

基于打靶和遗传算法模拟多阶级联拉曼光纤激光器

尚卫东¹, 李发丹^{1,2}, 孙建国¹, 冯光¹, 郭占斌¹, 周晓军², 秦祖军²

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450015; 2. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要:直接采用打靶算法数值求解表征光纤中受激拉曼散射效应的非线性耦合方程组对多阶级联拉曼光纤激光器的输出特性进行仿真,任意设置的各阶 Stokes 光功率初始值会导致计算过程不收敛。本文提出首先采用遗传算法对各阶的 Stokes 光功率初值进行优化筛选,解决了各阶 Stokes 光功率初值选择的收敛性问题,然后利用四阶龙格-库塔及打靶算法进行数值求解,结果表明该方法非常有效。在此基础上,对六阶掺铒级联拉曼光纤激光器进行了数值模拟,并比较分析了光纤长度、输出耦合器反射率、泵浦功率等因素对六阶级联拉曼光纤激光器输出特性的影响。

关键词:受激拉曼散射; 光纤激光器; 打靶算法; 遗传算法

中图分类号: TN248.1; O437.3

文献标识码: A

Numerical Algorithm for n Cascaded CW Raman Fiber Lasers Based on Shooting Method and Genetic Algorithm

SHANG Wei-dong¹, LI Fa-dan^{1,2}, SUN Jian-guo¹, FENG Guang¹, GUO Zhan-bin¹, ZHOU Xiao-jun², QIN Zu-jun²

(1. The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450005 China; 2. School of Opto-electronic Information of University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract: The problem of poor convergence is existed when arbitrary initial values for Stokes-waves power are employed in the process of numerical mode which the output characteristics of multi-order cascaded Raman fiber lasers using shooting method directly to solve the nonlinear coupled equations used to describe stimulated Raman scattering in fibers. A method of adopting genetic algorithm to determine the region of convergence for the initial values at first, and then solve the coupled equations by Runge-Kutta method and shooting method fast and efficiently is proposed. The effects of fiber length, reflectivity of output coupler and pump power on the output characteristics of a 6th-order cascaded Raman fiber laser are studied on the basis of the proposed method.

Key words: SRS; fiber laser; shooting method; genetic algorithm

1 引言

级联拉曼光纤激光器是基于光纤中的受激拉曼散射效应的一种光纤激光器,通常用拉曼增益大的掺杂光纤作为增益介质^[1]。早在1993年 Dianov 等用掺铒光纤为增益介质,经过三次拉曼频移获得了输出波长为1240nm的级联拉曼光纤激光器,标志着第一台级联拉曼光纤激光器的诞生^[2]。因为级联拉曼激光器可以在光通信所需的1310nm和1550nm波段甚至任意波长实现激光输出^[3]。因此,级联拉曼激光器引起了各国研究者的极大兴趣,在最近几年内取得了很大的进展。

而表征 n 阶级联拉曼光纤激光器的耦合方程是一组 n 维一阶非线性微分方程,方程很好地描述了泵浦光及 n 阶 Stokes 光之间的相互关系,很难在严格条件下求出其解析解。而数值求解方法简单,精度高,应用最为广泛。但是用打靶算法对 n 阶级联拉曼光纤激光器数值求解时,需设置各阶 Stokes 光功率初始值,如果设置不当会导致计算不收敛。本

作者简介: 尚卫东(1969-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为光电对抗和激光技术研究。E-mail: xx_shang@sohu.com

收稿日期: 2008-03-03; **修订日期:** 2008-04-14

文提出首先采用遗传算法对各阶 Stokes 光功率初值进行优化筛选,这样解决了各阶 Stokes 光功率初值的收敛性问题,然后利用打靶算法进行数值求解,结果表明该方法稳定有效。

