

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0621

基于改进粒子群算法的后向泵浦 RFA 设计

巩稼民^{1*}, 卢姣姣², 高睿杰¹, 刘 威², 吴成超², 郭刘飞¹

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 为了满足第六代移动通信(6G)系统对光通信网络的高速率及大容量的要求, 进一步提高光传输网络中光纤放大器的带宽、响应速率及放大倍数等成为目前的研究重点。在使用碲酸盐光纤作为光纤增益介质的同时, 提出一种改进粒子群优化算法, 通过在迭代过程中动态的调整速度、位置及惯性权重值, 获得更高收敛速度, 增强全局搜索的能力。应用该算法对拉曼光纤放大器的各个泵浦光参数配置进行优化、分析及仿真验证, 最终设计出平均开关增益为 23.7388 dB, 增益平坦度为 0.2098 dB 的后向泵浦拉曼光纤放大器。结果表明, 改进的粒子群优化算法对拉曼放大器泵浦光的参数配置有很强的适应性, 能够获得较低的增益平坦度, 对未来拉曼光纤放大器的设计具有一定的参考意义。

关键词: 拉曼光纤放大器; 改进粒子群优化算法; 后向泵浦; 碲酸盐光纤

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)04-0436-07

Design of back-pumping Raman fiber amplifier based on modified particle swarm optimization algorithm

GONG Jiamin^{1*}, LU Jiaojiao², GAO Ruijie¹, LIU Wei², WU Chengchao², GUO Liufei¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the sixth generation mobile communication (6G) system for high speed and large capacity of optical communication network, further improving the bandwidth, response rate and amplification of optical fiber amplifier in optical transmission network has become the focus of current research. Tellurium fiber is used as fiber gain medium, and a modified particle swarm optimization algorithm is proposed, which dynamically adjusts the individual velocity, position and inertial weight values during the iterative process to obtain higher convergence speed and enhance the global search capability. The algorithm is applied to optimize, analyze and verify the configuration of each pump light parameter of Raman fiber amplifier, and finally, the average gain of the back-pumping Raman fiber amplifier is up to 23.7388 dB and the gain fluctuation is about 0.2098 dB. The results show that the modified particle swarm optimization algorithm can optimize the Raman fiber amplifier pump power and wavelength accurately and quickly, and can improve the performance of Raman fiber amplifier effectively, which has a certain reference significance for the design of Raman fiber amplifier in the future.

Key words: Raman fiber amplifier; modified particle swarm optimization; back-pumping; tellurium fiber

1 引 言

随着 5G 网络的商用化, 6G 系统研究的逐步开展^[1], 现代光通信网络面临的挑战逐渐转变为

提高光信号的传输速率、提升密集波分复用的能量及信号的快速放大能力^[2]。而在光信号的传输过程中拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)凭借其增益高, 谱宽宽, 脉冲窄及响应时间

* E-mail: gjm@xupt.edu.cn

收稿日期: 2021-09-02 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61775180)和国际科技合作计划项目陕西省重点研发计划(2020KWZ-017)资助项目

只有亚皮秒量级等特性^[3],成为解决上述问题的重要途径之一。而如何合理、快速且高效的配置 RFA 多个泵浦光的参数,使 RFA 的增益和平坦度提升,仍是研究的重点。崔炳华等^[4]应用遗传算法与打靶法结合数值仿真得到了带宽为 80 nm,平均开关增益 5.93 dB,增益起伏小于 1 dB 的后向泵浦 RFA。周维军等^[5]在 5 个泵浦的激励下,仿真得到了 80 nm 带宽的后向泵浦 RFA,其增益达到 8 dB,平坦度小于 1 dB。钟奇润^[6]在 C 波段通过采用 2 个泵浦的激励方式设计得到了±8 dB 的开关增益及±0.6 dB 的平坦度的后向泵浦 RFA。陈静等^[7]运用人工蜂群算法进行 C 波段的反向抽运拉曼光纤放大器设计实验,最终得到最大净增益为 3.96 dB,平坦度为 0.3 dB 的 RFA。可见前人的研究并没有在光纤放大器的平均增益及增益平坦度等方面同时达到较好的性能,而存在着不同的缺陷。因此,本文运用四阶龙格库塔法及打靶法对拉曼耦合微分方程进行数值求解,使用改进的粒子群算法对泵浦光的参数进行优化,通过扩大泵浦光参数的可行搜索范围,使算法在搜索过程中能够更全面、高效且快速的得到最佳的泵浦光参数配置。最终实现对 C 波段信号光的放大,实现后向泵浦 RFA 高增益和低平坦度的输出。

