

# 宽带喇曼放大器的快速优化设计方法

常建华 孙小蕊 张明德

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**摘 要** 介绍了一种改进的宽带分布式多泵浦喇曼放大器(DMRA)优化设计方法. 通过研究多波长后向泵浦的喇曼放大器传输方程, 采用合理的近似得出了快速 DMRA 的一个简化理论分析模型. 通过对模拟退火算法几个优化环节的改进, 使其能够更快速地应用于 DMRA 的多峰值问题的优化设计. 利用该方法重点对 C+L 波段约 80 nm 带宽范围的 DMRA 进行了优化, 在 80 km 传输光纤上, 设计实现了开关增益 10 dB, 相对平坦度小于 0.12, 增益起伏小于 1 dB 的 DMRA. 与其他的 DMRA 设计方法相比, 该方法使用较少的泵浦数目就能获得同样的增益带宽及平坦的谱特性.

**关键词** 分布式多泵浦喇曼放大器(DMRA); 改进的模拟退火算法(ISA); 相对增益波动

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## 0 引言

在波分复用(WDM)系统设计中, 希望各个波长的信号光有同等的增益, 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. 目前已有一些优化算法设计宽平坦增益的 DMRA, 其中绝大部分都是利用遗传算法(GA)优化 DMRA 带宽<sup>[1~3]</sup>. 相对而言利用模拟退火(SA)<sup>[4,5]</sup>进行优化的研究比较少. 与前者比较, SA 更为简单, 且能够在全局范围内进行搜索不容易落入局部最优解. 本文采用模拟退火算法来实现泵浦源的优化, 并从两个方面作了改进: 一是对 SA 算法本身进行了改进, 比如退火方案、新解的产生机制以及迭代过程; 二是针对喇曼放大器的简化模型, 提出了新的目标函数. 从而使得退火算法的速度大为提高, 应用到光纤喇曼放大器的优化问题上取得了比较理想的结果.

## 1 DMRA 的简化模型

影响光纤喇曼放大器性能的因素很多, 如双瑞利散射、自发喇曼散射等. 对于多波长泵浦的 DMRA 的模拟, 考虑到噪声光和反向信号光的功率比信号光的功率约低 40 dB 以上, 因此, 在优化设计 DMRA 时, 可以忽略不计. 我们这里只考虑损耗、信号与泵浦之间的喇曼放大、信号相互作用以及泵浦的相互作用. 本文的优化模型是针对反向泵浦、正向信号的情况<sup>[6~8]</sup>

$$\frac{dP_{pi}}{dz} = \alpha_p P_{pi} + \sum_j g_{ij} \frac{\nu_i}{\nu_j} P_{sj} P_{pi} + \left( \sum_{\nu_i > \nu_m} g_{mi} \frac{\nu_i}{\nu_m} P_{pm} - \sum_{\nu_i < \nu_n} g_{in} P_{pn} \right) P_{pi} \quad (1)$$

$$\frac{dP_{sj}}{dz} = -\alpha_s P_{sj} + \sum_i g_{ij} P_{pi} P_{sj} + \left( \sum_{\nu_j < \nu_m} g_{jm} P_{sm} - \sum_{\nu_j > \nu_n} g_{nj} P_{sn} \right) \quad (2)$$

其中下标 p 和 s 分别表示泵浦和信号光,  $i$  和  $ij$  分别表示第  $i$  个光以及由第  $i$  到第  $j$  个光的耦合,  $g$  是泵浦和 Stokes 光偏振态完全扰乱时的喇曼增益系数<sup>[9,10]</sup>. 式(1)等号右边三项分别表示光纤损耗、信号光对泵浦功率的喇曼消耗以及泵浦光之间的喇曼相互作用; 式(2)等号右边三项则分别表示光纤损耗、泵浦光对信号功率的喇曼增益以及信号光之间的喇曼相互作用. 引入一对广义损耗系数<sup>[7]</sup>

$$\alpha'_{pi} = \alpha_p + \sum_j g_{ij} \frac{\nu_i}{\nu_j} P_{sj} + \left( \sum_{\nu_m < \nu_i} g_{mi} \frac{\nu_i}{\nu_m} P_{pm} - \sum_{\nu_n > \nu_i} g_{in} P_{pn} \right) \quad (3)$$

$$\alpha'_{sj} = \alpha_s - \sum_i g_{ij} P_{pi} + \left( \sum_{\nu_m < \nu_j} g_{mj} P_{sm} - \sum_{\nu_n > \nu_j} g_{nj} P_{sn} \right) \quad (4)$$

