

文章编号: 0258-7025(2004)05-0599-05

抽运饱和及信道间受激拉曼散射效应对反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的影响

霍轶杰, 张 巍, 彭江得, 刘小明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 在宽带密集波分复用(DWDM)系统中,后向抽运分布式光纤拉曼放大器(B-DFRA)会引入在小信号条件下无需考虑的两种效应:抽运饱和效应(PS)使拉曼增益减小;拉曼放大使信道间受激拉曼散射(SRS)效应增强,产生附加拉曼倾斜效应(ART)。将后向抽运分布式光纤拉曼放大器的增益谱分解为拉曼抽运的放大作用和信道间受激拉曼散射效应产生的倾斜作用,通过对各种工作条件下实际后向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的优化计算,研究了抽运饱和效应和附加拉曼倾斜效应对后向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的影响。计算发现抽运饱和和效应取决于信道输出功率,附加拉曼倾斜效应由信道输入功率和输出功率共同决定,进而通过抽运饱和效应和附加拉曼倾斜效应的大小可以将后向抽运分布式光纤拉曼放大器的工作条件划分为三个区域,并讨论了不同工作条件下后向抽运分布式光纤拉曼放大器的简化分析方法。

关键词 光纤通信技术;光纤拉曼放大器;抽运饱和效应;信道间受激拉曼散射效应

中图分类号 TN 929.11;TN 253 **文献标识码** A

Impact of Pump Saturation and SRS between Channels on B-DFRA Gain Spectrum

HUO Yi-jie, ZHANG Wei, PENG Jiang-de, LIU Xiao-ming

(Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In broad-band density wavelength dense multiplexing (DWDM) systems, there are two effects impacting the gain spectrum of backward pumped distributed fiber Raman amplifier (B-DFRA): pump saturation (PS) reduce Raman gain; Raman amplification produces stimulated Raman scattering (SRS) between channels larger, leading to additional Raman tilt (ART). In this paper, the gain spectrum of a B-DFRA is divided by two contributions: Raman amplification by Raman pump and channel power tilt by SRS between signal channels. By optimization of a B-DFRA in various input signal power condition and gain level, the impacts of PS and ART on the gain spectrum of B-DFRA are analyzed. Calculation shows that PS is dominated by input signal power only; ART is dominated by both input signal power and output signal power. By the results of PS and ART, the work condition of B-DFRA can be divided into three regions. Possible simplification in B-DFRA analysis in each region is discussed.

Key words fiber communication technique; fiber Raman amplifiers; pump saturation; SRS between channels

1 引 言

反向抽运分布式光纤拉曼放大器(B-DFRA)具有良好的噪声特性和较宽的增益谱,已成为新一代光纤通信网络和长距离无中继传输系统中的关键技

术^[1]。目前,利用反向抽运分布式光纤拉曼放大器作为接收机或掺铒光纤放大器(EDFA)的预放大器已经成为一个实用化的发展方向。以往对反向抽运分布式光纤拉曼放大器特性的理论模拟通常都集中于小信号情况下,但在实际的密集波分复用(DWDM)

收稿日期:2003-01-02;收到修改稿日期:2003-03-26

作者简介:霍轶杰(1981—),男,清华大学电子工程系本科毕业,美国马里兰大学博士研究生,主要从事有源和无源光纤器件的研究。E-mail:yjhuo@hotmail.com

系统中,反向抽运分布式光纤拉曼放大器会引入在小信号条件下无需考虑的两种效应:抽运饱和效应(PS)使拉曼增益减小;拉曼放大使信道间受激拉曼散射(SRS)效应增强。本文将反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的成形分解为拉曼抽运产生的光放大和 SRS 所致信道间功率转移而引起的增益谱倾斜,通过对在各种工作条件下实际反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的优化计算,分析抽运饱和效应及 SRS 效应对反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的影响。