2 基本原理

2.1 理论原理

拉曼放大器要实现信号光的放大,主要是基于受激拉曼散射效应^[3]。当不同波长的信号光和泵浦光同时耦合注入光纤中进行传输时,两者的频差刚好处于光纤放大介质的增益谱范围内时就会产生受激拉曼散射效应,信号光通过吸收泵浦光的能量实现自身能量的放大。考虑了信号光在传输过程中产生的损耗,信号光与信号光、信号光与泵浦光、泵浦光与泵浦之间的受激拉曼散射效应,以及自发辐射和瑞利散射等对 RFA 的影响,光纤拉曼放大器的数学模型为简化的非线性拉曼耦合微分方程^[8],其表示为:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_j}{dz} = & \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_j - \sum_{v_k < v_j} \frac{v_j}{v_k} \times \\ & \frac{g_R(v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_k - \alpha_j P_j + \\ & \gamma_j P_{j+} + 2h v_i \cdot \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j \cdot 1 + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{e^{h(v_i - v_j)/KT} - 1} \cdot \Delta v, \quad (1)$$

式中, v_i, v_j, v_k 分别表示 i, j, k 信道的光频率, P_i, P_j, P_k 分别表示 i, j, k 信道的光功率, $g_R(v_i - v_j)$ 和 $g_R(v_j - v_k)$ 分别表示第 i 和第 j 信道两路光之间的拉曼增益系数以及第 j 和第 k 信道两路光之间的拉曼增益系数, K_{eff} 是偏振因子,通常情况下取 $K_{\text{eff}} = 2$, A_{eff} 是光纤有效纤芯面积, α_j 是第 j 路光波在光纤中传输的衰减系数, $\gamma(v_i)$ 为瑞利散射系数, K 和 h 分别表示波尔兹曼常量和普朗克常量, $[e^{h(\xi - v)/KT} - 1]^{-1}$ 为玻色-爱因斯坦因子, T 为光纤绝对温度。

式(1)中,正负号分别表示 RFA 泵浦光采用的前向或后向泵浦方式注入进光纤,由于后向泵浦结构可减小泵浦光与信号光相互作用的长度,具有较好的噪声性能以及较低的增益平坦度,故本文采取后向泵浦的方式,因此式(1)方程中符号取正号。在拉曼耦合微分方程基础上,利用 4 阶龙格库塔法^[9]对其求解,其具体处理表示为:

$$\begin{cases} P(i+1, j) = P(i, j) + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \times \frac{h}{6} \\ k_1 = f(z_i, P(i, j)) \\ k_2 = f\left(z_i + \frac{h}{2}, P(i, j) + h \times \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 = f\left(z_i + \frac{h}{2}, P(i, j) + h \times \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 = f(z_i + h, P(i, j) + h \times k_3), \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P(i, j)$ 为第 i 次迭代时,第 j 路信号光对应的功率值,且步长为 h 。根据式(2)对式(1)进行离散化处理。

由于 4 阶龙格库塔法只能解决初值问题,对后向泵浦的结构中泵浦光从光纤末端进入即在光纤前端没有初始值的情况下,就需要对边值问题专门进行求解,而打靶法是求解边值问题的有效方法之一^[10,11],因此本文使用 4 阶龙格库塔法与打靶法相结合求解拉曼耦合波微分方程。