2 理论模型

n 阶级联拉曼光纤激光器的线形腔结构模型如图 1 所示^[4]。

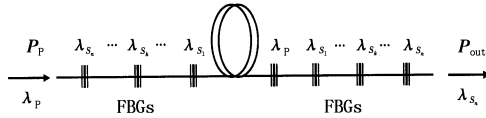


图 1 n 阶级联拉曼光纤激光器的模型

P_p, λ_p 分别表示耦合进光纤的泵浦光功率和波长,图中对应 λ_s 的光纤光栅表示对 λ_s 高反射的布拉格光纤光栅(FBG)。在泵浦功率一定条件下,腔内各阶 Stokes 光形成稳定的谐振。它们之间的相互作用关系可以用下列耦合方程组来表示^[4]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= -\alpha_p P_p - \frac{g_1}{A_1} \frac{\nu_p}{\nu_{s_1}} P_{s_1}^F P_p \\ \frac{dP_{s_1}^{F/B}}{dz} &= \mp \alpha_{s_1} P_{s_1}^{F/B} \mp \frac{g_1}{A_1} \frac{\nu_{s_1}}{\nu_{s_2}} (P_{s_2}^F + P_{s_2}^B) P_{s_1}^{F/B} \mp \frac{g_1}{A_1} P_p P_{s_1}^{F/B} \\ &\vdots \\ \frac{dP_{s_k}^{F/B}}{dz} &= \mp \alpha_{s_k} P_{s_k}^{F/B} \mp \frac{g_k}{A_k} \frac{\nu_{s_k}}{\nu_{s_{k+1}}} (P_{s_{k+1}}^F + P_{s_{k+1}}^B) P_{s_k}^{F/B} \mp \frac{g_{k-1}}{A_{k-1}} (P_{s_{k-1}}^F + P_{s_{k-1}}^B) P_{s_k}^{F/B} \\ &\vdots \\ \frac{dP_{s_n}^{F/B}}{dz} &= \mp \alpha_{s_n} P_{s_n}^{F/B} \pm \frac{g_n}{A_n} (P_{s_{n-1}}^F + P_{s_{n-1}}^B) P_{s_n}^{F/B} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, z 表示光纤长度; P_p 为泵浦功率; $P_{s_k}^{F/B}$ (F 表示前向;B 表示后向)为第 k 阶 Stokes 光功率; g_k 为第 k 阶 Stokes 光的拉曼增益系数; A_k 为光纤对于第 k 阶 Stokes 光的光纤有效面积; ν_p, ν_{s_k} 分别为泵浦光和第 k 阶 Stokes 光的频率; α_p, α_{s_k} 分别为泵浦光和第 k 阶 Stokes 光在光纤中的吸收损耗系数。

方程组的边界条件为:

$$\begin{aligned} z=0 \quad z=L \\ P_p(0) = P_p \quad P_{s_k}^B(L) = R_k^B P_{s_k}^F(L) \\ P_{s_k}^F(0) = P_k^F P_{s_k}^B(0) \quad P_{s_n}^B(L) = R_{out}^B P_{s_n}^F(L) \\ P_{s_n}^F(0) = P_n^F P_{s_n}^B(0) \end{aligned} \quad (2)$$

3 模拟数值算法

通常代入边界条件,就可以用四阶龙格-库塔

法求解非线性耦合方程组(1),但是在 $z=0$ 处各阶 Stokes 光功率值未知,需要用打靶法进行反复迭代修正。对于求解的低阶级联拉曼光纤激光器^[1,5],求解只需很少功率初值,根据经验很容易选择。但是对于求解 $n(n>3)$ 阶级联拉曼光纤激光器^[3-4],设 n 个功率初值进行打靶,如果初值与实际值相差太远,计算极为耗时,甚至不收敛。遗传算法具有很强的全局搜索能力,但是在接近结果时易出现左右摆动,收敛很慢。而打靶法^[6-7]是根据计算结果的变化修正初值,在接近最优值时收敛很快。针对两种算法的特点,本文首次提出先利用遗传算法^[8-9]对任意给出的初值进行优化选择,然后再结合打靶算法求解,结果表明该算法对于求解高阶级联拉曼光纤激光器方程稳定有效。

3.1 遗传算法

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法,它从任一初始种群出发,通过随机选择、交叉和变异操作,产生一群更适应环境的个体,使群体进化到搜索空间中越来越好的区域,这样一代代地不断繁衍进化,最后收敛到一群最适应环境的个体,求得问题的最优解。拉曼光纤激光器耦合方程在遗传算法中运行参数选择如下:

