

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0415-03

两级串级拉曼光纤放大器

迟荣华 吕可诚 侯国付 黄榜才 李乙钢 吕福云

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

提要: 对两级串级拉曼光纤放大器的两种新的抽运方式进行了数值模拟。在数值模拟的基础上,对相同抽运功率下两种抽运方式的拉曼光纤放大器的增益及噪声特性进行了分析和比较,同时也给出了两种抽运方式获得相同增益所需要的抽运功率。

关键词: 分布式拉曼放大器, 串级拉曼光纤放大器, 增益, 噪声系数

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Two-step Cascaded Raman Fiber Amplifiers

CHI Rong-hua LÜ Ke-cheng HOU Guo-fu HUANG Bang-cai LI Yi-gang LÜ Fu-yun

(Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract The novel two pump configuration of the two-step cascaded Raman fiber amplifiers are numerically simulated. On the basis of simulations, the gain and noise characteristics of two-step cascaded Raman fiber amplifiers of different pump configurations under the same pump powers are analyzed and compared. And the pump powers distribution of the two pump configurations with the same gain are also supplied.

Key words distributed Raman amplifiers, cascaded Raman fiber amplifiers, gain, noise figure

1 引言

分布式拉曼放大器^[1,2]利用传输光纤作为增益介质可以边传输边放大,有效地提高系统性能。传统的分布式拉曼放大器通常是把频差落在拉曼峰值附近的信号光和抽运光同时注入光纤中使信号光在抽运光的一级 Stokes 波位置被放大。但是受激拉曼散射阈值一般很高,通常需要抽运光功率达到瓦的量级。如何降低抽运光功率是人们关心的问题。根据受激拉曼散射的频移规律,Byron 提出一种两级的串级拉曼放大器的结构^[3],就是使信号光(s_2)在抽运光(P)的二级 Stokes 波的位置被放大,同时在一级 Stokes 波(s_1)的位置注入一小的功率,就可以获得较大的增益,这样可以有效的降低直接抽运光(s_1)的功率。

Byron 使用的是信号光 s_2 和两个抽运光 P, s_1 同向传输的抽运方式(方式 1)。本文分析了基于这种串级拉曼放大思想的另外两种抽运方式,并对三种抽运方式(图 1)作了比较,通过使用四阶龙格-库塔方法,求出了信号光和抽运光的耦合方程的数值解,模拟了相同入射功率不同抽运方式下,信号光在长 60 km 的通信光纤中的放大特性。同时求出了获

得相同增益各自所需的功率。模拟发现,2,3 两种抽运方式都可以通过增加抽运光功率,同时减小 s_1 功率的方法来保持较大增益。方式 3 虽然需要较大的 P ,但是通过优化抽运功率可以使放大器的噪声特性得到改善,从而提高传输系统性能。

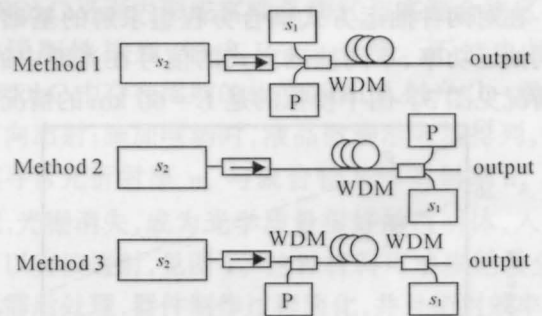


图 1 两级串级拉曼放大器的三种典型抽运方式
Fig. 1 The three configurations of the two-step cascaded Raman fiber amplifiers

2 数值模型

下面给出的是图 1 中方式 2 和 3 两种抽运方式的耦合方程组,其中后两个耦合方程是一样的,第一

个耦合方程只是在符号上有差别,方式 2 取上面的符号,方式 3 取下面的符号。在耦合方程中忽略了高阶 Stokes 波,而且对四波混频,交叉相位调制等其它非线性效应也暂不考虑。

