

多波长后向泵浦拉曼放大器优化算法研究

崔炳华* 邱琪 薛飞 王岩柏

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】介绍了多波长后向泵浦拉曼放大器的原理和数学分析方法,设计了一种有效的泵浦优化算法,该算法包括改进的遗传算法和打靶法。数值仿真得到了带宽为80 nm、平均开关增益为5.93 dB的拉曼放大,其增益起伏小于1 dB。

关键词 多波长后向泵浦拉曼放大器; 遗传算法; 打靶法; 增益起伏; 带宽

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

Study on Optimal Design of Multiwavelength Backward-Pumped Fiber Raman Amplifiers

Cui Binghua Qiu Qi Xue Fei Wang Yanbai

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The theory and mathematical analysis of multiwavelength backward-pumped fiber Raman amplifier are presented, and an effective optimizing method including a improved genetic algorithm and a shooting method is presented to optimize the pump lights. By numerical simulation, 80 nm bandwidth Raman gain rippled less than 1 dB is attained, and the average on-off gain is 5.93 dB.

Key words MW-FRA; genetic algorithm; shooting method; gain ripple; bandwidth

为了充分利用光纤拉曼放大器的带宽优势,采用多波长后向泵浦方式实现超宽带拉曼放大是一种很好的方法,其优点是设计灵活,通过适当地调整泵浦光的波长和功率,可得到某一带宽内平坦的拉曼增益,而且不需要任何增益均衡器件。同时,因为采用多个泵浦光源一起泵浦,降低了对单个泵浦光源的功率要求,是一种适应于未来密集波分复用系统(DWDM)的较为理想的超宽带光放大技术。实现这种拉曼放大器的关键技术在于设计优化算法,以找到满足给定带宽和平坦度要求的泵浦光配置,另外是开发研制所需要的实用化的拉曼泵浦激光器,如光纤拉曼激光器等。在多波长泵浦的拉曼放大器中,由于存在泵浦光之间以及信号光之间的能量耦合,使用来描述受激拉曼散射效应的能量耦合方程是一个高度非线性的 n (信号光与泵浦光的总个数)维一阶非线性微分方程组,因此,通常的优化算法难以实现上述泵浦光优化过程,或者实现起来效率很低。本文讨论一种较为有效的泵浦光优化算法。

1 拉曼放大模型和优化算法设计

1.1 拉曼放大数学模型

光波在多波长后向泵浦的拉曼放大器传输过程中会发生很多光学效应^[1,2],针对超宽带拉曼放大器的增益平坦优化问题,最重要的是泵浦光与泵浦光之间和泵浦光与信号光之间的受激拉曼散射,以及泵浦光和

2002年11月28日收稿

* 男 25岁 硕士生 主要从事宽带光纤拉曼放大器的研究

信号光的波长相关的线性传输损耗,而自发拉曼辐射和瑞利散射对增益线形影响不大。因此,稳态时拉曼放大器系统可以用下列非线性耦合方程组来描述^[3]

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

式中 系数 $k=1,2,\dots,n$ 为反向传输的泵浦光波, $k=n+1,n+2,\dots,n+m$ 为正向传输的信号光波,而且频率是按升序排列,即 $i < j$ 时 $v_i > v_j$; p_i , n_i , \mathbf{a}_i 为第 i 个光波的功率、频率和损耗系数, $i=1,2,\dots,n+m$; A_{eff} 为有效模场面积; k_{eff} 为偏振因子。方程(1)求解的边界条件分别是输入泵浦光功率 $P_k(L)(k=n+1,n+2,\dots,n)$ 和输入信号光功率 $P_k(0)(k=n+1,n+2,\dots,n+m)$ (L 是拉曼放大光纤长度)。

设 $I_j \equiv \int_0^L P_j(z) dz, j=1,2,\dots,n+m$,则由式(1)推出第 k 信道增益为

$$G_k = \frac{P_k(L)}{P_k(0)} = \exp(-\mathbf{a}_k L + \sum_{j=n+1}^{n+m} g_{jk} I_j) \exp(\sum_{j=1}^n g_{jk} I_j) = G_{L,k} G_{G,k} \quad k=1,2,\dots,n+m \quad (2)$$

式中 $G_{L,k}$ 为损耗,包括传输损耗和由于信号间的拉曼散射效应引起的损耗; $G_{G,k}$ 为拉曼开关增益(ON-OFF Raman Gain, 加泵浦光相对于没有泵浦光时的输出对比增益,增益不包含传输损耗作用)。本文优化的最终目标是净增益 G_k 起伏在一定范围内,因为给定的信号光后 $G_{L,k}$ 可以看作常量($\sum_{j=n+1}^{n+m} g_{jk} I_j$ 作用很小,这里忽略),

