

宽带平坦增益光纤喇曼放大器泵浦配置的快速搜索算法

闻 和, 杨 昕, 顾 婉 仪

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘 要: 本文提出了一种用于宽带平坦增益喇曼光纤放大器的泵浦配置的快速搜索算法, 该算法只需要指定放大器采用的介质光纤参数、信号功率水平、放大器的目标增益和允许采用的泵浦数, 就能够搜索到最小均方误差意义下泵浦的配置结果. 算法利用最小均方差意义下的最佳逼近, 把搜索波长的遗传算法和确定功率积分的具有线性约束条件的二次型凸规划问题结合起来, 从而加快了搜索速度.

关键词: 喇曼放大器; 增益均衡; 搜索算法; 光放大器

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 11-1894-03

A Fast Method for Wide-Band Flat-Gain Fiber Raman Amplifier Pump Configuration

WEN He, YANG Xin, GU Wanyi

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A fast method for wide band flat gain fiber Raman amplifier pump configuration is provided in this paper. It can give the pump wavelength and power level in Least Mean Square (LMS) sense, given input parameters like, fiber parameters, signal power level, target gain profile and number of allowed pumps. Based on LMS approach, this method combines the Genetic Algorithm (GA) to determine pump wavelength and convex quadratic programming with linear constrained conditions to determine pump power levels, so that it speeds up the searching speed.

Key words: Raman amplifier; gain equalization; optical amplifier; search method

1 引言

高速大容量的 WDM 通信对传输带宽的需求已超过 80nm, 传统的 EDFA 增益带宽只有 30~40nm 已不能很好地满足要求. 分布式喇曼放大器的增益带宽可以达到 100nm 以上^[1,2], 而且能够灵活配置, 并具有较好的噪声特性, 特别是混合喇曼+EDFA 放大器, 充分利用了两者的优点, 具有高增益、低噪声、低非线性损伤等特点, 而成为长距离大容量通信系统首选的放大器配置方案.

宽带混合放大器的一个主要难点是增益平坦喇曼放大器的泵浦配置问题. 此时需要多个泵浦源, 不同的泵浦配置对放大器性能有着很大的影响. 已有不少文献对泵浦的优化配置做了研究. 文献[3]对模型进行了简化处理并采用遗传算法对泵浦进行搜索, 文献[4]则采用退火算法, 但它们在每次搜索过程中都需要求解功率传输方程, 计算量很大; 文献[5]采用遗传算法进行搜索并引入功率积分, 使得在搜索过程中不必求解功率传输方程, 最后只需要根据功率积分便可以确定出初始泵浦功率, 这样大大地减少了计算量. 尽管该方法已经取得很好的结果, 但是还有待改进. (1) 遗传算法的搜索空间是 2n 维的, 搜索空间大, 计算时间长, 而且难以保证搜索到最优解; (2) 泵浦波长和泵浦功率是相互独立的, 在指定泵浦波长情况下, 不能给出最优的功率配置上界. 本文在其基础上提出一种更有效的搜索算法, 可以有效地解决上述两个问题. 该方

法只需要搜索泵浦波长, 而功率积分则通过解带有线性约束条件的二次型凸规划问题直接获得, 从而降低了搜索空间的维数, 提高了求解速度.

本文结构安排, 第一部分介绍方法的基本思想和理论根据, 第二部分是对算法的描述, 第三部分是算法结果和讨论, 最后是对本文的总结.

2 算法思想和数学原理

以 dB 形式表示的喇曼放大器总增益是多个泵浦增益的线性叠加^[2], 其加权系数是仅依赖于泵浦强度而与信号波长无关的数, 而每个泵浦提供的增益形状只决定于泵浦波长, 所以平坦增益喇曼放大器的设计就是寻找合适的泵浦配置, 使得放大器增益谱在某种意义下尽量逼近指定的增益谱形状. 下面是对该方法的具体说明.