(1) 个体选取与编码方法。对于 n 阶级联拉曼光纤激光器耦合方程组的求解,需要 n 个功率初值条件,因此每个个体里面包含 n 个解变量,采用真值编码方法。

(2) 群体。个体组合成群体,群体的大小即群体中包含个体的数量,群体太小时难以求出最优解,太大则增加运算时间,取 200 个个体组成一个群体。

(3) 终止代数。一般取 100 ~ 500,代数过大容易造成计算量巨大,太小结果不理想。我们选取 400 代。

(4) 代沟。代沟表示各代群体之间相互重叠程度的一个参数,它表示每一代群体中被替换的个体在全部个体中所占的百分率,我们选取 0.99。

(5) 适应度函数。适应度函数也称为评价函数,是根据目标函数确定的用于区分群体中个体好坏的标准,越大越好,而我们目标函数求最小值,因此需要在目标函数与适应度函数之间进行变换。求解 n 阶级联拉曼光纤激光器的目标函数为:

$$f(x) = (R_1^B - R_1')^2 + (R_2^B - R_2')^2 + \dots + (R_k^B - R_k')^2 \dots + (R_n^B - R_n')^2 \quad (3)$$

式中, R_k^B 为 $z=L$ 处对第 k 阶 Stokes 光的实际光纤

光栅反射率; R'_k 为遗传算法相应的计算值。适应度值大的个体遗传到下一代,直到目标函数满足 $f(x) \leq 10^{-3}$ 。

(6)交叉。用算术交叉。

(7)变异。变异首先在群体中随机选择一个个体,对于选中的个体以一定的概率随机地改变串结构数据中某个串的值,一般很低,我们取 0.005。

对于六阶级联拉曼光纤激光器基本参数: $P_p = 5W$, $L = 300m$, $R_{out} = 10\%$, 六阶级联拉曼光纤激光器目标函数值随遗传代数的变化如表 1 和图 2 所示。

表 1 不同代数计算的目标函数值

代数	50 代	100 代	200 代	300 代	350 代	400 代
目标函数值	0.0057349	0.0011963	8.9277×10^{-5}	4.3031×10^{-5}	4.0636×10^{-5}	4.0055×10^{-5}

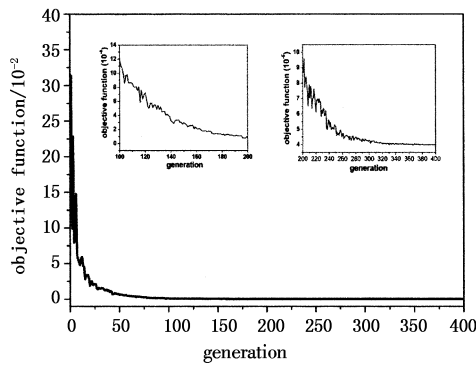


图 2 六阶级联拉曼光纤激光器目标函数值随遗传代数的变化

从表 1 和图 2 可以看出,从 50 代到 400 代的精确度是逐步提高。50 代的目标函数值为 0.0057349,精度比较低,而 200 代时的精度已经达到 10^{-5} ,精度已经很高了,然后结合打靶法很快就可以得出计算结果。而 200 ~ 400 代精度在逐步的提高,但是提高的幅度已经很小,而且收敛速度很

慢。所以用遗传算法计算六阶级联拉曼光纤激光器时选 200 代比较合适。然后结合打靶算法进行求解。

3.2 打靶算法

打靶法结合四阶龙格 - 库塔法求解式(1)、式(2)步骤如下:

(1)由上节遗传算法计算出前向传播的各阶 Stokes 光功率为:

$$P_s^F(0) = (P_{s_1}^F(0), P_{s_2}^F(0), \dots, P_{s_6}^F(0)) \quad (4)$$

(2)根据式(2) $z=0$ 处的边界条件,计算 $z=0$ 处的后向传播的各阶 Stokes 光功率为:

$$P_s^B(0) = (P_{s_1}^F(0)/R_1^F, P_{s_2}^F(0)/R_2^F, \dots, P_{s_6}^F(0)/R_6^F) \quad (5)$$