所以优化的参数只在 $G_{G,k}$ 内包含的泵浦光的波长 I_k 和功率 P_{pK} 。

1.2 用遗传算法实现第一步优化

根据文献[3]提出的优化思路,可以把整个优化过程分成两步:首先找到满足平坦度要求的 (I_k^*, I_k^*) ,再根据前一步结果 (I_k^*, I_k^*) 找出相应的 $(I_k, P_{pK}(L))$,即优化的最终结果。其优点是已知 (I_k, I_k) (相当于一个解方程的中间变量)计算 G_k ,可以通过解析表达式计算得到,若直接通过 $(I_k, P_{pK}(L))$ 计算 G_k 就需要求解复杂的耦合方程组,而且只能用数值方法解,时间消耗太大。

本文采用一种改进了的遗传算法来实现第一步搜索。隐含并行性和全局搜索特性是遗传算法的两大显著特性,对于在 $2n$ 维空间搜索出一组最优的泵浦光积分谱 (I_k, I_k) 的问题比较适合。遗传算法的程序流程是随机地产生一定数量的个体组成遗传进化的群体,每个个体就是一组泵浦光配置(n 个泵浦光波) $\{I_k, I_k\}_{k=1}^{k=n}$,对群体依次用三个进化算子(交叉算子、变异算子、选择算子)进行操作产生新的群体,反复重复这个过程,直到某代群体中出现了满足适应度(对应放大器增益平坦度)要求的个体为止,这个最优个体就作为第一步搜索的结果。这一步搜索的质量和速度主要由上述三个算子的优劣决定,改进后的遗传算法如下:

1) 编码 因为该搜索是一个多维、高精度、连续函数的优化,所以编码采用10进制编码更适合,而不采用传统的2进制编码。根据实际情况,这里用两个两位十进制整数来分别代表 I_k 和 I_k 。映射关系为

$$\begin{cases} I_k = a + bu(1, k) \\ I_k = c + du(2, k) \end{cases}, \mathbf{u}(j, k) \text{ 为 } 2 \times n \text{ 矩阵, 矩阵元素都是 } 0 \sim 100 \text{ 的整数, 设置 } a, b, c, d \text{ 的值可调整 } I_k \text{ 和}$$

I_k 的搜索范围和步长;

2) 适应度评价函数 遗传算法中适应度高低的评判标准是该个体对应的拉曼增益平坦度好坏,适应度是一个归一化的 $0 \sim 1$ 之间的小数;

3) 交叉算子 采用部分算术杂交方法来进行交叉操作,因为在一个超长方体内部搜索比传统的离散杂交搜索范围更大。设两个父本个体分别为 $u^1 = (u_1^1, u_2^1, \dots, u_n^1)$, $u^2 = (u_1^2, u_2^2, \dots, u_n^2)$,在 $1 \sim n$ 之间产生两个随机数 k, l ,再在 $0 \sim 1$ 之间产生 l 个随机数 r_1, r_2, \dots, r_l ,如果 $l > n - k + 1$,则部分算术杂交产生的两个新个体分别是

$$\begin{aligned} u^{1'} &= (u_1^1, u_2^1, \dots, u_{k-1}^1, r_1 u_k^1 + (1-r_1)u_k^2, \dots, r_l u_{k+l}^1 + (1-r_l)u_{k+l}^2, \dots, u_n^1) \\ u^{2'} &= (u_1^2, u_2^2, \dots, u_{k-1}^2, r_1 u_k^2 + (1-r_1)u_k^1, \dots, r_l u_{k+l}^2 + (1-r_l)u_{k+l}^1, \dots, u_n^2) \end{aligned}$$

如果 $l > n - k + 1$,就把 $k+l > n$ 的部分对 n 取模处理,用 $l-n$ 代替 l ,以保证搜索的随机性。

4) 变异算子 在实数编码情况下,变异算子不仅是恢复群体多样性的措施,而且是一个主要的搜索算

子。自适应变异是一种比较有效的变异算法，因为局部搜索范围是个体适应度的函数，加强了遗传算法的局部搜索能力

$$u_i = \begin{cases} u_i + \Delta(A, 100 - u_i) & \text{若random}(0,1) = 0 \\ u_i - \Delta(A, u_i - 0) & \text{若random}(0,1) = 1 \end{cases}$$

式中 $\Delta(A, y) = y(1 - r^{A^b})$ ， r 是 $[0,1]$ 上的服从均匀分布的随机变量。自适应变异系数为 $A = 1 - (f / f_{\max})$ ， f 是某个体的适应度， f_{\max} 是该群体中的最大适应度。 b 是一个系统参数，决定了随机扰动对个体适应度的依赖程度。这样定义的变异算子将保护较好的解，而对适应度较差的解，其搜索的领域较大。

