,构成DFRA/EDFA串联使用,达到降低系统噪声,提高OSNR,延长系统传输距离等目的。

已有若干相关理论研究了FRA的各种特性^[3-4],但都是在特定假设条件下的结果,有一定的应用局限。本文在同时考虑抽运光和信号光之间偏振因子影响、多波长抽运以及抽运光和信号光

收稿日期 2001-04-27;收到修改稿日期 2001-09-24

作者简介:王四海(1974—)男,清华大学电子工程系博士研究生,主要从事光纤拉曼放大器与DWDM光通信系统方面的研究。E-mail: wangsihai97@mails.tsinghua.edu.cn

(Stokes 光)损耗系数不同的情况下,通过解析方法推导出 DFRA 的等效噪声系数解析公式,引入了一个描述 DFRA 特性的本征参数 加权增益系数 q ,并定量研究了等效噪声系数与偏振因子和加权增益系数的关系。最后,导出了系统 OSNR 的改善与 DFRA 参数的对应关系,据此给出 DFRA 设计的一些基本原则。本文的结论对于 DFRA + EDFA 系统的设计,以及利用 DFRA 对已有 DWDM + EDFA 光通讯系统进行升级扩容,都具有一定意义。

2 理论推导及讨论

与 EDFA 类似, FRA 也有正向抽运和反向抽运之分。由于以传输光纤为基础的 FRA 中不存在亚稳态能级,正向抽运时抽运光的抖动会耦合到信号光上,使其噪声增加,且饱和放大情况下信道之间存在较为严重的串扰^[5]。反向抽运则没有这些缺点,且由于信号光功率在传输光纤中分布较为平均,不会因为功率过高而产生严重的非线性效应影响信号光质量。因此在光纤通信系统中,实际应用的光纤拉曼放大器通常采用反向抽运。

文献[6,7]给出了完备的拉曼放大数学模型,数值模拟结果与实验很好相符,但较为复杂,难以对对比分析各因素对 FRA 特性的不同影响。为了能够解析求解,本模型有如下简化假设:小信号放大(不考虑信号和自发拉曼散射噪声对抽运光的消耗);不考虑抽运光内部及信号光内部的拉曼放大串扰噪声;不考虑 Rayleigh 散射噪声;不考虑自发拉曼散射噪声的温度特性。由于 DFRA 与 EDFA 结合使用时拉曼开关增益并不很大^[8],上述简化对于 DFRA 噪声特性的影响基本可以忽略。事实上,本文解析结果和已发表文献结果十分符合,说明了上述假定的合理性。

设信号光和抽运光在光纤中分别沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传输,可写出基于光功率的耦合方程如下^[3]

$$\frac{dP_{pi}}{dz} = +\alpha_p P_{pi} + \sum_j \left(\frac{g_{ij}}{K} P_{pi} P_{sj} + g_{ji} P_{pi} h\nu_{sj} \Delta\nu \right) \quad (1a)$$

$$\frac{dP_{sj}}{dz} = -\alpha_s P_{sj} + \sum_i \left(\frac{g_{ij}}{K} P_{pi} P_{sj} + g_{ij} P_{pi} h\nu_{sj} \Delta\nu \right) \quad (1b)$$

其中 P_{sj} , α_s 和 P_{pi} , α_p 分别是第 j 模式 Stokes 光(包括信号和放大的自发拉曼散射噪声)和第 i 个抽运光的功率和光纤损耗系数; $h\nu_{sj} \Delta\nu$ 为频率 ν_{sj} 附近 $\Delta\nu$ 带宽内的自发拉曼散射噪声功率; g_{ij} 是第 i 个抽运光

对第 j 模式 Stokes 光的增益系数, $g_{ji} = \frac{\nu_i}{\nu_j} g_{ij}$; $K \in$

$[1, \infty]$ 为抽运光和 Stokes 光之间的偏振因子,同偏振时 $K = 1$,正交偏振时 $K \rightarrow \infty$,偏振态完全混乱时 $K = 2$ 。边界条件为已知 $z = 0$ 处的各 Stokes 光功率 P_{sj0} 和 $z = L$ 处的各抽运光功率 P_{piL} 。