假定放大器有 m 个泵浦, n 路信号, 忽略对泵浦配置影响不大的 ASE 和瑞利散射噪声项的功率传输方程^[5]如下

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

其中频率 v_k 随着脚标 $k = 1, 2 \dots m+n$ 的增加而递减, $k = 1, \dots, m$ 代表泵浦光, $k = m+1 \dots, m+n$ 代表信号光. P_k , α_k 分别表示第 k 路光波的功率、衰减系数, $A_{eff}(v_j, v_k)$ 表示第 j

和 k 路光波的有效重叠面积, 并近似为 $A_{eff}(v_j)$, K_{eff} 表示偏振依赖因子, $g_{v_j}(v_j - v_k) = \frac{v_j}{v_R} g_R(v_j - v_k)$ 表示频率为 v_j 的泵浦对频率为 v_k 信号的喇曼增益系数, 而 $g_R(v_j - v_k)$ 是参考频率为 v_R 的泵浦对频率 $v = v_R - (v_j - v_k)$ 信号的喇曼增益系数.

定义功率积分 $I_k \equiv \int_0^L P_k(z) dz$, $k = 1, 2, \dots, m+n$ 和 $g_{ij} = \begin{cases} \frac{g_{v_j}(v_j - v_k)}{K_{eff} A_{eff}(v_j)}, v_j \geq v_k \\ -\frac{g_{v_k}(v_k - v_j)}{K_{eff} A_{eff}(v_k)}, v_j < v_k \end{cases}$, 则解得到频率 v_k 信号的净增益为

$G_{net}(v_k) = \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp\{-\alpha_{eff}(v_k)L\} \exp\{\sum_{j=1}^m g_{ij} I_j\}$, 其中等效衰减系数 $\alpha_{eff}(v_k) = \alpha_k - \sum_{j=m+1}^{m+n} g_{ij} I_j / L$ 表示由于 SRS 导致信号间的功率转移引起光纤衰减系数的变化.

尽管信号的功率积分在起初是未知的, 但可以根据功率的分布进行估计. 例如没有泵浦增益下的信号功率积分的零阶近似为 $\int_0^L P_k(0) \exp(-\alpha_k z) dz = \frac{P_k(0)}{\alpha_k} (1 - \exp(-\alpha_k L))$, 当存在反向泵浦时, 信号功率积分可近似为 $\frac{P_k(0)}{\alpha_k} (1 - \exp(-\alpha_k L)) (1 + C \frac{G_{on_off}^{dB}}{\alpha_k L})$, 其中系数 C 的取值大约在 0.3~0.4 之间, 对于同向泵浦信号功率积分的一阶近似可取作 $\frac{G_{on_off}^{dB} P_k(0)}{\alpha_k} [\exp(\alpha_k(L - L_{eff})) - 1] + C \frac{G_{on_off}^{dB} P_k(0) \exp[\alpha_k(L - L_{eff})] + P_k(0)}{2} L_{eff}$, 其中系数 C 的取值

在 0.5~1 之间, 此时已经能很好地近似. 如果需要更准确的结果, 可以采用迭代的方法求解^[5]. 对净增益表示式两边取 dB 单位, 并整理得到 $0.1(\ln 10) G_{net_off}^{dB}(v_k) = \sum_{j=1}^m g_{ij} I_j = 0.1(\ln 10) G_{net}^{dB}(v_k) + \alpha_{eff}(v_k)L$. 为了简洁表示, 定义列向量 $g_j = \{g_{ij}\}_{i=1}^n$, $I = [I_1, I_2, \dots, I_m]^T$, $\alpha_{eff} = \{\alpha_{eff}(v_k)\}_{k=1}^n$, $G_{on_off}^{dB} = \{G_{on_off}^{dB}(v_k)\}_{k=1}^n$, $G_{net}^{dB} = \{G_{net}^{dB}(v_k)\}_{k=1}^n$ 和 $n \times m$ 矩阵 $A = [g_1, g_2, \dots, g_m]$, 则有: $0.1(\ln 10) G_{net}^{dB} = AI - \alpha_{eff}L$ (2)

