

一种新颖的宽带光纤喇曼放大器优化设计方法

陶在红 常建华 孙小菡 张明德

(东南大学 电子工程系, 南京 210096)

摘要 介绍了一种新颖的宽带光纤喇曼放大器的优化设计方法. 通过研究多波长后向泵浦光纤喇曼放大器的传输方程, 分两步来确定各泵浦波的频率及输入功率的大小. 首先通过模拟退火算法迭代出满足条件的泵浦波频率, 然后利用平均功率分析方法, 采用四阶阿当迭代方法计算出各泵浦波输入功率的大小, 从而设计出具有较宽平坦增益带宽的光纤喇曼放大器. 该算法是一种简单有效的优化方法.

关键词 光纤喇曼放大器; 平坦增益带宽; 模拟退火算法; 四阶 AB 方法

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

众所周知, 波分复用(WDM)技术已经成为当今提高信息传输的手段. 然而 WDM 系统需要有光放大器强有力的支持, 以对所有参与复用的波长同时进行直接光放大. 所以高增益带宽的光放大器技术已成为 WDM 系统的关键.

在目前的光网络中普遍使用的是掺铒光纤放大器, 但它的工作窗口较小, 已日渐不能满足更高带宽的需求, 于是伴随着高功率半导体泵浦源的解决, 人们又重新开始研究光纤喇曼放大器(FRA), 由于其特殊的增益机制, 使其具有许多优良的特性, 成为宽带光纤放大器的研究热点. 光纤喇曼放大器是利用受激喇曼散射效应(SRS)以光纤作为增益介质而实现的全光放大器. 从理论上讲, 只要有合适波长的高功率泵浦源, 喇曼放大器就可以放大任意波长的信号^[1].

在实际应用中, 各个波长的信号光应有同等的增益, 所以光放大器增益平坦度是 WDM 系统设计中的一个重要参数. 增益不一致不仅限制了光信噪比, 也将导致各信道的功率不一致, 增加复用输出端的串话. 所以在设计光纤放大器时, 如何实现最好的增益平坦度是研究与设计的关键. 目前主要采用两种方法^[2]: 一种是用 EDFA 与 FRA 相结合的方法; 另一种是利用多波长泵浦的宽带 FRA 的方法. 本文研究多波长后向泵浦 FRA 的宽平坦增益谱的优化设计算法. 即如何确定各泵浦光的频率及输入功率大小, 使所设计的光纤喇曼放大器具有较好的增益平坦度.

目前已有一些优化算法设计宽平坦增益的 FRA, 其中最突出的是利用遗传算法优化 FRA 带宽.

遗传算法是将所求问题的解用二进制数码串表示, 然后基于“适者生存, 优胜劣汰”的进化论基本原则对其进行繁殖、交配、变异等遗传操作. 不断淘汰那些较差的解, 生成更优的解, 从而达到寻优目的. 这种算法不依赖于标准模型, 不需要关于体系的先验知识, 是一种高效的优化方法. 所以利用遗传算法能有效优化 FRA 的带宽. 另外有人将“模拟退火”算法应用到光纤喇曼放大器的优化问题上, 也得到了很好的结果^[3]. 但这两种算法在优化问题上还是有区别的. 遗传算法包括亲本的选择、后代的选择、算法控制流程等, 对整个自由度空间进行了非常彻底地搜索, 计算灵活, 效率也较高, 但为了达到理想的精度, 染色体的总数目需要很大, 这样计算起来就很费时. 有时却不能得到最优解. 模拟退火算法则可以得到全局最优解, 但该算法强烈地依赖“退火速度”和初试条件等参数, 且算法固有的随机性使搜索的效率较低. 而本文则是通过改进“模拟退火”的过程进一步优化光纤喇曼放大器.