与已有的噪声分析理论相比^[3,4](1)式的改进在于同时考虑了:抽运光和信号光之间偏振因子的影响;抽运光和 Stokes 光损耗系数不等的情况;以及多波长抽运的情况。这使得本文中的理论更加符合实际情况。

在小信号放大的情况下,略去(1a)式中等号右边的第二项,解出抽运光功率在光纤中的分布 $P_{pi} = P_{piL} \exp[\alpha_p(z - L)]$,代入(1b)后可解析求出 Stokes 光在 $z = L$ 的输出

$$P_{sjL} = P_{sj0} \exp(-\alpha_s L) G_{Rj} + N_{Rj} h\nu_j \Delta\nu \quad (2)$$

其中

$$G_{Rj} = \exp\left\{ \frac{q_j}{K} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \right\} \approx \exp\left(\frac{q_j}{K} \right) \quad (3)$$

为拉曼放大的开关增益

$$N_{Rj} = K \exp\left(\frac{q_j}{K} \right) \left(\frac{q_j}{K} \right)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q_j}{K} \right) - \Gamma\left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q_j}{K} \exp(-\alpha_p L) \right] \right\} \quad (4)$$

为放大的自发拉曼散射噪声(ASRS)光子数, $\Gamma(a, z) = \int_0^z t^{a-1} e^{-t} dt$ 为不完全 Gamma 函数。定义

$$q_j = \sum_i g_{ij} P_{piL} / \alpha_p$$

为加权增益系数,综合考虑了抽运光功率和光纤参数的影响。对于 DFRA,传输光纤 L 很大,近似有 $G_{Rj} \approx \exp(q_j/K)$ 。由(3)(4)可知,通过引入加权增益系数 q ,多个抽运波长的作用可简化为单个抽运波长的情况,当然如果抽运光之间的相互作用无法忽略时,这种简化会带来较大误差。当 $K = 1$ 且 $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$ 时(4)式简化为

$$N_{Rj} = G_{Rj} \exp(-\alpha L) - 1 + \frac{1}{q_j} (G_{Rj} - 1)$$

正是文献[9]中的结果。

由(4)式及文献[10]中 DFRA 等效噪声系数(ENF)的一般定义可得

$$\text{ENF} = \frac{1}{G_{Rj}} (1 + N_{Rj}) = \frac{1}{G_{Rj}} \left\{ 1 + K \exp\left(\frac{q_j}{K} \right) \left(\frac{q_j}{K} \right)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \times \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q_j}{K} \right) - \Gamma\left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q_j}{K} \exp(-\alpha_p L) \right] \right\} \right\} \quad (5)$$

由(3)式可以看出, G_{Rj} (dB) 与 q 成正比而与 K 成反比。而 ENF 与 q 和 K 的关系如图 1 所示,计算中的光

纤长度为 100 km,信号光和抽运光损耗分别为 0.21 dB/km 和 0.25 dB/km。从图 1 可以看出,ENF 在 K 比较小时随 q 的增加而升高,在 K 较大时随着 q 的增