2.2 拉曼放大器结构设计

后向泵浦拉曼放大器结构图如图 1 所示,从光纤前端输出的信号光经过波分复用器与从光纤末端注入的泵浦光一同在 $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ (TBZN) 碲酸盐玻璃光纤中^[12]进行传输,传输过程中产生受激拉曼散射效应,放大信号光的能量,最终由滤波器滤掉多余的光输出。图中 $\lambda_1 - \lambda_{51}$ 为 C 波段即

1 530 nm—1 565 nm 带宽内共 50 个信道中传输的信号光波长。 λ_{p1} — λ_{p4} 为从光纤末端耦合进的四路泵浦

光波长,分别为 1 400 nm、1 440 nm、1 470 nm 和 1 490 nm。

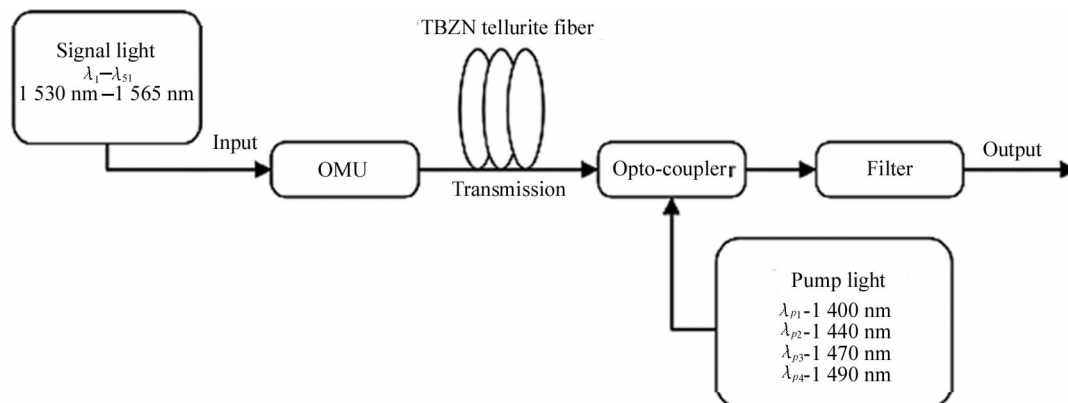


图 1 后向泵浦拉曼放大器结构图

Fig. 1 Structure of back-pumping Raman fiber amplifier

2.3 碲基光纤及其拉曼增益谱

要实现高增益输出的 RFA, 传输介质需具有较高的拉曼增益系数。与氟化物光纤和硫化物光纤相比, 碲酸盐光纤^[13]具有更宽的拉曼增益带宽和更好的物理化学性质。如图 2 所示, 为 TBZN 型碲酸盐光纤的拉曼增益谱及其在 0.5—5 μm 波长范围内的损耗谱。从图中可以得到该光纤具有很宽的频移范围, 当信号光与泵浦光的频移范围在 $[0, 1\ 100]\text{cm}^{-1}$ 内, 均能实现信号光的放大。当放大 C 波段的信号光时, 由于 RFA 的专属特性即只要泵浦光与信号光的频差在光纤的拉曼增益谱范围内就能实现不同程度的放大。基于此特点, 本文采用拉曼增益谱在 $[300, 800]\text{cm}^{-1}$ 范围内的增益谱曲线进行放大, 设定泵浦光的波长在 1 400—1 500 nm 范围内。且由图知当信号光处于 C 波段时, 光波在光纤内传输的损耗在 0.25 dBm 左右。