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= \pm \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} \frac{\omega_p}{\omega_s} P_p P_{s1} \pm \alpha_p P_p \\ \frac{dP_{s1}}{dz} &= \mp \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_p P_{s1} - \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} \frac{\omega_{s1}}{\omega_{s2}} P_{s1} P_{s2} + \alpha_{s1} P_{s1} \\ \frac{dP_{s2}}{dz} &= - \frac{g_R}{A_{\text{eff}}} P_{s1} P_{s2} + \alpha_{s2} P_{s2} \end{aligned}$$

耦合方程中, P, α, ω 分别代表抽运光功率、光纤损耗、光频率。其中角标 p, s_1, s_2 分别代表二级抽运光,一级抽运光和信号光。 g_R 为拉曼增益系数, A_{eff} 为光纤有效面积。

通过使用四阶的龙格-库塔方法得到上述耦合方程组的数值解,在 $L = 60 \text{ km}$ 距离内模拟了方式 2 和方式 3 抽运光和信号光的功率演化过程。以方式 3 为例(图 2),图中 P 代表二级抽运光, s_1 代表一级抽运光。模拟中我们选取两个抽运光 $\lambda_p = 1455 \text{ nm}, \lambda_{s1} = 1366 \text{ nm}$, 信号光 $\lambda_{s2} = 1550 \text{ nm}$, 增益光纤为 $G. 652$, 模场直径为 $9 \mu\text{m}$, 拉曼增益系数 $g_R/A_{\text{eff}} = 0.71 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$, 对应 $1366 \text{ nm}, 1455 \text{ nm}, 1550 \text{ nm}$ 波长的衰减常数分别为 $0.33 \text{ dB/km}, 0.25 \text{ dB/km}$, 和 0.2 dB/km 。为了便于比较,图中也同时给出了系统中没有拉曼放大器(without RA)时信号的功率演化情况。

3 不同抽运方式的比较

3.1 相同抽运功率下放大器增益比较

在对两种抽运方式耦合方程组求解的基础上,相同抽运功率、不同抽运方式的信号在光纤中的传输情况见图 3。图中模拟的是 $L = 60 \text{ km}$ 的情况,其

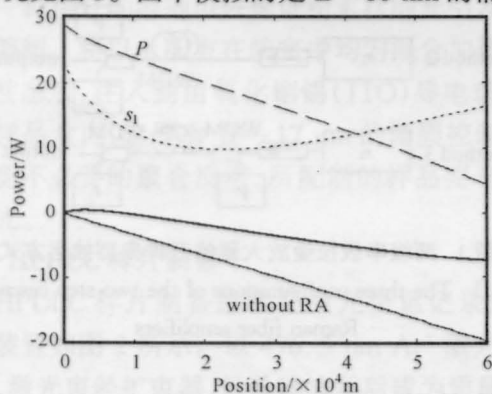


图 2 两级的串级拉曼放大器抽运光和信号光的功率演化
Fig. 2 The power evolution of two cascaded Raman fiber amplifier

中 $P_p = 0.58 \text{ W}, P_{s1} = 0.02 \text{ W}, P_{s2} = 0.001 \text{ W}$ 。从图中可以看出,相同功率抽运下,用方式 1 和方式 2 抽运所得的信号光功率几乎相等,增益亦相近(大约 20 dB),但是用第 3 种抽运方式的增益要小很多,在我们所给功率抽运的情况下,增益只有 10 dB 。

3.2 获得相同增益抽运功率的比较

当信号透明传输时,所需两级的串级拉曼放大器的抽运功率一般有很多种组合。图 4 和图 5 分别给出透明传输($G = 20 \text{ dB}$)时,用方式 3 和方式 2 抽运所需的各种抽运功率组合。从每个图中都可以看出,当二级抽运功率(P_p)增加时,一级抽运功率(P_{s1})就可以减小。但是同时也可以明显看出,方式 2 的一级抽运功率减小的尤为明显。例如,当波长为 1366 nm 的二级泵光功率为 0.58 W 时,欲获得 20 dB 增益,所需要的波长为 1455 nm 的一级抽运光功率为 20 mW ; 获得相同增益,当二级泵光功率为 1.54 W 时,所需的一级抽运光功率只有 $13 \mu\text{W}$ 。