曼放大器同样适用。

3 DFRA 对系统 OSNR 改善的影响

一段典型的级联 EDFA 和级联 DFRA/EDFA 光通信系统如图 2 所示。

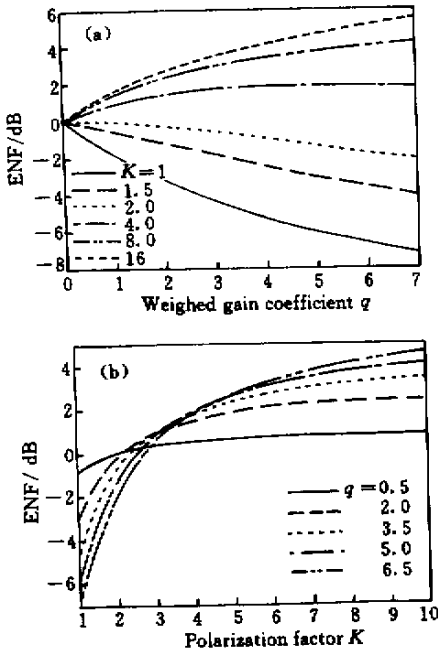


图 1 DFRA 等效噪声系数 ENF 与 K 和 q 的关系

Fig.1 ENF of DFRA as a function of K and q

(a) ENF vs q under different K ; (b) ENF vs K under different q

加反而降低。只有负的 ENF 才会对系统 OSNR 改善起作用,因此必须保持 $K \in [1, 2]$ 。由于在大 q 值下,ENF 对 K 非常敏感,例如当 $q = 3.5$ 而 K 从 1 变化到 2 时,ENF 会从 -5 dB 迅速升高到 -0.7 dB。因此:1) 如果能保持信号光与抽运光之间相同的偏振态 ($K = 1$),对系统性能会有很大的提高;2) 在实际工作中必须注意抽运光与信号光之间偏振态的控制,否则会与理论分析或数值模拟有较大差别。考虑到控制偏振态难以实际应用,为保证 DFRA 的性能及其稳定性,应使偏振态处于完全混乱的状态 ($K = 2$)。这些结论对于分立光纤拉

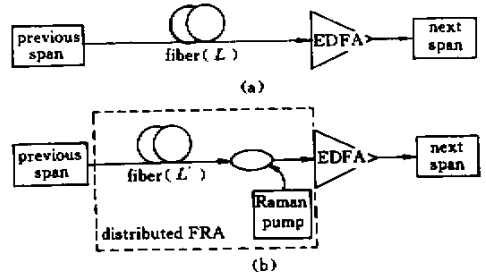


图 2 级联 EDFA (a) 和级联 DFRA/EDFA (b) 系统的示意框图

Fig.2 Schematic diagram of a single span in (a) chained EDFA and (b) chained DFRA/EDFA system

曼放大器 (图 2 (b)) 与图 2 (a) 相比 OSNR 的改善可以解析求解。假设 $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$ 则 (4) 式可简化为 (略去下标 j)

$$N_R = K \left[G_R \exp(-\alpha L) - 1 + \frac{K}{q} (G_R - 1) \right] \quad (6)$$

图 2 (a) 中 EDFA 产生的 ASE 噪声光子数为^[11]

$$N_E = 2n_{sp} (G_E - 1) \quad (7)$$

其中 $G_E = \exp(\alpha L)$ 为 EDFA 的增益 (= 级间损耗), L 为级间光纤长度, n_{sp} 为自发辐射系数。在图 2 (b) 中, $G_E' G_R = G_E$, 且 EDFA 的噪声系数假定不变。DFRA/EDFA 级联之后的输出噪声光子数为 $N_{RE} = N_R G_E' + N_E'$ 。因此

$$\Delta \text{OSNR} = 10 \lg \left(\frac{\text{OSNR}_{RE}}{\text{OSNR}_E} \right) = 10 \lg \left(\frac{N_E}{N_{RE}} \right) = 10 \lg \left(\frac{N_E}{N_R G_E' + N_E'} \right) \quad (8)$$

将 (4) 式和 (7) 式代入 (8) 式, 可得

$$\Delta \text{OSNR} = \begin{cases} 10 \lg \left\{ \frac{2n_{sp} (G_E - 1)}{G_E' K \exp\left(\frac{q}{K}\right) \left(\frac{q}{K}\right)^{-\frac{\alpha_s}{\alpha_p}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q}{K}\right) - \Gamma\left[1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} \frac{q}{K} \exp(-\alpha_p L)\right] \right\} + 2n_{sp} (G_E' - 1)} \right\} & (9) \\ 10 \lg \left\{ \frac{2n_{sp} (G_E - 1)}{G_E' K \left[\frac{G_R}{G_E} - 1 + \frac{K}{q} (G_R - 1) \right] + 2n_{sp} (G_E' - 1)} \right\}, \quad \alpha_s = \alpha_p = \alpha & (10) \end{cases}$$

图 3 为 (9) 式和 (10) 式描述的 ΔOSNR 与 q/K 的关系。其中 $G_E = 25$ dB, EDFA 噪声系数为 6 dB (n_{sp}

≈ 2), $\alpha_s/\alpha_p = 0.75$ 。显然随着 q/K (或者说是 G_R) 的增加 ΔOSNR 会线性增加并逐级转变为对数增加而趋于饱和,该结论可由(10)式的如下进一步简化看出

$$\Delta\text{OSNR}(\text{dB}) \approx \begin{cases} 4.343 \cdot \frac{q}{K}, & \text{low } G_R \\ 10\lg\left(\frac{q}{K}\right) + NF_E, & \text{high } G_R \end{cases}$$