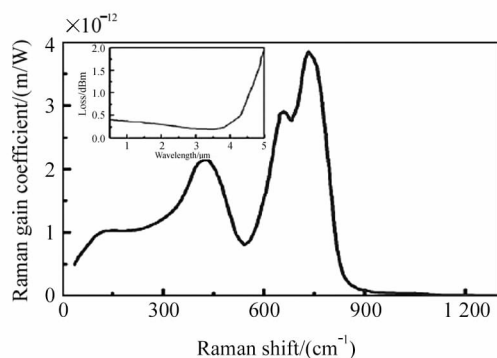


图 2 TBZN 碲基光纤的拉曼增益谱及损耗谱

Fig. 2 Raman gain spectrum and loss spectrum of TBZN tellurite fiber

RFA 的增益及增益平坦度表达式为:

$$G = 10 \lg \frac{P_j(L)}{P_j(0)}, \quad (3)$$

$$\Delta = \max(G) - \min(G), \quad (4)$$

式中, $P_j(0)$ 、 $P_j(L)$ 分别为第 j 路信号光的初始输入光功率和传输 L 千米后的光功率。

增益平坦度表示为增益的最大值与最小值的差, 差值越小即越平坦。上述 2 者为评价 RFA 性能的重要指标。

3 改进的粒子群优化算法

传统的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法源于对鸟类觅食行为的模拟, 鸟类个体凭借自身的经验和空间中其他个体的状态, 而动态的改变自身运动方向和速度来获取食物的过程^[14]。在应用 PSO 优化算法的过程中, 需要将被优化的目标看作是一个个单独的粒子, 在特定范围内, 通过不断地搜索、迭代、更新每个粒子的位置和速度信息, 直至找到粒子的最优位置得到全局最优位置, 即问题的最优解, 对式 (1) 方程的求解有很强的适应性。

在传统 PSO 算法中, 设定搜索维度为 D , 粒子总数为 M , 迭代总次数为 T , 第 i 个粒子的位置用 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 这样一个 D 维向量来表示, 其中 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}$ 分别为每一个分量的位置信息, 同理第 i 个粒子的速度用 D 维向量 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 来表示, 其中 $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}$ 分别为每一个分量的速度信息。寻优开始时, 每个粒子的位置和速度均在

D 维搜索空间中随机初始化,同时根据适应度函数不断更新每个粒子的最优值和全局最优值。虽 PSO 算法具有寻优速度快,求解步骤简单等优点,但其容易陷入局部最优解的瑕疵也是不可忽视的,目前有多种对粒子群优化算法进行改进的实例^[15,16]。

本文在传统 PSO 算法的基础上,采用变惯性权重改进粒子群优化算法,其表达式(5)所示,其中前 2 个等式分别表示第 $k+1$ 次 i 粒子在第 d 次迭代的速度信息 v 及位置信息 x ,第 3 个等式表示对惯性权重的约束,在不同次迭代时,取不同的权重值使得粒子按照不同的速度进行搜索,在扩大粒子搜索范围的同时提高其迭代的效率,避免由于搜索开始与结束时的速度相同而产生的搜索陷入局部范围的困境。根据式(5)一次次更新粒子的信息,逐步实现在优化 RFA 泵浦光波长和功率配置的过程中,得到最终关于 RFA 的平均增益和增益平坦度的最优值。

$$\begin{cases} v_{id}^{(k+1)} = w \cdot v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \\ w = (w_1 + w_2) \cdot (T - I) / T + w_2, \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_{id} 表示 i 粒子在第 d 次迭代的位置信息, v_{id} 表示 i 粒子在第 d 次迭代的速度信息, p_{id} 为 i 粒子在第 d 次迭代时的个体极值, p_{gd} 为当前的所有粒子在该次迭代的全局最优值, c_1 、 c_2 分别为学习因子, r_1 、 r_2 分别为 $[0,1]$ 范围内的随机数。 w 为惯性权重, I 为当前迭代次数, w_1 和 w_2 分别为惯性权重 w 的初始值和终值。

通过对权重加以约束,使得在不同次迭代时通过取得不同的权重值从而实现不同次搜索速度的控制,避免了搜索粒子趋向区域化,改善了粒子寻优的范围和质量,体现了收敛速度的变化,为后续 RFA 泵浦参数合理配置打下基础。其优化算法运算流程如图 3 所示,其中适应度函数定义为增益与平坦度的比值,在满足适应度函数的基础上进一步更新粒子的各项状态,直至最终达到最大迭代次数时输出搜索得到的最优值,输出最优的泵浦光波长和功率配置下的平均增益及增益平坦度数值。