2 反向抽运分布式光纤拉曼放大器抽运条件的优化与增益谱的计算

对用于波分复用(WDM)系统的分布式光纤拉曼放大器,要求具有平坦的宽带增益谱。通常采用多个不同波长的抽运光源,并需对抽运波长数、波长的取值及相应的功率进行优化配置,以期获得波动最小的增益谱。

在多波长抽运的反向抽运分布式光纤拉曼放大器中,抽运光和信号光功率随传输距离 z 的变化可用下述方程组描述^[2]

$$\frac{dP_s(z, \lambda)}{dz} = -\alpha(\lambda)P_s(z, \lambda) + \int_{\zeta < \lambda} C_r(\zeta, \lambda)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_s(z, \lambda) - \int_{\zeta > \lambda} C_r(\lambda, \zeta)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_s(z, \lambda) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p(z, \lambda)}{dz} = -\alpha(\lambda)P_p(z, \lambda) + \int_{\zeta < \lambda} C_r(\zeta, \lambda)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_p(z, \lambda) - \int_{\zeta > \lambda} C_r(\lambda, \zeta)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_p(z, \lambda) \quad (2)$$

其中, $P_s(z, \lambda)$ 和 $P_p(z, \lambda)$ 分别为信号光和抽运光功率, $\alpha(\lambda)$ 为光纤的损耗谱, $C_r(\zeta, \lambda)$ 为光纤拉曼系数^[3], ζ 和 λ 为光波波长。

由于抽运光和信号光是反向传输的,所以这个耦合的微分方程组需要多次迭代求解。注意到(1), (2) 式中受激拉曼散射效应与抽运光和信号光的传播方向无关,所以可用输出的抽运光功率作为计算的初值,改写(2)式右端符号得到描述抽运光沿光纤演化规律的新微分方程

$$\frac{dP_p(z, \lambda)}{dz} = \alpha(\lambda)P_p(z, \lambda) + \int_{\zeta < \lambda} C_r(\zeta, \lambda)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_p(z, \lambda) + \int_{\zeta > \lambda} C_r(\lambda, \zeta)[P_s(z, \zeta) + P_p(z, \zeta)]P_p(z, \lambda) \quad (3)$$

在抽运优化程序中,抽运光输出功率作为被优化的变量。因利用(1),(3)式无需正、反传输方向的迭代,故可大大缩短计算时间。待得到最优的抽运光输出功率后,再利用(1),(3)式即可解出实际输入的抽运光功率。最优化算法采用 matlab 中的软件包,既可同时对抽运波长和功率进行优化,也可固定各抽运波长,在不同的输入信号功率和增益水平下对抽运功率进行优化。

为分析抽运饱和效应及受激拉曼散射效应对反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的影响,需分别对有、无抽运情况下大信号(会出现抽运饱和效应等)和小信号放大状态的反向抽运分布式光纤拉曼放大器的增益谱进行计算。

在大信号放大状态下,反向抽运分布式光纤拉曼放大器的净增益 G_{net} 应包含抽运-抽运(P - P),抽运-信号(P - S),信号-信号(S - S)之间的相互作用和光纤的损耗(FL),而忽略信号间 SRS 效应而仅由抽运放大产生的净增益则只含 P - P , P - S 相互作用和 FL 的贡献,用 $G_{\text{net-p}}$ 表示,且可写成

$$G_{\text{net-p}}(\lambda_s) = 4.343 \int_{\lambda_p} C_r(\lambda_p, \lambda_s) \times \int_0^L P_p(\lambda_p, z) dz d\lambda_p - \alpha(\lambda_p)L \quad (4)$$

于是,信道间 SRS 效应对净增益的贡献 G_{SRS} (只含 S - S 相互作用) 则由下式得出

$$G_{\text{SRS}} = G_{\text{net}} - G_{\text{net-p}} \quad (5)$$

图 1 给出四种波长抽运的反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的计算结果(实线);传输光纤为 120 km 激光掺铒放大光纤(LEAF),损耗为 0.215 dB/km(1550 nm), $C_r = 0.51 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (1450 nm);于 C 波段(1529~1561 nm)和 L 波段(1570~