(3)用龙格 - 库塔法对式(1)从 $z=0$ 到 $z=L$ 积分,求解出 $z=L$ 处的各阶 Stokes 光功率。

Stokes 光功率。

(4)根据式(2)中 $z=L$ 的边界条件,以后向前向光功率之比表示反射率的计算值为:

$$R'_k = P_{s_k}^B(L)/P_{s_k}^F(L) \quad k=1,2,\dots,6 \quad (6)$$

(5)求对比函数:

$$H_k = |R'_k - R_k^B| \quad (7)$$

R_k^B 是 $z=L$ 处对第 k 阶 Stokes 光实际光纤光栅的反射率。

(6)如果 $H_k \leq \varepsilon$ (ε 设为 10^{-5}),式(4)就是解的初值,完成了问题的求解。如果不满足 $H_k \leq \varepsilon$,必须对 $z=0$ 处的各阶 Stokes 光功率 $P_s^F(0)$ 进行修改:

$$P_{s_k}^{Fnew}(0) = P_{s_k}^{Fold}(0) + \delta P_{s_k}^F(0) \quad (8)$$

其中的 $\delta P_{s_k}^F(0)$ 由下式决定:

$$J\delta P_{s_k}^F(0) = -H_k \quad (9)$$

其中的 J 为雅克比矩阵,各矩阵元的大小由下面方程决定:

$$J_{ik} = \frac{\partial H_i}{\partial P_{s_k}^F(0)} = \frac{H_i(P_{s_1}^F(0) \dots, P_{s_k}^F(0) + \Delta P_{s_k}^F(0) \dots, P_{s_n}^F(0)) - H_i(P_{s_1}^F(0) \dots, P_{s_k}^F(0), \dots, P_{s_n}^F(0))}{\Delta P_{s_k}^F(0)} \quad (i, k=1, 2, \dots, 6) \quad (10)$$

式中, $\Delta P_{s_k}^F(0)$ 是第 k 阶 Stokes 光功率的微变量,这里取 0.0001。用式(6)代替式(4)重复以上步骤,直到满足 $H_k \leq \varepsilon$ 。

图 3 是用输出功率 5W, 输出波长为 1064nm 的双包层掺铒光纤激光器作为泵浦源, 300m 长的掺铒光纤作为增益介质, 输出反射镜(针对 1480nm 的激光)的反射率为 10%。掺铒光纤和布拉格光纤光栅构成谐振腔。因为掺铒光纤的拉曼频移是 440cm^{-1} , 要获得 1480nm 波长的激光输

出, 1064nm 的泵浦光需要经过六次拉曼频移, 需要 6 对光纤布拉格光栅构成谐振腔。除了输出反射镜以外光纤布拉格光栅对其他其他各阶 Stokes 光反射率为 99%, 使谐振腔内的各阶 Stokes 光波最大效率地转化为输出波长为 1480nm 的光波。图 3 显示了六阶级联拉曼光纤激光器谐振腔内泵浦光和各阶 Stokes 光的演化, 模拟结果显示波长为 1480nm 的激光输出功率达到 1.5447W, 斜率效率达为 48.09%。

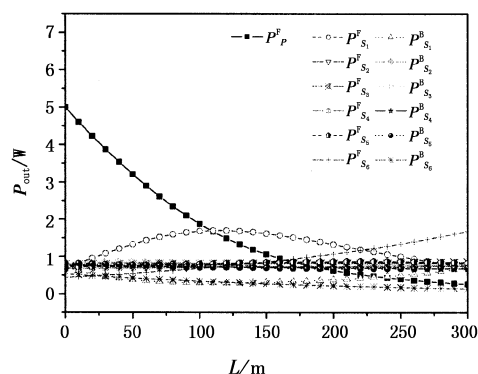


图3 六阶级联拉曼光纤激光器内泵浦光和各阶 Stokes 光的演化

在上面求解的基础上,模拟分析了泵浦功率,输出反射镜反射率,光纤长度等对输出特性的影响。图4(a)可以看出随着泵浦光功率的增加,输出功率呈线性增加。图4(b)中可以看出输出功率随着光纤长度先增加到达峰值后慢慢减小。 $R_{\text{out}} = 10\%$ 的最大输出功率 1.5447W,对应光纤长度 300m; $R_{\text{out}} = 20\%$ 的最大输出功率 1.4339W 对应的光纤长度 280m。比较曲线可知,随着光纤长度的增加,拉曼增益不断增大,损耗也随之增大,因此输出功率增加达峰值后缓慢开始减小。在图4(c)中可以看出输出功率先随输出反射镜反射率增加而增加,到达顶峰后迅速减小, $L = 150\text{m}$ 功率峰值为 1.1461W, $L = 250\text{m}$ 的最大输出功率 1.5346W。从图4(c)也可以