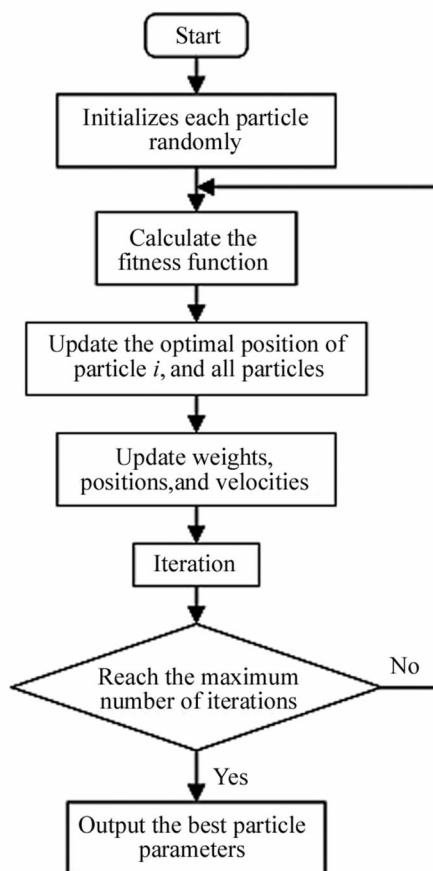


图3 改进的粒子群优化算法运算流程

Fig. 3 Flow chart of the improved PSO algorithm operation

4 参数选择与优化结果分析

4.1 参数选择

在利用改进的粒子群优化算法进行参数优化时,需要对算法的基本优化参数进行设定,如表1所示。

表 1 基本优化参数
Tab. 1 Basic optimization parameters

Parameter name	Values
c_1, c_2	1
w_1	0.5
w_2	0.4
Maximum iteration number/T	200
Fiber length/m	25
Wavelength range of signal light/nm	1 530—1 565
Number of signal light	50
Signal power/W	0.1
Number of pump light	4
Maximum pump wavelength/nm	1 490
Minimum pump wavelength/nm	1 400

4.2 仿真结果分析

根据打靶法与 4 阶龙格库塔法的组合求解简化后的经典拉曼耦合波方程并经过改进后的变权重粒子群优化算法后得到的 3 组优化结果如表 2 所示。由于是对整个 C 波段的信号光进行优化,在综合考虑拉曼增益介质碲基光纤的拉曼增益谱及损耗谱的同时,还要考虑优化是在一定范围空间内进行随机取值后得到最优解。本文在优化时设定 4 个泵浦光的波长范围分别为 1 400—1 440 nm, 1 420—1 460 nm, 1 440—1 480 nm 和 1 460—1 500 nm。且根据打

表 2 优化结果
Tab. 2 Optimization results

Parameter	Optimized data set		
	A	B	C
λ_{p1}/nm	1 418.713 6	1 429.416 2	1 429.661 4
λ_{p2}/nm	1 440.678 0	1 440.253 3	1 434.002 2
λ_{p3}/nm	1 445.794 3	1 444.723 4	1 444.772 9
λ_{p4}/nm	1 482.606 7	1 463.606 0	1 465.632 4
P_1/W	0.006 4	0.007 1	0.007 4
P_2/W	0.068 0	0.086 7	0.077 0
P_3/W	0.196 0	0.259 8	0.223 3
P_4/W	1.707 0	1.717 9	1.705 1
Gain/dB	22.736 7	23.738 8	22.690 9
Δ/dB	0.546 3	0.209 8	0.602 6

靶得到的各个泵浦光在光纤前端的功率值基础上设定各个泵浦光的功率范围为 0—0.1 mW, 0—0.1 mW, 0.15—0.3 mW 和 1.5—1.8 mW。其余优化具体参数参照上述表 1。