假设在迭代步长  $[z_0, z_0 + \Delta z]$  内  $\alpha'_{pi}$  和  $\alpha'_{sj}$  为常数, 则  $P_{sj}^{\pm}(z) = P_{sj0}^{\pm} \exp(-\alpha'_{sj} z)$  和  $P_{pi}(z) = P_{pi0} \exp(\alpha'_{pi} z)$  分布表示 Stokes 光和泵浦光的一阶变化. 因而可以在  $[z_0, z_0 + \Delta z]$  内解析求解得

$$P_{pi}(z_0 + \Delta z) = P_{pi}(z_0) \exp(\alpha_p \Delta z) \cdot \exp \left\{ \sum_j g_{ij} \frac{\nu_i}{\nu_j} (P_{sj}^+(z_0) \frac{1 - \exp(-\alpha'_{sj} \Delta z)}{\alpha_{sj}} + P_{sj}^-(z_0) \frac{\exp(\alpha'_{sj} \Delta z) - 1}{\alpha_{sj}}) \right\} \exp \left\{ \sum_{\nu_m < \nu_i} g_{mi} \frac{\nu_i}{\nu_m} P_{pm}(z_0) \cdot \frac{\exp(\alpha'_{pm} \Delta z) - 1}{\alpha_{pm}} - \sum_{\nu_n > \nu_i} g_{in} P_{pn}(z_0) \frac{\exp(\alpha'_{pn} \Delta z) - 1}{\alpha_{pn}} \right\} \quad (5)$$

$$P_{sj}(z_0 + \Delta z) = P_{sj}(z_0) \exp \left\{ (-\alpha_s \Delta z + \sum_i g_{ij} P_{pi}(z_0) \frac{\exp(\alpha'_{pi} \Delta z) - 1}{\alpha_{pi}}) \right\} \exp \left\{ \sum_{\nu_n < \nu_j} g_{jn} \cdot P_{sn}(z_0) \frac{1 - \exp(-\alpha'_{sn} \Delta z)}{\alpha_{sn}} - \sum_{\nu_m > \nu_j} g_{mj} \cdot P_{sm}(z_0) \frac{1 - \exp(-\alpha'_{sm} \Delta z)}{\alpha_{sm}} \right\} \quad (6)$$

通过引入广义损耗系数, Stokes 光增益和泵浦光的消耗的一阶变化量在迭代步长内成为了  $x$  的简单指数函数, 在迭代步长内的功率演化通过半解析公式求解. 迭代步长可以大大延长而不牺牲计算精度. 对于 DMRA, 采用开关增益 (on-off gain) 定义放大器的增益值, 即

$$G_j = P_{sj}(L) / (P_{sj}(0) \exp(-\alpha_{sj}L)) \quad (7)$$

## 2 优化设计

### 2.1 改进 SA 算法的步骤

SA 算法是一个解决组合优化问题的随机搜索技术. 其出发点是基于物理中的退火过程与一般组合问题之间的相似性. 模拟退火过程从第一个“熔解”开始, 系统处在一个足够高的温度下, 在此温度下几乎所有的随机运动都是可以接受的, 接着温度依据“冷凝”规则慢慢下降. 在每一个温度点必须经过足够长的时间系统才能达到稳定状态, 最终处在能量最低状态. 下面我们具体来说明 SA 算法在解决 DMRA 泵浦光的优化配置问题中的应用.

1) 给出初始化温度值  $T_{\text{begin}}$ , 温度终值  $T_{\text{End}}$ , 随机选择一组初值包括  $n$  个功率值、 $n$  个波长值, 确定内循环抽样稳定性阈值  $N_T$ , 以及目标函数的最低阈值  $\epsilon$ .