从式(2)可以看出放大器开关增益恰好为每个泵浦提供增益的叠加, 其加权系数为泵浦功率积分, 而放大器净增益为开关增益减去等效的光纤衰减. 假设 n 维列向量 G_{off}^{dB} 为指定的放大器增益, 则平坦增益放大器的优化泵浦配置问题便是寻找恰当的 A 和泵浦功率积分 I , 使得放大器增益 G_{net}^{dB} 与目标增益 G_{off}^{dB} 在某种度量下尽量接近.

选择不同的度量对问题的求解有较大的影响, 文献[5]选用比较严格的峰值增益波动来度量, 尽管可以得到很好的结果, 但也割断了 A 与 I 的联系, 所以泵浦波长和功率积分是作为独立的变量来搜索, 从而扩大了搜索空间. 本文采用常用的

均方误差来度量, 便可以吧 A 和 I 联系起来, 从而减小了搜索空间. 令目标函数

$$\begin{aligned} \phi(A, I) &= (AI - C)^T (AI - C) \\ &= I^T (A^T A) I - 2I^T (A^T C) + C^T C \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $C = \alpha_{off} L + 0.1(\ln 10) G_{off}^{dB}$. 假定泵浦波长已知, 则 A 已知, 目标函数是关于功率积分的二次函数. 特别当 $A^T A$ 为正定矩阵时, 存在唯一最佳功率积分 I^* 使得目标函数取最小值, 考虑功率积分 $I \geq 0$, 所以该问题属于具有线性约束条件的凸二次规划问题. 当 $A^T A$ 正定时可采用起作用集^[6]方法进行求解, 而当 $A^T A$ 为非负定时可以采用梯度投影法^[7]求解.

本算法的数学原理是对目标增益 G_{off}^{dB} 的 LMS 逼近, 即选取喇曼增益谱曲线上的 m 段线性无关的部分 g_i , 由它们构成一组基张成空间 $V = \{f | f = \sum_{i=1}^m k_i g_i, k_i \in R^+\}$, 在空间 V 中寻找某个 f_0 使其在 l_2 范数 $\|C - f_0\|_2$ 意义下最为接近, 该方法对 G_{off}^{dB} 没有有限的, 具有普适性.

另外, 若已知 $[I_1, I_2, \dots, I_m]^T$ 是可以唯一确定泵浦的初值条件或边界条件的. 此时可以令 $I_k(z) = \int_0^z P_k(z') dz'$, $k = 1, \dots, m+n$ 为新的函数, 则 $I_k(z)$ 二阶连续可导, 且满足 $I_k(0) = 0$, $I_j(L) = I_j$, $j = 1, \dots, m$ 以及 $I'_i(0) = P_i(0)$, $i = m+1, \dots, m+n$, 则原 $m+n$ 个功率传输方程可化为 $2(m+n)$ 边界条件的功率传输方程. 根据微分方程解的存在和唯一性定理可知 $I_k(z)$ 具有唯一解, 则 $I_k(z)$ 的导数 $P_k(z)$ 也是存在并且唯一的. 尽管在理论上可以用求解微分方程组的方法来确定泵浦的注入条件, 但由于边界条件问题的求解比较困难, 故采用下面描述的迭代方法来求解.

3 算法描述

根据以上思想可以得到喇曼放大器单向泵浦配置的搜索算法.