优化前,泵浦光波长分别为 1 440 nm、1 440 nm、1 470 nm 和 1 490 nm,功率分别为 0.003 3 W、0.088 2 W、0.329 7 W 和 1.678 3 W,迭代次数为 251,步长为 0.1,光纤长度为 25 m,得到的平均增益为 21.603 1 dB,增益平坦度为 4.107 5 dB。对比表 2 可明显得出经过改进 PSO 算法优化后得到的功率和平坦度均有明显的提升,对比 A、B 和 C 3 种数据,可分析出其中 B 组数据的性能最优,其平均增益可达 23.738 8 dB,增益平坦度低至 0.209 8 dB。由此可知改进的 PSO 算法对 RFA 的参数优化是有效的。如图 4(a)、(b)分别为优化前得到的拉曼增益谱图和优化后 B 组数据得到的 RFA 输出增益谱图,从图中可以得出由于泵浦光的各项参数配置不合理,导致优化前对信号光放大程度不同,即在 1 440 nm 波长处的放大程度最低,1 490 nm 处的放大程度最高,呈现拉曼增益逐渐上升的趋势。而优化后的整个拉曼增益谱线趋于平直,更直观的体现了改进 PSO 算法对 RFA 泵浦光参数的优化适用性。

信号光随光纤长度变化如图 5 所示,在经过 25 m 光纤的传输后,由于放大器结构采用后向泵浦注入的模式,所以在光纤前半部分传输时,信号光并未与泵浦光相遇,无法通过受激拉曼散射效应吸收泵浦光的能量实现自身的放大,且在光纤传输中由于光纤固有的损耗即必要的散射损耗等使其在光纤前半段传输时自身功率在逐渐减小,直到在光纤 15—20 m 处才得到泵浦光的能量转移,且泵浦光转移给信号光的能量大于信号光传输时的损耗,因此实现了放大,并在光纤末端实现增长趋势。

泵浦光随光纤长度变化如图 6 所示。图 6 显示出从光纤末端注入的泵浦光,第 1 和第 2 路泵浦光呈现快速衰减趋势,其中第 1 路泵浦光衰减的趋势比第 2 路泵浦光的衰减趋势更明显,造成这种趋势是由于受激拉曼散射效应不仅发生在泵浦光和信号光之间,同样的,只要当泵浦光与泵浦光之间的频差处于拉曼增益谱宽内同样也可以实现泵浦光的放大,所以第 1 路泵浦光的能量在转移给信号光的同时也转移给了其余几路泵浦光。其中第 3 路和第 4 路泵浦光均呈现先增大后减小的趋势,分别在光纤长度为 22 m 处和 15 m 处达到其功率最大值,也是由于在 15—20 m 处泵浦光与信号光相遇,将自身的大部