5) 选择算子 本算法采用转盘方法，首先计算个体的相对适应度值 $p_i = f_i / \sum f_i$ ，再根据选择概率选择个体。实现方法是生成一个随机数 $r \in [0,1]$ ，若 $p_0 + p_1 + \dots + p_{i-1} < r < p_0 + p_1 + \dots + p_i$ ，则第 i 个个体被选择到下一代。可见，个体的适应度越大被选择到下一代的机会也越多，遗传算法步骤如图1所示。

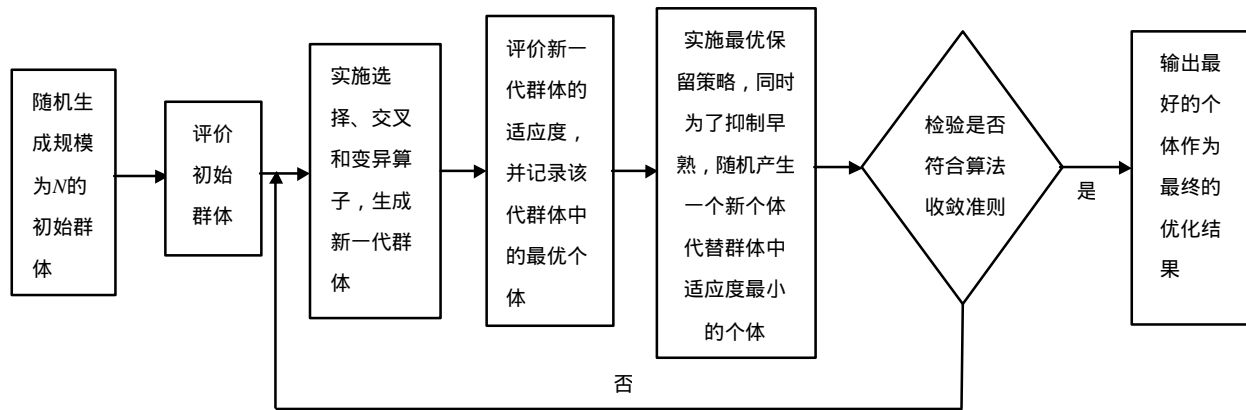


图1 遗传算法步骤

1.3 打靶法完成第二步优化

首先，搜索确定优化的 (I_k^*, I_k^*) ，同时信号光、泵浦光的增益 $G_k (k=1,2,\dots,n+m)$ 即确定。其次，是根据上述已知条件和信号光初值 $P_s(0)$ 确定优化的泵浦光初值 $P_p(L)$ ，即最终的优化结果，其难处在于信号光和泵浦光分别在光纤的两端注入，等于数值求解的初值不在同一点。为了把边值问题转化为初值问题，便于数值求解，设计了一种新型的打靶法，数值仿真证明其收敛速度较快(12个泵浦光波时打靶次数少于7次)。根据 I_k^* 只考虑传输损耗估计一组泵浦光功率初 $P_{pk}(L) (k=1,2,\dots,n)$ ，又知 $P_{sk}(L) = P_{sk}(0)G_k (k=n+1,n+2,\dots,n+m)$ (相当于假定了一个 $\frac{dP_k}{dz}$ 在 L 处的初值，即假定打靶方向)，故可用常用的数值法进行求解，经计算得到功率积分谱为 I_k^0 。然后，把 $P_{p1}(L)$ 增加0.001(功率增加1 mW)计算出一组 I_{1k} ，依次用同样方法算出 $I_{jk} (j=2,3,\dots,n)$ ；再设 $n \times n$ 矩阵 $S(k,j) = I_{jk} - I_k^0, j, k=1,2,\dots,n$ ， n 维列向量 $D(k) = I_k^* - I_k^0$ ，求解线性方程组 $SX = D$ ，解出 $X(n$ 维列向量)。如果 $D(k) > 0.001 (k=1,2,\dots,n)$ ，则用 $P_{pk}(L)' = P_{pk}(L) + X(k) (k=1,2,\dots,n)$ 代替 $P_{pk}(L)$ ，直到 $D(k) < 0.001$ ，则 $P_{pk}(L)$ 就是最后优化结果，即泵浦光的优化功率值。

2 数值仿真

本文把上述算法在MATLAB下编程实现，应用一个8个泵浦波长的C+L波段(1 530 ~ 1 610 nm)的拉曼放大器中进行数值仿真验证。取100路($m=100$)WDM信号光(间隔0.8 nm)， $L=40$ km，偏振因子 k_{eff} 取2，拉曼增益系数 $g_R(\Delta g)$ 、损耗系数 $a(g)$ 和有效模场面积 $A_{eff}(g)$ 取标准单模光纤(SMF-28)，典型值如图2 ~ 图4所示。