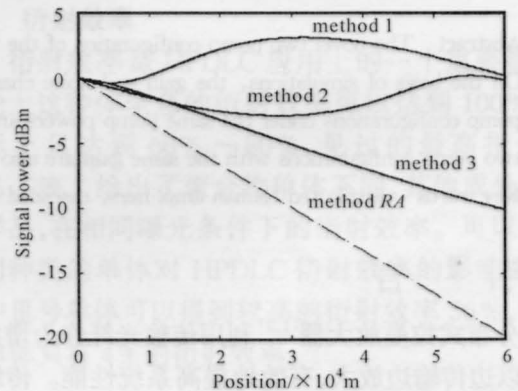


图 3 相同抽运功率下三种抽运方式的比较

Fig. 3 The comparison of three pump configurations under the same pump power

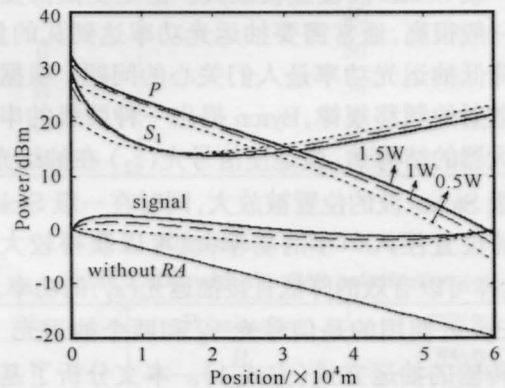


图 4 增益 20 dB 时方式 3 的抽运功率组合

Fig. 4 The pump power distribution of configuration 3 (20 dB).
 $P_p = 1.5 \text{ W}, P_{s1} = 127 \text{ mW}; P_{s2} = 0.001 \text{ W}; P_p = 1 \text{ W}, P_{s1} = 155 \text{ mW}; P_{s2} = 0.001 \text{ W}, P_p = 0.5 \text{ W}, P_{s1} = 194 \text{ mW}; P_{s2} = 0.001 \text{ W}$

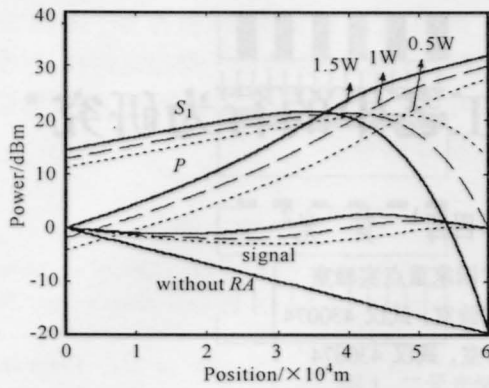


图5 增益 20 dB 时方式 2 的抽运功率组合

Fig. 5 The pump power distribution of configuration 2 (20 dB). $P_p = 0.6$ W, $P_{s1} = 25$ mW; $P_{s2} = 0.001$ W, $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 1$ mW; $P_{s2} = 0.001$ W, $P_p = 1.5$ W, $P_{s1} = 13$ μ W; $P_{s2} = 0.001$ W

3.3 信号涨落和噪声系数的比较

当信号在光纤中传输时,分布式放大器能够把增益较为平均地分配到整个光纤上,这样信号的传输质量就很好,而且没有特别大的涨落,一般不会超过系统总输入功率低于 +17 dBm 的限制。方式 2 和 3 两种抽运方式都可以实现信号涨落很小。图 6(a)模拟了 $L = 60$ km 距离内信号无损透明传输的情况,发现信号涨落最大只有 4 dB。而方式 1 在较短距离以内,