(1) 用遗传算法搜索最佳的泵浦波长组合, 在计算个体评价值时需要调用起作用集的方法来解决凸规划问题(3), 同时也得到了对应的加权系数; 遗传算法中个体的评价函数是采用了叠加曲线与目标曲线的 p 范数, 即 $\|AI - C\|_p$, 当 p 取较大的值, $\|AI - C\|_p \approx \max\{|AI - C|_r\}$, 脚标 r 表示向量的第 r 个分量, 从而可以控制最大峰值波动; (2) 在只考虑泵浦光的条件下迭代求解泵浦的注入功率, 迭代求解的方法是给定第 k 次的注入泵浦功率值 $P^{(k)}$, 由功率传输方程计算得到泵功率分布, 然后求泵浦功率积分得到第 k 次的系数向量 $I^{(k)}$, 把 $I^{(k)}$ 与求解最优化问题得到的 I 进行比较, 并根据误差调整下一次的泵浦功率, 即 $P^{(k+1)} = P^{(k)} \cdot (\frac{I}{I^{(k)}})$, 式中的乘除表示向量对应分量的乘除; (3) 考虑信号对泵浦光的耗尽作用, 迭代求解泵浦功率, 迭代的方法同 2; (4) 根据搜索出来的泵浦功率求解得到最终结果.

4 结果与讨论

图 1、2 是用我们提出的新算法对 6 个泵浦喇曼放大器配置的仿真结果, 仿真条件为: 介质光纤 SMF28 光纤, 光纤衰减

谱近似用多项式 $\alpha(\lambda) = 0.200618 - 0.073920(\lambda/1570 - 1) + 9.8022(\lambda/1570 - 1)^2 + 56.615(\lambda/1570 - 1)^3 + 902.032(\lambda/1570 - 1)^4$ (dB/km) 拟合, 有效面积用多项式 $A_{eff}(\lambda) = 77.8456 + 0.076759(\lambda - 1570) + 0.0005235(\lambda - 1570)^2$ (μm^2) 拟合, 峰值喇曼增益系数为 $0.74\text{E}-13$ (m/W), 传输距离 100km, 目标开关增益为 14dB, 放大器的增益范围 186.60~196.60THz (即 1524.89~1606.60nm), 共 10.0THz (82nm), 泵浦波长的可选范围 1400~1500nm. 注入信号功率为 C 波段 90 波, $0.6\text{mW}/\text{ch}$, L 波段 91 波, $0.5\text{mW}/\text{ch}$. 遗传算法的群体规模为 100, 繁衍代数数为 $50 \times (6 - 1)$, 杂交概率 0.20, 变异概率 0.02. 得到的泵浦配置和开关增益谱如图 1 和图 2 所示.

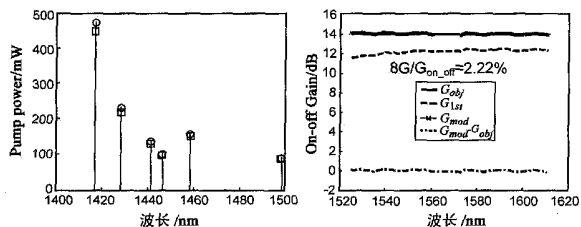


图 1 放大器泵浦配置图 图 2 放大器开关增益谱

注: 图中 $\delta G/G_{on_off}$ 定义为修正泵功率后得到的净增益曲线上最

大最小值之差与开关增益的 dB 数值比.

图中的虚线是没有考虑信号对泵浦耗尽的结果, 经过修正后开关增益与目标增益相差无几, 而且最大增益波动仅为 2.22%, 约 0.31dB.

为了比较本算法(不妨称之为混合的遗传算法 HGA)与传统的遗传算法(CGA)的性能, 我们在保持上述条件不变(包括随机数种子), 并让 CGA 的群体规模为 200, 繁衍代数数为 $100 \times (\text{泵浦数量} - 1)$ 两倍于 HGA, 分别对 3、4、5、6、8 个泵浦进行搜索, 在相同泵浦数量条件下, 采用不同的随机数种子重复 30 次, 把最后的最大增益波动与时间开销画在图 3 中. 其中实心图标为 HGA 结果, 空心图标为 CGA 结果, 三角形为 3 个泵浦的结果, 四边形为 4 个泵浦的结果, 五角星为 5 个泵浦的结果, 菱形为 6 个泵浦的结果, 圆形为 8 个泵浦的结果.