1 理论模型

多波长后向泵浦 FRA 的传输方程为^[3]

$$\pm \frac{dP_k}{dz} = -\alpha_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_{v_j}(v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \sum_{j=k+1}^{n+m} \frac{g_{v_k}(v_k - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k \quad (k=1, 2, \dots, n+m) \quad (1)$$

式中, P_k ($k=1, 2, \dots, n$) 是泵浦波的功率, P_k ($k=n+1, n+2, \dots, n+m$) 是信号波的功率, A_{eff} 是光纤的有效面积, K_{eff} 是偏振系数, α_k 是光纤的衰减系数, v_i 是第 i 个波的频率, g_{v_i} 是增益系数, “+”代表信号波, “-”代表泵浦波. 为了分析方便, 假设: 频率按降序排列, 即当 $i < j$ 时, $v_i > v_j$, 并且, 当 $v_j < v_k$ 时, $g_{jk} = -g_{v_k}(v_k - v_j)v_k/v_j K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}$. 而当 $v_j > v_k$ 时, $g_{jk} = g_{v_j}(v_j - v_k)/K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}$.

由以上的假设和条件可得(对信号光而言)

$$\frac{dP_k}{P_k} = (-\alpha_k + \sum_{j=1}^{k-1} g_{jk} P_j + \sum_{j=k+1}^{n+m} g_{jk} P_j) dz \quad (2)$$

两边同时积分得

$$\ln \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = -\alpha_k L + \sum_{j=1}^{k-1} g_{jk} \int_0^L P_j dz + \sum_{j=k+1}^{n+m} g_{jk} \int_0^L P_j dz \quad (3)$$

令 $\int_0^L P_j dz = I_j$, 可得 K 通道信号光的增益为

$$G_k = \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp(-\alpha_k L + \sum_{j=1}^{n+m} g_{jk} I_j) = \exp(-\alpha_k L + \sum_{j=n+1}^{n+m} g_{jk} I_j) \exp(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j) \quad (k=n+1, \dots, n+m) \quad (4)$$

式中, 前一项是光纤损耗及信号光与信号光之间的能量转换, 而后一项则是通道 K 的净增益. 由于信号光相对于泵浦光而言较小, 信号间的相互作用可以忽略不计. 故可以认为前一项 $\exp(-\alpha_k L + \sum_{j=n+1}^{n+m} g_{jk} I_j)$ 是已知的, 记为 A . 系统所需要的增益往往也是已知的, 在此令 $G_k = 1$. 于是由式(4)得

$$\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j = \log(1/A) \quad (5)$$

式中, 对某一通道 k 而言, g_{jk} 与 v_j 有关, 故式(5)便可以看出是一个未知数为 $2n$ 的方程. 未知数分别为 v_1, v_2, \dots, v_n 及 I_1, I_2, \dots, I_n , 其中 $I_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为功率分布的积分. 至此可以看出, 我们所求的问题可以分两步解. 首先要找到一组合适的 v_j 和 I_j , 使式(5)成立. 第二步便是找到一组输入功率 P_p , 使在初始条件为 P_p 的情况下, $P_j(z)$ 的积分近似等于 I_j .

下面就从这两步介绍所用的设计方法:

1) 为了要找到一组满足式(5)的 v_j 和 I_j , 我们采用的是“模拟退火”的优化算法. “模拟退火”算法是一种模拟金属退火过程随机搜索的方法. 首先随机给出一组初始解, 然后通过“模拟退火”的迭代, 找到满足条件的一组解, 从而确定 v_j 和 I_j . 与文献[3]不同的是对目标函数进行了改进. 我们知道所设计的系统必须满足两个条件: 其一是所有通道的增益应满足设计要求; 其二是整体增益波动越小越好. 为了解决这两个问题, 分别用到了各通道的平均值和所有通道的均方根, 平均值越接近设计需求越好, 均方根越小越好. 这便是一个多目标优化问题, 分别对平均值和均方根赋予不同的权重, 从而构造了一个新的目标函数, 对该目标函数进行“模拟退火”的迭代, 就可以得到同时满足两个条件的优化结果. 除了目标函数外, 在新解的产生上也与文献[3]不同. 在定义域范围内, 对前一次解随机扰动产生一个新解, 这种随机选取是先在大部分范围内进行, 后在小范围内进行的, 以便能迅速地找到全局最优解.