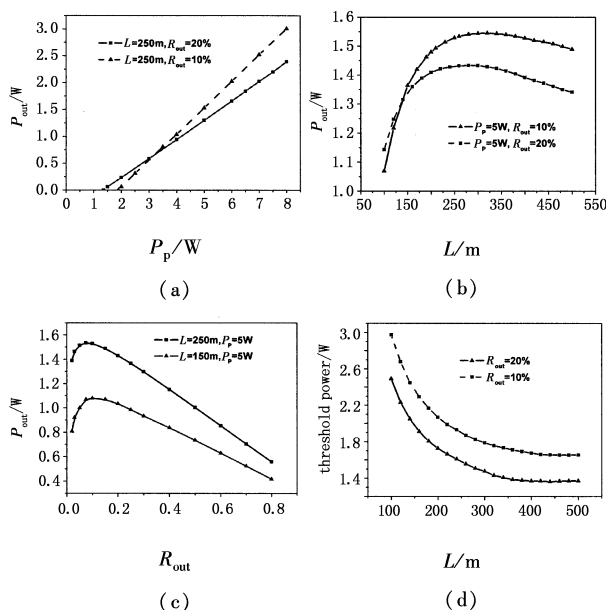


图4 模拟结果

(a)输出耦合器反射率不同时,输出功率随泵浦功率的变化;(b)输出耦合器反射率不同时,输出功率随光纤长度的变化;(c)光纤长度不同时,输出功率随输出耦合器反射率的变化;(d)输出耦合器反射率不同时,阈值功率随光纤长度的变化

看出,光纤为 250m 的输出功率大于 150m,与图 4(b)图所示一致。从图 4(d)中可以看出随着光纤长度的增加,阈值功率逐渐减小,在 300m 左右以后减小趋势开始变缓。结合上面分析,光纤长度一般取 300m 左右,输出反射镜反射率一般取 10% ~ 15%。

5 结论

利用打靶算法求解多阶级联拉曼光纤激光器非线性耦合方程存在初值不收敛的现象,本文提出先用遗传算法对初值功率进行优化选择,解决了打靶算法初值收敛的问题,然后用打靶算法结合龙格—库塔法进行数值求解,结果表明该算法稳定有效。

参考文献:

- [1] John Au Yeung, Amnon Yariv. Theory of cw Raman oscillation in optical fibers [J]. J. Opt. Soc. Am., 1979, 69 (6): 903 - 807.
- [2] E M Dianov, D G Fursa, A A Abramov, et al. Raman fiber-optic amplifier of signals at the wavelength of 1.3 μm [J]. Quantum. Electron., 1994, 24: 749 - 751.
- [3] E M Dianov, I A Bufetov, M M Bubnov, et al. Three cascaded 1407 nm Raman laser based on phosphorus doped silica fiber [J]. Optics Lett., 2000, 25 (6): 402 - 404.
- [4] Matteo Rini, Ilaria Christiani, Vittorio Degiorgio. Numerical modeling and optimization cascaded CW Raman fiber lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36 (10): 1117 - 1122.
- [5] Chi Ronghua, Yun Peng, SuHongxin, et al. Numerical simulation and analysis of two cascaded Raman fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 9 (29): 773 - 776. (in chinese)
- [6] Han Qun, Ning Jiping, Chen Zhiqiang, et al. An efficient shooting method for fibre Raman amplifier design [J]. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2005, 7: 386 - 390.
- [7] Holsapple, R Venkataraman, R Doman, D. Texas Tech University. A modified simple shooting method for solving two-point boundary-value problems [A]. Aerospace Conference, 2003: 2783 - 2790.
- [8] 雷英杰, 张善文, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [9] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 36 - 37.