比较图中两种算法搜索到的最好点, 发现当泵浦数量 < 5 时, 两者搜索到的最好点基本相同, 但当泵浦数量 ≥ 5 时 CGA 搜索到的最好点明显不及 HGA 算法; 再比较点的分布范围, 发现 CGA 搜索到的点有较大的波动, 说明搜索的一致性差, 对随机种子数的依赖较强, 而 HGA 算法基本能保持较小的波动; 最后比较两种算法的时间开销, CGA 的时间开销大约是 HGA 的两倍以上.

为了比较两种算法的收敛速度, 把它们搜索 8 个泵浦过程中得到的当前最佳点记录下来并比较如图 4 所示. 可以看到, HGA 算法很快就搜索到最佳点, 之后长时间保持不变, 而 CGA 算法容易陷入到局部极值点, 需要等待相当长的一段时间后才会跳出局部极值点, 所以即使运行了两倍于 HGA 的代数, 仍未达到 HGA 的效果.

可见由于 HGA 的搜索空间小, 所以能以较快的速度和较大的可能性搜索到好的点.

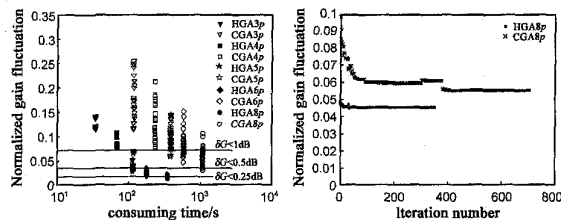


图 3 HGA 与 CGA 搜索结果比较 图 4 HGA 与 CGA 搜索过程比较

5 总结

本文提出了一种宽带平坦增益光纤喇曼放大器泵浦配置的快速搜索算法, 该算法的特点可以概括如下:

- (1) 用 LMS 准则把泵浦功率与泵浦波长关联起来, 使得原先 $2n$ 维的搜索空间减小到 n 维, 从而能够较快地给出结果, 而且结果的一致性较好.
- (2) 在已知泵浦波长条件下, 该算法可以给出了最小均方误差意义下的最优加权系数, 特别适合于已知泵浦波长求解泵浦功率的配置问题.
- (3) 另外, 由于采用了 LMS 准则还能够保证多数信道的增益在平均意义上都接近于目标增益.

参考文献:

[1] Y Emori, K Taraka, S Namiki. 100 nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain equalised by 12 wavelength channel WDM laser diode unit[J]. Electron Lett, 1999, 35(16) : 1355- 1356.

[2] H Kidolf, K Rottwit, M Nissov, M Ma, E Rabanjaona. Pump interactions in a 100 nm bandwidth Raman amplifier[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 11(5) : 530- 532.

[3] X Zhou, C Lu, P Shum, T H Cheng. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward pumped fiber Raman amplifier[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(9) : 945- 947.

[4] M Yan, J Chen, W Jiang, J Li, J Chen, X Li. Automatic design scheme for optical fiber Raman amplifiers backward pumped with multiple laser diode pumps[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(9) : 948- 950.

[5] Victor E Perlin, Herbert G Winful. Optimal design of flat gain wide band fiber raman amplifiers [J]. J of Lightwave Tech, 2002, 20(2) : 250- 254.

[6] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.

[7] J Nocedal, S J Wright. Numerical Optimization[M]. Springer verlag, New York, N. Y., 1999.

作者简介:



闻 和 男, 1977 年 1 月生于云南省昆明市, 2000 年毕业于北京邮电大学电信工程学院, 获工学学士学位, 2002 年提前攻读北京邮电大学光通信中心博士学位至今, 目前主要从事光传输技术方面的研究, 包括光纤非线性、光纤放大器及传输系统建模.

杨 昕 男, 1979 年 12 月生于云南省昆明市, 2002 年毕业于北京邮电大学电信工程学院, 获工学学士学位, 现攻读北京邮电大学光通信中心硕士学位至今, 目前主要从事光纤喇曼放大器的研究.