2) 在第一步的基础上固定各泵浦的频率不变, 利用 I_j 找出最优化的输入泵浦功率 P_p . 要得到功率的分布, 必须求解传输方程(1), 利用平均功率的分析方法^[4,5]. 首先合理预测一组解, 接着采用四阶 Adams_Bashforth 迭代方法, 求解出各泵浦波在传输路径上的功率分布. 根据所得结果求出其积分值与前面所得的结果比较, 然后经过多次调整, 使功率积分值与 I_j 基本相当, 便可以认为该初始功率即为所求解的泵浦输入功率 P_p .

2 计算结果及分析

采用的单模光纤的有效面积为 $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$, 偏振系数为 $K_{\text{eff}} = 2$, 光纤长度 $L = 50 \text{ km}$, 各信号光的输入功率为 -3 dBm/ch , 采用 50 个信号通道, 通道间隔为 200 GHz, 喇曼增益分布及光纤损耗如图 1 所示.

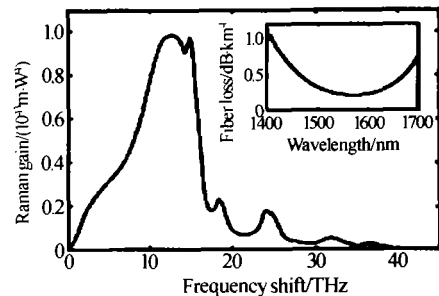


图 1 增益谱曲线及光纤损耗

Fig. 1 Raman gain spectrum. Inset shows linear attenuation spectrum

根据以上的条件, 设计了一个具有 4 个泵浦波的放大器系统, 经过计算可得信号光的净增益如图 2 所示. 各泵浦积分谱的分布如图 3 所示. 图中, $F_{\text{rel}} = \left(\frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{G_{\text{average}}} \right) * 100\%$ 为增益波动. 其中 G_{max} 为计算范围内最大增益值, G_{min} 为计算范围内最小的增益值, G_{average} 为平均增益值. 在同样的条件下, 有人用遗传算法进行了计算, 所得的结果如图 4、图 5.