另外,假设信号光和抽运光损耗相等得到的(10)式与精确表达式(9)式的结果相比在增益比较大时相差 1~2 dB,原因是假设抽运光的损耗与信号光相等使得 G_R 与精确值相比偏大。

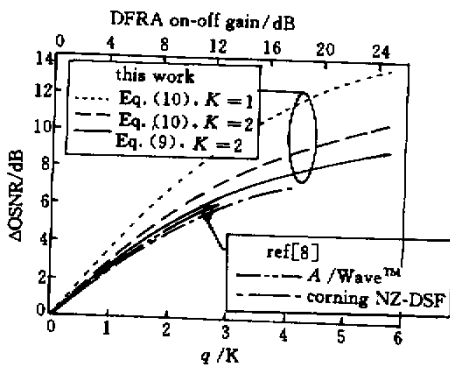


图3 ΔOSNR 与 q/K 的关系

Fig.3 ΔOSNR as a function of q/K

图中还给出了文献[8]中 Allwave 和 Corning NZ-DSF 两种光纤 ΔOSNR 的结果。它们与抽运功率关系的曲线虽然差别很大^[8],但在此图中与 q/K 的关系却基本重合,进一步证明了本文关于 q 是描述 DFRA 特性本征参数的结论。由图 3 还可以看出,在 G_R 为 10 dB 时(9)式计算出的 ΔOSNR 与文献[8]的结果相差小于 0.5 dB,其误差可能由某些系统参数的设置不同有关,例如本文并未考虑 DFRA 与 EDFA 之间的插入损耗。这也验证了本文结果的正确性。

由此可见,虽然利用 DFRA 可改善 OSNR,但 DFRA 对 WDM + EDFA 系统信噪比的改善作用随着 DFRA 开关增益的增加而越来越有限,考虑到 DFRA 抽运效率较低,因此在设计 WDM + DFRA/EDFA 系统时,应利用本文给出的公式得到满足系统性能要求的最小 DFRA 增益。而完全用 DFRA 代替 EDFA 是不划算的。

1)在进行 DFRA 的相关实验时必须处理好抽运光和信号光之间的偏振关系。例如 $q = 4$ ($G_R = 17.4$ dB)时, K 从 1 变化到 2 会使 DFRA 的等效噪声系数恶化约 4.5 dB。2)随着开关增益 G_R 的增加,光信噪比的改善 ΔOSNR 也越来越大; G_R 较小时 ΔOSNR 表现为线性增加(与 q/K 成正比,而与 EDFA 的特性无关),但在 G_R 较大时 ΔOSNR 会趋于饱和(与 q/K 变成对数关系,同时与 EDFA 的噪声系数有关)相同 G_R 下, $K = 1$ 情况下的 ΔOSNR 更大。3)在设计 WDM + DFRA/EDFA 系统时,应利用本文给出的公式得到满足系统性能要求的最小 DFRA 增益,完全用 DFRA 代替 EDFA 是不划算的。

参考文献

- G.P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. 2nd Edition. New York: Academic Press, 1995. 316~319
- Alan Evans. Raman amplification in broadband WDM systems [C]. Optical Fiber Communications (OFC), 2001, TuF4
- M. L. Dakss, P. Melman. Amplified spontaneous Raman scattering and gain in fiber Raman amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(4): 806~813
- Yasuhiro Aoki. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1225~1239
- Fabrizio Forghieri, Robert W. Tkach, Andrew R. Chraplyvy. Bandwidth of cross talk in Raman amplifiers [C]. Optical Fiber Communications (OFC), 1994, FC6
- Howard Kidorf, Karsten Rottwitz, Morten Nissov *et al.*. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 530~532
- Bumki Min, Won Jae Lee, Namkyoo Park. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1486~1488
- Chris Fludger, Andrew Maroney, Nigel Jolley *et al.*. An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibres [C]. Optical Fiber Communications (OFC), 2000, FF2
- E. Desurvire, Michel J. F. Dignonnet, H. J. Shaw. Theory and implementation of a Raman active fiber delay line [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(4): 426~443
- 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
- C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283