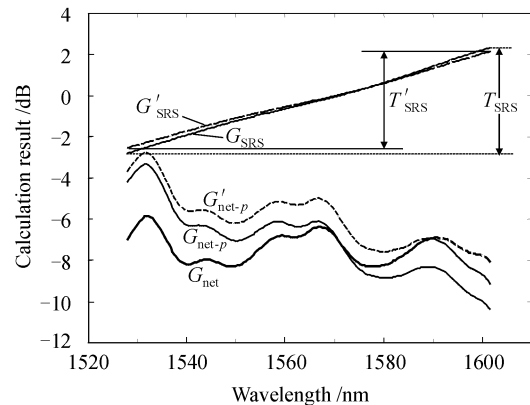


图 1 不同增益水平下四种波长(1425, 1435, 1455, 1485 nm)抽运的分布式光纤拉曼放大器的最佳增益谱
Fig. 1 Optimized gain spectra of four pump wavelength B-DFRA at different gain level (1425/1435/1455/1485 nm)

1602 nm) 各设 80 个信道, 每信道的光功率为 0 dBm, 净增益 G_{net} 为 -8 dB。值得注意的是, 图示表明信道间 SRS 效应对增益谱的贡献 G_{SRS} 呈现从短波长向长波长方向近乎线性增高, 且在短波长和长波长范围内分别有 $G_{SRS} < 0$ 和 $G_{SRS} > 0$, 最长和最短信号波长下 G_{SRS-np} 的差值用 T_{SRS} 表示, 它反映了增益谱的倾斜度。由此可见, 反向抽运分布式光纤拉曼放大器的净增益谱 $G_{net}(\lambda)$ 由抽运光对信号光的净增益 $G_{net-p}(\lambda)$ 和信道间 SRS 效应造成的倾斜增益谱 $G_{SRS}(\lambda)$ 两部分组成。

图 1 中, G_{net-p} 表示相同抽运条件下同一反向抽运分布式光纤拉曼放大器的小信号净增益谱, G'_{net-p} 只含 $P-P, P-S$ 相互作用和 FL 的贡献。在关闭拉曼抽运的情况下, 信道间 SRS 效应对信号功率谱的影响只含 $S-S$ 相互作用, 在图 1 中用 G'_{SRS} 表示。其中, 最长和最短信号波长下 G'_{SRS} 的差值为 T'_{SRS} 。

3 抽运饱和效应与信道间附加 SRS 效应

基于上述对反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的分析, 在大信号和小信号放大两种状态下由抽运放大产生的净增益之差即反映反向抽运分布式光纤拉曼放大器抽运饱和的程度, 表示为

$$\Delta G_{net-p} = \langle G_{net-p}(\lambda) - G'_{net-p}(\lambda) \rangle \quad (6)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示对整个信号光波长范围取平均值。而大信号放大状态下信道间附加的 SRS 的影响则可用打开和关闭拉曼抽运两种情况下信道间 SRS 效应引起的净增益谱倾斜度之差来表示, 即

$$\Delta T_{SRS} = T_{SRS} - T'_{SRS} \quad (7)$$

对四种抽运波长的反向抽运分布式光纤拉曼放大器在不同输入信号功率和净增益下的抽运饱和效应及信道间的附加 SRS 效应进行了计算。传输光纤参量及抽运波长与图 1 相同, 但各抽运功率在各个不同情况下都分别经优化配置。

3.1 抽运饱和效应

图 2 为光纤段长为 120 km 和 80 km 两种情况下的抽运饱和 ΔG_{net-p} 与每个信道输出功率的关系。计算中取输入信号功率 $P_{s, in} = -6, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ dBm/ch, 净增益 $G_{net} = -22, -20, \dots, -2$ dB, 图中每一个数据点都代表一对值 $(P_{s, in}, G_{net})$ 的计算结果。由图可见, 无论 $P_{s, in}$ 和 G_{net} 取何值, 所有数据点几乎均汇集在一条直线上, 说明 ΔG_{net-p} 仅与反向抽运分布式光纤拉曼放大器的信号输出功率有