遗传算法群体规模设为10，最大遗传代数设为800，最大打靶迭代次数设为8，泵浦光优化结果如图5所示，优化后的拉曼净增益曲线如图6所示，损耗加上拉曼净增益，得到平均开关增益为5.93 dB。

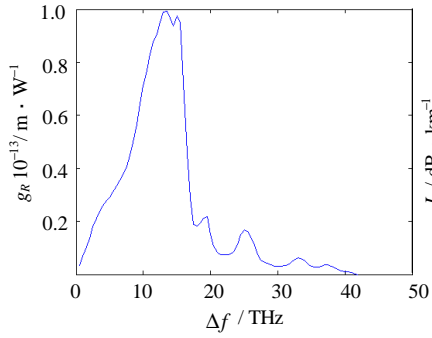


图2 拉曼增益系数

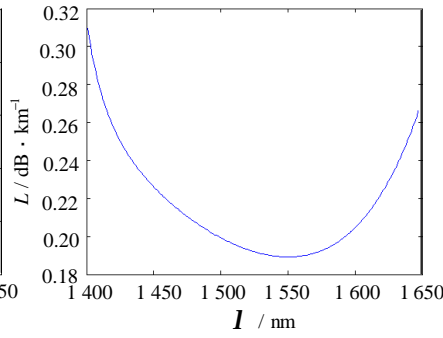


图3 损耗曲线

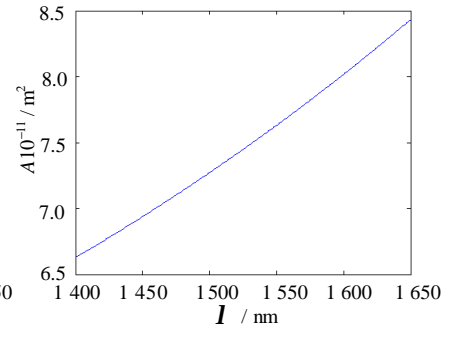


图4 光波有效模场面积

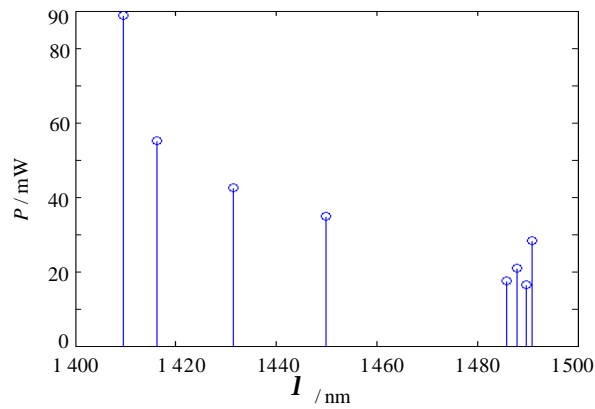


图5 优化后的8个泵浦光波

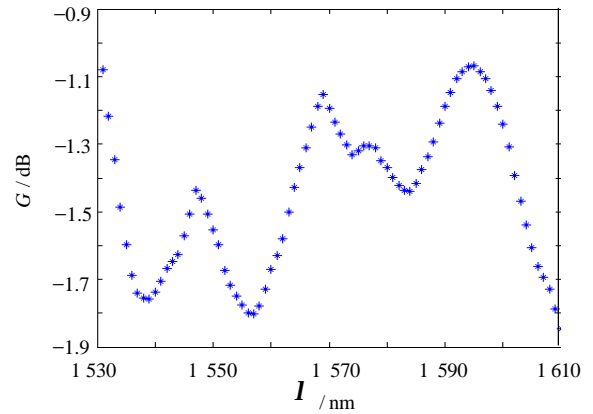


图6 优化后信号光拉曼净增益

3 结论

多波长后向泵浦超宽带拉曼放大器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波个数、泵浦光波长、功率范围、信号光总带宽和间隔等参数, 对于设计实际光纤拉曼放大系统有很大的帮助。本文应用该算法对C + L波段80 nm带宽的拉曼放大器(8个泵浦光波)进行了优化设计, 数值仿真证明其优化效果可以做到平均开关增益为5.93 dB, 增益起伏小于1 dB, 达到了较好的优化目的。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics (2nd Edition)[M]. New York: Academic Press. 1995. 316-319
- [2] Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M, *et al.* Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier[J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 1999, 11(1): 530-532
- [3] Victor E P, Herbert G W. Optimal design of flat-gain wide-band fiber raman amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 11-29
- [4] 薛 飞, 邱 昆. C波段集中式光纤喇曼放大器的研究[J]. 电子科技大学学报, 2002, 31(5): 447-451

编辑 徐培红