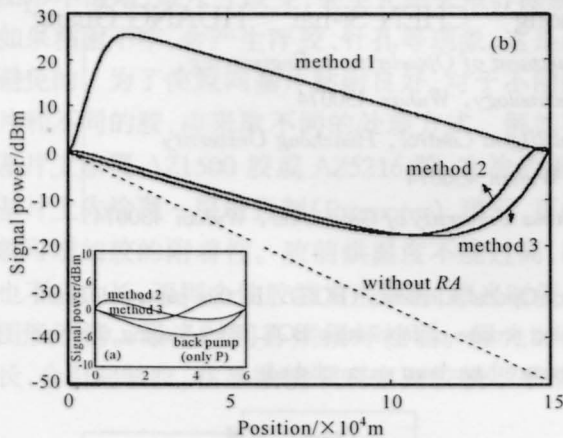


图6 两种抽运方式涨落和噪声系数的比较

Fig. 6 The comparison of signal fluctuation and Noise Figure of the two pump configurations. (a) method 1: $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 0.155$ W; $P_{s2} = 0.001$ W; method 2: $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 0.019$ W; $P_{s2} = 0.001$ W; back pump: $P_p = 0$ W, $P_{s1} = 0.24$ W; $P_{s2} = 0.001$ W; (b) method 1: $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 0.3$ W; $P_{s2} = 0.001$ W; method 2: $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 0.02$ W; $P_{s2} = 0.001$ W; method 3: $P_p = 1$ W, $P_{s1} = 0.55$ W; $P_{s2} = 0.001$ W

能够做到涨落很小,但是当抽运功率升高,放大器的增益分配不均匀,信号涨落很大,有可能超过系统的限制。特别是放大器跨距很大,例如 150 km 时,信号增益在 20 km 以内就能够达到 25 dB 以上[图 6(b)],这种增益分配不均匀的情况可能给系统带来很坏的影响。

其次,噪声系数(Noise Figure)是衡量光放大器的另外一个重要指标。我们知道对信号进行放大时,增益越多的分配到传输光纤前端,噪声系数就越小,放大器的噪声特性就越好。如图 6a 中与方式 2 相比,方式 3 在光纤前端获得增益,放大器的噪声系数相应降低,噪声特性将得到改善。信号在 $L = 80$ km 长度光纤中无损传输时,背向抽运需要波长为 1455 nm 的抽运光功率 300 mW,其噪声系数为 13.5 dB,使用方式 3 抽运时,需要 1366 nm 抽运光功率 800 mW,需要 1455 nm 抽运光功率 200 mW,相应的噪声系数为 10.5 dB,可见噪声系数降低了 3 dB^[4]。方式 1 因为信号光和抽运光之间的串扰,噪声系数比方式 2 还要大。

4 结 论

我们对两级串级拉曼放大器的三种抽运方式做了讨论,并对方式 2 和方式 3 两种新的抽运方式做了模拟和比较。发现对于方式 2,获得相同增益时,当增大二级抽运功率 P 时,一级抽运功率只需要很小的功率,甚至达到 μ W 的量级。而方式 3 的一级抽运功率就没有类似方式 2 那样的明显变化,但是方式 3 由于其在光纤前端获得很大增益的特性,在噪声系数方面有一定优势,使得系统噪声特性得到改善。

参 考 文 献

- 1 M. Nissov, H. N. Poulsen, R. J. Pedersen *et al.*. Improved noise performance in non-return to zero systems by use of distributed fiber amplifiers. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(20): 1905~1906
- 2 C. Fludger, A. Maroney, N. Jolley. An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers. *OFC '2000*, FF2
- 3 K. C. Byron. Investigations of forward pumped two-step Raman amplification in optical fiber. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(9):756~757
- 4 K. Rottwitz, A. Stentz, T. Nielsen *et al.*. Transparent 80 km bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with second order pumping. *OFC '2000*