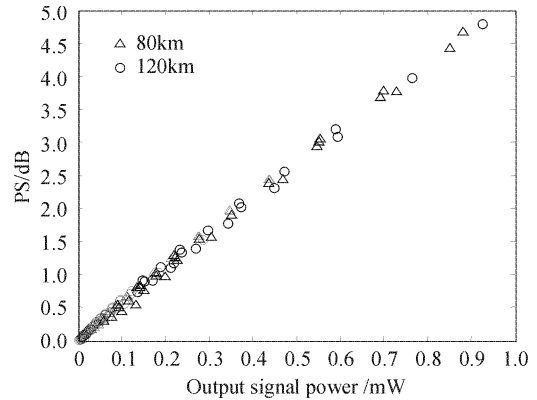


图 2 光纤段长为 80 km 和 120 km 情况下抽运饱和与每个信道输出功率的关系

Fig. 2 Pump saturation vs output power per channel in 80 km and 120 km systems

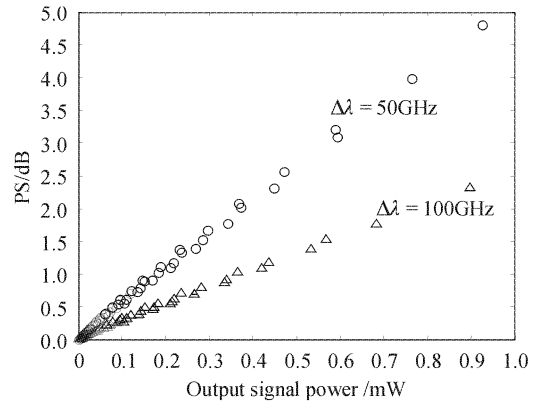


图 3 信道间隔为 50 GHz 和 100 GHz 时, 抽运饱和与每个信道输出功率的关系

Fig. 3 Pump saturation vs output power per channel in 50 GHz and 100 GHz channel spacing systems

关, 且与信道输出功率 (mW/ch) 成正比例关系。这一现象与反向抽运分布式光纤拉曼放大器的增益分布有关。在反向抽运分布式光纤拉曼放大器中, 拉曼放大效应及其造成的抽运消耗均主要集中在近输出端的传输光纤段内, 信道输出功率越大, 抽运消耗越大, 则抽运饱和越强。图 3 分别是 160 信道, 信道间隔为 50 GHz 和 80 信道, 信道间隔 100 GHz 时光纤段长 120 km 的反向抽运分布式光纤拉曼放大器的 ΔG_{net} 与信道输出功率的关系。可以看出, 在信道输出功率 (mW/ch) 相同的条件下信号间隔为 100 GHz 系统的 ΔG_{net-p} 比 50 GHz 系统的小一半。这说明在信道均匀分布且功率相同的情况下, ΔG_{net-p} 取决于信道输出功率。

3.2 信道间附加 SRS 效应

图 4 为光纤段长为 120 km 和 80 km 两种情况

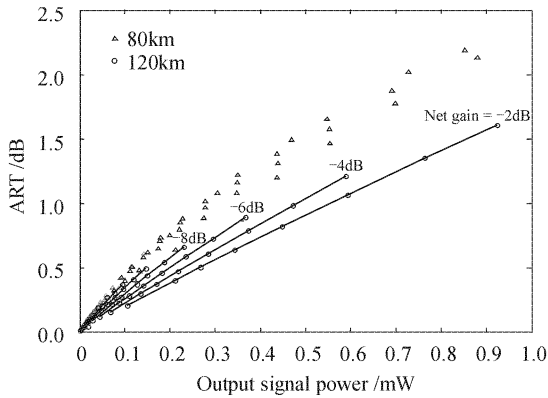


图 4 光纤段长为 80 km 和 120 km 情况下附加 SRS 效应与每个信道输出功率的关系

Fig. 4 Additional SRS effect vs output power per channel in 80 km and 120 km systems