2) 新解的产生: 从 1 到  $2n$  个下标中随机选取  $p$  ( $1 \leq p \leq 2n$ ) 个, 设其构成的集合为  $A$ , 则新解的产生如下

$$x_j^{(i+1)} = \begin{cases} x_j^{(j)} \pm rg & j \in A \\ x_j^{(i)} & j \notin A \end{cases} \quad (8)$$

其中  $r$  为 0 到 1 之间的随机数,  $g$  为邻域调整因子, 它决定邻域的衰减步长, 一般来说  $g$  开始取值较大以保证在大邻域搜索, 逐渐衰减, 以便减小搜索范围. 本办法  $g$  拟采取线性函数衰减  $g_{k+1} = ag_k$ ,  $0 < a < 1$ ,  $p$  取值 1, 即每次只改变向量中一个元素 (实践证明这样更容易找到最优解). 在新解的产生过程中, 我们采用了一个约束条件, 即产生的新向量前面的  $n$  个元素必须满足在 1400~1500 nm, 后  $n$  个元素在 10~400 mW 之间, 否则重新产生一组.

3) 新解的接受: 首先计算  $\Delta f = f(x^{(i+1)}) - f(x^{(i)})$ , 然后判断, 如果  $\Delta f \leq 0$ , 接受新解; 否则给出一个服从均匀分布 0 到 1 之间的随机数  $r$ , 计算概率  $P = \exp(-\Delta f/T)$ , 若  $P > r$  则接受, 反之不接受新解.

4) 采用一个记忆装置来记录寻优过程中的最优解  $x^{(\text{opt})}$ , 每接受一个新解都要跟最优解进行比较, 如果优于最优解, 则最优解更新. 为了使得寻优过程能够更快、更准确的找到最优值, 在每一个温度

$T(i)$  下, 每隔一段时间将迭代初值置为当前最优解, 采用这样一个结构能够有效利用退火过程的有用信息, 并且能够影响退火的迭代过程, 大大减少退火时间, 称此方法为记忆指导模拟退火算法 SAMG<sup>[9]</sup>.

5) 在每一个温度  $T(i)$  下, 计算次数是这样确定的, 给出一个变量 SUM 来统计新解的接受次数, 如果有新解优于最优解被接受, 重置 SUM=0; 否则 SUM=SUM+1; 当 SUM  $\geq N_T$  时, 即已经出现  $N_T$  次找不到新解了, 就认为在温度  $T(i)$  下取得了一个稳定状态, 跳出本次内循环.

6) 温度的下降方法: 拟采用最直观的线性函数, 若  $f_{\text{opt}}$  大于某一个给定的值  $f_{\text{opt}}^*$  (根据实际问题凭经验给出), 则按  $T_{k+1} = T_0(1 + \text{delta} * \text{func} - \text{call})$  降温, 否则, 按  $T_{k+1} = \beta T_k$ , 其中  $0 < \beta < 1$ . 终止的准则采用两种判断条件: ① 温度  $T(i) < T_{\text{End}}$ ,  $T_{\text{End}}$  取一个很小的值; ② 采用目标函数作为判别条件, 当目标函数值达到精度要求  $\epsilon$  时停止优化.

### 2.2 SA 目标函数

所设计的系统必须满足两个条件: 其一是所有通道的增益值应该达到预期值; 其二是整体的增益波动应该尽量小. 为了达到最优的设计效果, 对目标函数在文献[1,5]的基础上进行了改进. 采用各个信号通道的均方根以及相对增益波动, 两者之间赋以不同的权重. 采用权重的目的是使得两个优化目标的值成一定的比例, 在优化过程中可以通过合理设置两个权重因子, 以得到更好的优化结果. 实际上这是一个多目标函数的优化问题. 具体表达式如下

$$\text{ripple} = g_1 \frac{1}{\text{expected\_G}}$$

$$+ g_2 \left( \frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{G_{\text{ave}}} \right) \quad (9)$$

式中 ripple 为目标函数,  $g_1, g_2$  是权重, expected\_G 是期望的增益,  $G_{\text{max}}, G_{\text{min}}, G_{\text{ave}}$  分别是信号增益的最大值、最小值以及平均值.  $\frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{G_{\text{ave}}}$  即为相对增益波动.

## 3 数值仿真及其结果

仿真计算时的参数: 信道间隔为 1.2 nm, 每信道的输入功率为 0 dBm, 在 80 km 光纤传输段中的损耗系数为 0.2 dB/km、要求信道的增益为 10 dB, 相对增益波动小于 0.2.

图 1 给出了泵浦为 4、5、6 个时输出端信号的增益谱线. 仿真结果显示随着泵浦数目的增加, 增益

曲线的平坦度有了显著的提高. 在四个泵浦时增益起伏 > 1.5 dB, 6 个泵浦时增益起伏已经 < 0.8 dB, 相对平坦增益度 < 0.12. 理论上只要有足够多的泵浦, 可以获得任意的平坦度的理想增益谱.