分能量转移给信号光,用来放大信号光,所以在光纤前端的泵浦光能量分别衰减到 0.007 1 W,0.086 7

W,0.259 8 W 及 1.7179 W。

而信号光在光纤中传输时,不可避免的会产生

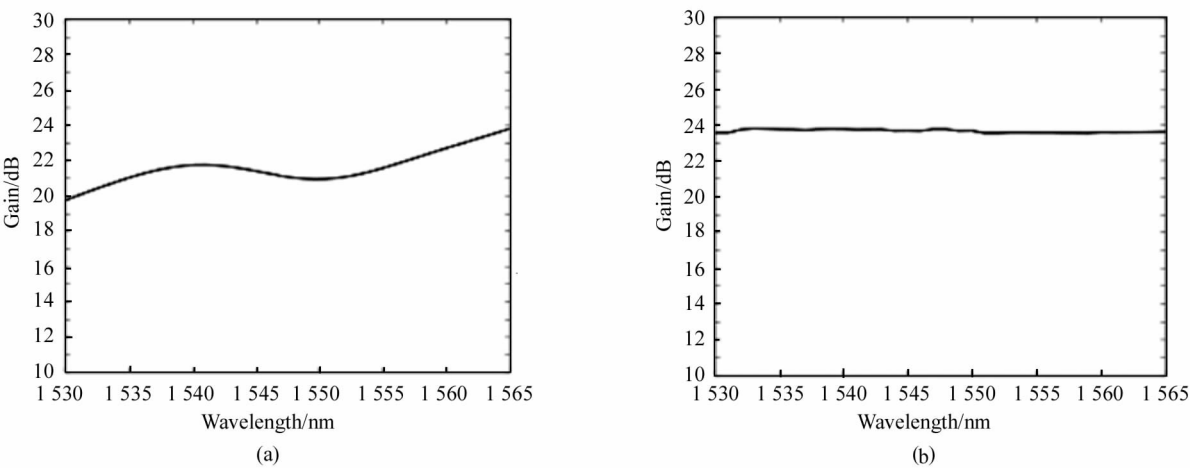


图 4 优化前后的 RFA 输出增益:(a) 优化前;(b) 优化后

Fig. 4 The output gain of RFA before and after optimization:(a) Before optimization;(b) After optimization

双向瑞利散射噪声(double rayleigh scattering, DRBS),其传输过程中要经历 2 次放大,对散射波而言其放大过程中既有正向传输部分也有反向传输部分。在后向泵浦方式 RFA 结构下,开始正向传输的散射波与泵浦光在光纤末端相遇后得到自身放大,放大后的散射波则进一步在光纤中进行传输最终输出。由于第 1 次散射波从光纤前端传输到后端时并未经过放大,即噪声也并未放大,所以相对于前向泵浦结构,后向泵浦结构下的 DRBS 噪声系数要小于前向。图 7 为优化前与优化后的 DRBS 噪声增益曲线图,其中优化前的平均 DRBS 噪声增益为 2.164 8 dB,噪声增益平坦度为 0.257 9 dB,经过优化后的平均 DRBS 噪声增益为 1.795 4 dB,平坦度为 0.301 9