下附加 SRS 效应引起的增益谱倾斜 ΔT_{SRS} 和每个信道输出功率的关系。计算条件与图 2 相同。与图 2 比较可见,两者有很大的差别。首先, ΔT_{SRS} 的取值比 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 要小得多,说明信道间附加 SRS 效应对饱和净增益谱的影响相对较小。另外,虽然 ΔT_{SRS} 也随信道输出功率的增大而增大,这同样是由反向抽运分布式光纤拉曼放大器的增益分布决定的。但与图 2 所示 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 不同的是图 4 中不同 $(P_{s, \text{in}}, G_{\text{net}})$ 取值的 ΔT_{SRS} 数据点比较分散;而且,120 km 光纤段长下的 ΔT_{SRS} 较小,80 km 光纤段长下的 ΔT_{SRS} 较大,两种情况下的 ΔT_{SRS} 并不完全重合。这种差异不难从 SRS 的物理机制来说明,既然信道间的 SRS 是从短波长散射到长波长并沿传输光纤累积发生的,因而近输出光纤段内产生的信道间的附加 SRS 效应将受到两方面的影响:一方面,反向抽运分布式光纤拉曼放大器的净增益一般是负的,近输出光纤段内的信号光功率较小,因此信道间的附加 SRS 效应也较弱;另一方面,在相同的输出信号功率下,附加 SRS 效应的大小由近输出光纤段内信号光功率沿光纤的分布决定,而此分布取决于信号净增益水平。这体现在离散的数据点所具有的精细结构上。以 120 km 的计算结果为例,如图 4 所示,发现具有相同净增益的数据点均落在同一条直线上,净增益越大,附加 SRS 效应随输出信号功率的变化越慢。由此可见,净增益的大小对整个反向抽运分布式光纤拉曼放大器中信道间的附加 SRS 效应有重要影响。对于段长不同的两种情况,在同样的净增益水平和输出信号功率下,120 km 系统反向抽运分布式光纤拉曼放大器中信号光在近输出光纤段的功率水平比

80 km 系统反向抽运分布式光纤拉曼放大器小,因而 ΔT_{SRS} 相对较小。图 5 是信号间隔分别为 50 GHz 和 100 GHz 时光纤段长 120 km 的反向抽运分布式光纤拉曼放大器的 ΔT_{SRS} 与信道输出功率的关系。可以看出,与图 3 类似,在信道输出功率 (mW/ch) 相同的条件下,信道间隔为 100 GHz 系统的 ΔT_{SRS} 比 50 GHz 系统大约小一半。

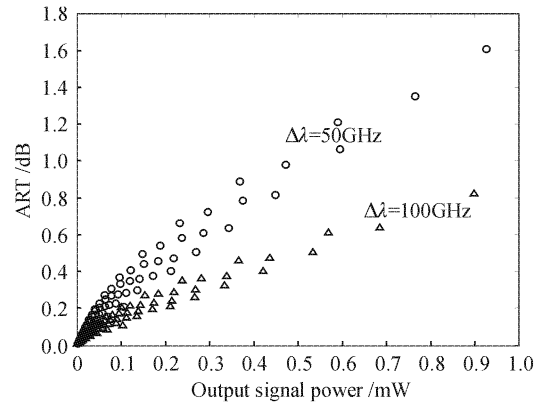


图 5 信道间隔为 50 GHz 和 100 GHz 时,附加 SRS 效应与每个信道输出功率的关系

Fig. 5 Additional SRS effect vs output power per channel in 50 GHz and 100 GHz channel spacing systems

3.3 考虑 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 和 ΔT_{SRS} 的反向抽运分布式光纤拉曼放大器参量设计