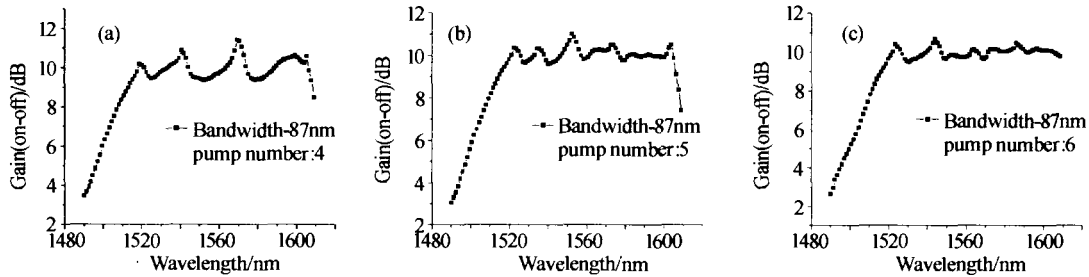


图 1 信号增益谱线  
Fig. 1 Signal gain profiles

图 2、3 是相应各个泵浦, 信号功率沿着传输光纤的功率分布. 由图看出, 泵浦与泵浦、信号与信号以及泵浦和信号之间发生强烈的喇曼散射作用. 短波长信号波在 ≤ 60 km 时损耗远远大于长波长信号

波, 主要受激喇曼散射作用使得高频信号的功率耦合到了低频信号波中. 由于后向泵浦对信号喇曼散射作用使得信号功率在 ≥ 60 km 处又开始回升.

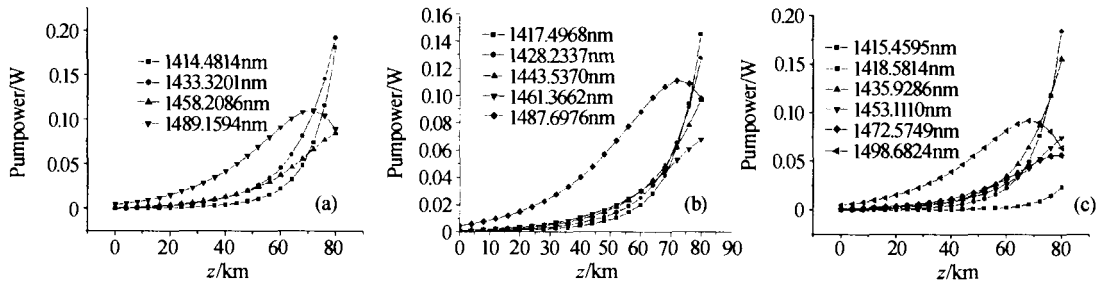


图 2 泵浦功率分布图  
Fig. 2 Evolutions of pump powers upon propagation through the amplifier

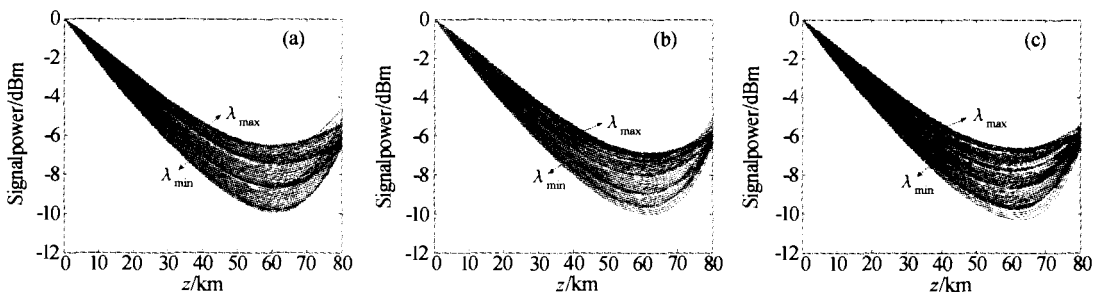


图 3 信号功率分布图  
Fig. 3 Evolutions of signal powers upon propagation through the amplifier

与传统的变步长 SA 法相比较, 本方法具有更快的退火速度. 由于采用了 SAMG 迭代, 使得最优解不仅仅受到退火过程的影响, 同样最优解也反过来影响迭代过程. 这就使得寻优过程不容易落入局部最优解, 而能够在全局范围内找到最优解. 对于目标函数, 本文引入了一个加权求和的机制, 使得可以对多目标寻优. 相对于文献[5], 本文提出的优化算法在同等参数条件下, 找到的泵浦配置更优, 具有更为平坦的增益曲线, 同时增益带宽也有增加.