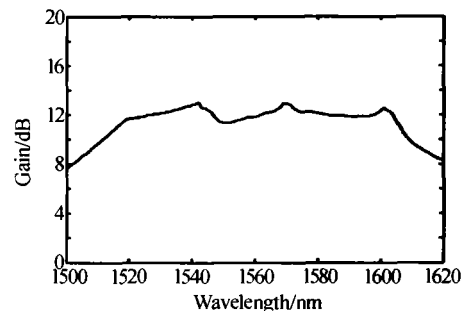


图 2 模拟退火算法得出的增益曲线

Fig. 2 Simulation results of gain profile using simulated annealing algorithm

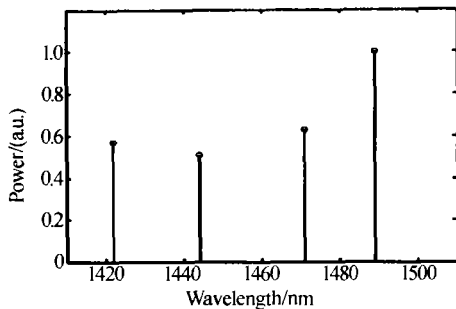


图3 模拟退火优化的积分功率谱

Fig. 3 Optimal integral pump spectra using simulated annealing algorithm

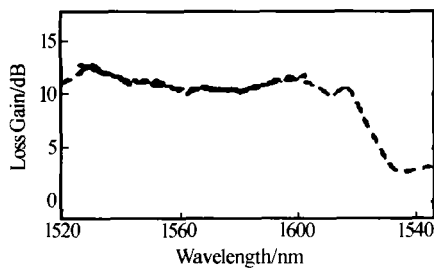


图4 遗传算法得出的增益曲线

Fig. 4 Simulation results of gain profile using genetic algorithm

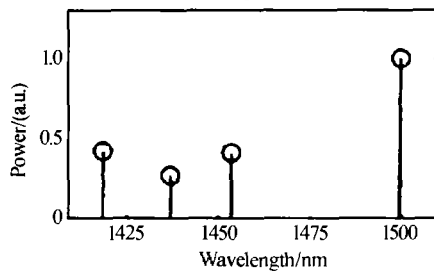


图5 遗传算法优化的积分功率谱

Fig. 5 Optimal integral spectra using genetic algorithm

比较用这两种算法计算所得结果可以看出:两种算法均可得到 80 nm 的平坦增益带宽,其增益不平坦度均小于 1 dB. 可见两算法对于优化 FRA 都是有效的. 但在计算过程中,两者效率不一样. 遗传算法虽然效率高,但有时无法得到最优解,为了得到全局最优解,必须对整个自由度空间进行彻底地搜索,这样就需要采用大量的个体. 而“模拟退火”算法虽然能得到最优解,但效率低,计算时间长. 但可以通过改进温度下降的方法、终止准则、内循环次数以及候选解的产生办法,进一步提高此算法的可用性. 因此在选择算法的同时,还应针对具体问题对算法进行优化,同时提高算法的可行性和效率.

对基于具有 4 个泵浦波的放大器系统进行了第二步计算. 得出了各泵浦波的功率变化,如图 6 所示.

可以看出,频率越高的泵浦波输入功率越大,并且功率变化也越快. 这是由受激喇曼效应造成的,能量从较高频率的波向较低的波转换,既包括从泵

浦波到信号波的转换,也包括从较高频率的泵浦波向较低频率的泵浦波的转换.

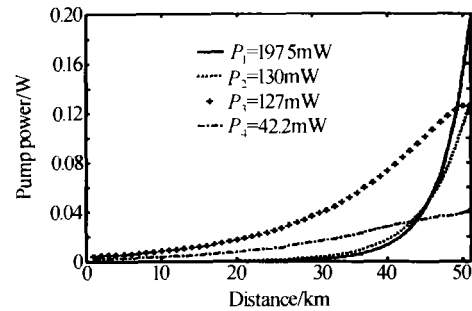


图6 各泵浦功率的变化曲线

Fig. 6 Evolution of pump powers upon propagation through the amplifier

4 结论

用“模拟退火”算法优化 FRA 是一种简单有效的优化设计方法. 当给出系统所需增益的大小以及泵浦个数时,能得出各泵浦波的频率及输入功率的大小,设计出满足所需的具有较宽平坦增益带宽的光纤喇曼放大器.

参考文献

- 童治,魏淮,简水生. 光纤喇曼放大器的特性及其在宽带通信中的应用. 光学技术, 2001, 27(5): 196 ~ 200
Tong Z, Wei H, Jian S S. *Optical Technique*, 2001, 27(5): 196 ~ 200
- 梅进杰,刘德明,黄德修. 宽带增益平坦光纤 RAMAN 放大器的研究进展. 半导体光电, 2001, 22(5): 304 ~ 308
Mei J J, Liu D X, Huang D X. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, 22(5): 304 ~ 308
- Yan Minhui, Chen Jianping, et al. Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifier backward-pumped with multiple laser diode pumps. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 948 ~ 950
- Bumki Min, Won Jae Lee, Namkyoo. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2000, 12(11): 1486 ~ 1488
- Hodgkinson T G. Improved average power analysis technique for erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1992, 4(11): 1273 ~ 1275
- Perlin V E, Winful H G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 250 ~ 254
- Shu Namiki, Emori Y. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(1): 3 ~ 16

A Novel Optimal Design Method for Wide-band Fiber Raman Amplifier

Tao Zaihong, Chang Jianhua, Sun Xiaohan, Zhang Mingde

Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Received date: 2003-05-19

Abstract A novel optimal design method for fiber Raman amplifier is presented. The propagation equations of fiber Raman amplifier back-pumped at multiple wavelengths are solved with two steps. First, the simulated annealing algorithm is used to obtain required pump frequencies; then, by making use of average power analysis technique, the 4-step Adams_Bashforth method is adopted to design fiber Raman amplifiers with optimal gain-flatness and gain-bandwidth performances. This method is simple and efficient to design wide-band fiber Raman amplifier.

Keywords Fiber Raman amplifier; Flattened gain bandwidth; Simulated annealing algorithms; 4-step Adams_Bashforth method



Tao Zaihong received B. S. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1996. She has devoted to researching products of Optical Access Network after graduation. Now she is in Southeast University. Her research mainly includes optical amplifiers.