鉴于实际反向抽运分布式光纤拉曼放大器通常工作在大信号放大状态,放大系统的参量设计必须考虑抽运饱和效应及信道间 SRS 效应,因而判定受 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 与 ΔT_{SRS} 影响的工作状态范围具有重要意义。

以光纤段长 120 km,输入 160 信道,间隔 50 GHz 的反向抽运分布式光纤拉曼放大器为例,图 6 以净增益和信道输入功率为参量,取 0.5 dB 等高线作为 ΔG_{net} 与 ΔT_{SRS} 出现的边界,给出不同工作状态下反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱受抽运饱和及信道间 SRS 两种效应影响的规律。可以看出,随着净增益和信道输入功率的逐渐增大, $\Delta G_{\text{net-p}}$ 比 ΔT_{SRS} 出现得更早。两条等高线将整个放大器的工作区域分成三部分。在 A 区,反向抽运分布式光纤拉曼放大器工作在小信号状态, $\Delta G_{\text{net-p}}$ 和 ΔT_{SRS} 都可忽略。在计算抽运光随距离的变化时,只需考虑抽运光之间的作用,不必考虑抽运光对信号光放大所造成的能量损失。而考虑信道间 SRS 作用时,也不必考虑拉曼放大带来的影响。在 B 区, ΔT_{SRS} 可以忽略,但是 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 必须考虑。在计算抽运光功率

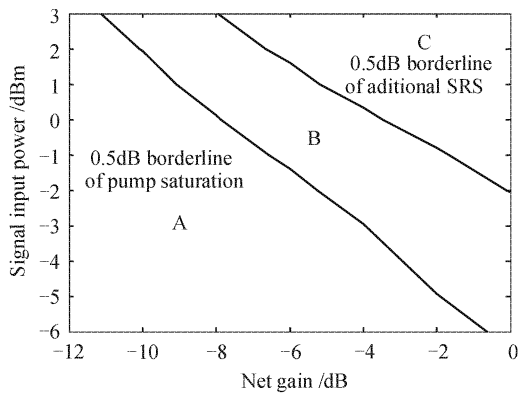


图 6 分布式光纤拉曼放大器抽运功率优化的三个区域
Fig. 6 Three sections in B-DFRA pump optimization

随距离的变化时,必须同时考虑抽运光之间的作用及抽运光对信号光的作用。在 C 区,两种效应都不能忽略。对反向抽运分布式光纤拉曼放大器的分析和设计必须用数值法对(1),(2)所组成的微分方程组求解。

4 结 论

对大信号和小信号工作状态下实际反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱的优化计算和分析表明,反向抽运分布式光纤拉曼放大器的增益谱可分

解为拉曼抽运对信号的放大和信道间 SRS 引起的增益谱倾斜;抽运饱和效应仅与反向抽运分布式光纤拉曼放大器的信道输出功率有关,其 $\Delta G_{\text{net-p}}$ (dB) 值与信道输出功率(mW/ch)成正比例关系;信道间附加的 SRS 效应不仅取决于信道输出功率,而且还受净增益水平的影响, ΔT_{SRS} (dB) 值与信道输出功率并不构成正比关系。最后,以 120 km 光纤段长的反向抽运分布式光纤拉曼放大器为例,取 0.5 dB 等高线作为 $\Delta G_{\text{net-p}}$ 与 ΔT_{SRS} 出现的边界,确定了不同工作状态下反向抽运分布式光纤拉曼放大器增益谱受抽运饱和及信道间 SRS 两种效应影响的规律。对反向抽运分布式光纤拉曼放大器的参量优化设计具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming *et al.*. Improvement of transmission performance of optical communication systems by distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):729~734
张 巍,彭江得,刘小明 等. 分布光纤拉曼放大器对光通信系统传输性能的改善[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):729~734
- 2 Victor E. Perlin, Herber G. Winful. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2):250~254
- 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