### 4 结论

DMRA 是一种很有发展潜力的光放大器. 本文介绍的较为有效的泵浦光优化算法具有很强的通用性. 可以任意设置泵浦光的个数、泵浦光波长、功

率范围、信号光的总带宽以及间隔等参数. 对实际应用具有很大的指导意义. 针对 C+L 波动的 80 nm 带宽范围分别采用 4、5、6 个泵浦进行了优化设计, 数值仿真显示其平均开关增益均为 10 dB 左右, 增益波动随着泵浦数目的增加而减小, 在 6 个泵浦时相对增益波动 < 0.12, 具有很好的增益平坦度, 达到了优化目的.

### 参考文献

- 1 Zhou Xiang, Lu Chao, Shun Ping, et al. A simplified model and optimal design of a mutiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier. *Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 945~947
- 2 Liu Xueming, Lee ByoungHo. Optimal design of fiber Raman amplifier based on hybrid genetic algorithm.

- Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(2):428~430
- 3 Liu Xueming, Lee Byoung-ho. Optimal design for ultra-broad-band amplifier. *Lightwave Technology*, 2003, **21**(12):3446~3455
  - 4 Yan Minhui, Chen Jianpin, Jiang Wenning, et al. Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward pumped with multiple laser diode pumps. *Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(9):948~950
  - 5 陶在红, 常建华, 孙小菡, 等. 一种新颖的宽带光纤喇曼放大器的优化设计方法. *光子学报*, 2004, **33**(4):435~438  
Tao Z H, Chang J H, Sun X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):435~438
  - 6 杨先波, 王静娴, 刘德明, 等. 宽平坦增益谱喇曼放大器的优化设计. *光电子技术*, 2003, **23**(2):102~105  
Yang X B, Wang J X, Liu D M, et al. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(2):102~105
  - 7 Wang Sihai, Zhang Lun, Fan Chongcheng. Generalized attenuation coefficients and their application in counter-pumped fiber Raman amplifier simulation. *Communication Technology Proceedings*, 2000. WCC-ICCT 2000, **2**:1550~1553
  - 8 Xiao Pengcheng, Zeng Qingqi, Huang Jun, et al. Simulation analysis of multi-pumped fiber raman amplifier. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1184~1189
  - 9 Liu X M, Lee B. Effective shooting algorithm and its application to fiber amplifiers. *Opt Express*, 2003, **11**(12):1452~1461
  - 10 姜海明, 王亚非. 光纤喇曼增益系数的简捷测量. *光子学报*, 2004, **33**(6):666~668  
Jiang H M, Wang Y F. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):666~668
  - 11 郭照立, 王霞, 陈鹏. 记忆指导的模拟退火算法的研究. *河南农业大学学报*, 1998, **32**(3):288~291  
Guo Z L, Wang X, Chen P. Simulated annealing algorithm with memory guidance. *Acta Agriculture University Henanensis*, 1998, **32**(3):288~291

## A Fast Optimal Design Method for Broadband Raman Amplifiers

Chang Jianhua, Sun Xiaohan, Zhang Mingde

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

Received date:2004-06-28

**Abstract** An improved Simulated Annealing (ISA) method for fast optimizing distributed multi-pump Raman amplifier (DMRA) was presented. A simple algorithm for counter-pumped DMRA was derived through reasonable approximations. The proposed ISA can effectively solve the multimodal optimization including the global and local optima in the DMRA. Optimization results show that, under the conditions of the ON-OFF gain of 10 dB, the relative gain flatness of  $<0.12$  and the fiber haul of 80 km, amplifier bandwidths at larger 80 nm have been achieved with 4, 5 and 6 pumps by using the optimization of the ISA. Comparing with other existing methods, the ISA method can attain a required low gain ripples and larger bandwidth with less pumps.

**Keywords** Distributed multi-pump Raman amplifier (DMRA); Improved Simulated Annealing (ISA); Relative gain flatness



**Chang Jianhua** received his B. E. degree in 2000 from the Department of Electronic Engineering Southeast University, where he is currently working toward his Ph. D. degree. His research interests are high speed optical communication system, optical amplifiers and related topics.