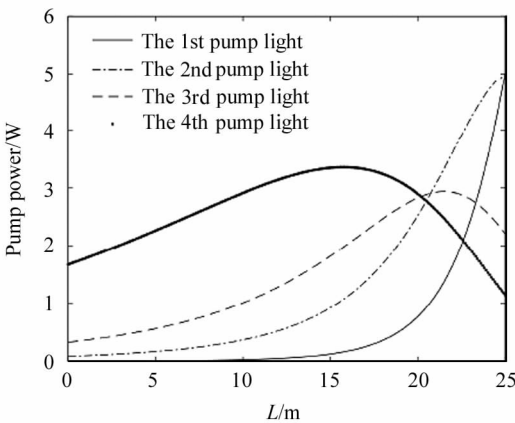


图 6 泵浦光随光纤长度变化

Fig. 6 The variation of pump light power with fiber length

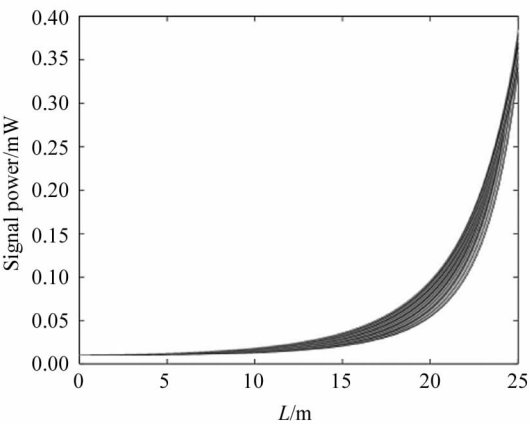


图 5 信号光随光纤长度变化

Fig. 5 The variation of signal light power with fiber length

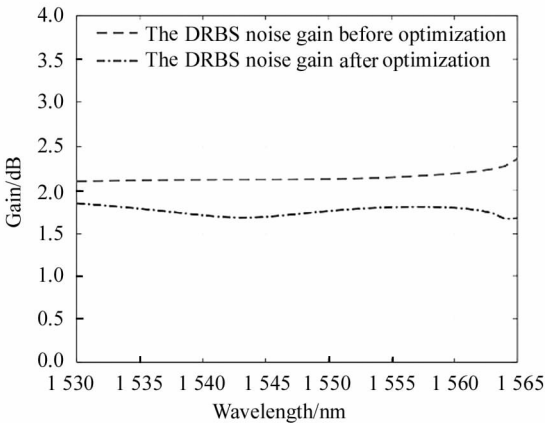


图 7 优化前后的 DRBS 噪声增益

Fig. 7 The DRBS noise gain before and after optimization

dB。由此可见,经过改进粒子群优化算法优化后,系

统平均开关增益提高,增益平坦度减小的同时,系统的 DRBS 噪声增益也降低了 0.37 dB,噪声性能也得到了提升。

5 结 论

本文采用高非线性 TBZN 碲酸盐光纤作为后向泵浦拉曼放大器的传输增益介质,理论上运用打靶法与 4 阶龙格库塔法的组合求解简化后的拉曼耦合波微分方程,再使用改进后的变惯性权重粒子群优化算法对整个系统的泵浦光的参数进行优化,最终设计出了平均增益为 23.7388 dB,平坦度为 0.2098 dB 的后向泵浦拉曼光纤放大器,证明了改进后的粒子群优化算法在对 RFA 整体结构参数即增益与平坦度优化的有效性。同时也分析了优化后的放大器泵浦光与信号光随光纤长度的变化,以及 DRBS 噪声性能在优化后的改善。本文所设计的后向泵浦 RFA 作为一种分立式 RFA,能够以其良好的性能应用于通信系统传输网络中,且改进的粒子群优化算法凭借其良好的全局搜索性能也对拉曼光纤放大器的设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] CHI N, JIA J L. Visible communication light facing 6G[J]. ZTE Communications, 2020, 26(2): 11-19.
迟楠,贾俊连.面向 6G 的可见光通信[J].中兴通讯技术, 2020, 26(2): 11-19.
- [2] CHEN L, YU S H. Preliminary study on the development trend of 6G mobile communication[J]. Study on Optical Communications, 2019(4): 1-8.
陈亮,余少华. 6G 移动通信发展趋势初探[J].光通信研究, 2019(4): 1-8.
- [3] LUIGI S, MARIA A F. Fiber amplifiers and fiber lasers based on stimulated Raman scattering: A Review[J]. Micromachines, 2020, 11(3): 247.
- [4] CUI B H, QIU Q, XUE F, et al. Research on optimization algorithm of multi-wavelength back-pumping Raman amplifier[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003(3): 296-299.
崔炳华,邱琪,薛飞,等.多波长后向泵浦拉曼放大器优化算法研究[J].电子科技大学学报, 2003(3): 296-299.
- [5] ZHOU W J, WANG R B, LI Z R. Experimental study on distributed fiber Raman amplifier[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 373-376.
周维军,王荣波,李泽仁.分布式光纤喇曼放大器实验研究[J].激光技术, 2010, 34(3): 373-376.
- [6] ZHONG Q R. Design and experiment of pumping module of Raman fiber amplifier[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 44-49.
- 钟奇润.拉曼光纤放大器泵浦模块的设计与实验研究[D].合肥:合肥工业大学, 2016: 44-49.
- [7] CHEN J, ZHOU Q X, LIN Y T, et al. Optimization design of multi-pump Raman amplifier based on artificial bee colony algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 59-64.
陈静,周清旭,林雅婷,等.基于人工蜂群算法的多抽运拉曼光纤放大器优化设计[J].光学学报, 2018, 38(6): 59-64.
- [8] ALI M H, ALAA H, ALI, SINAN M. Abdulsatar, et al. Pump-power optimization for hybrid fiber amplifier utilizing second order stimulated Raman scattering[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(2).
- [9] FENG J Q, SUN Sh Y. Principle and application of fourth order Runge Kutta method[J]. Mathematics Learning and Research, 2017(17): 3-5.
- [10] LIU H L, ZANG Z X, ZHUANG S L. The transmission equation of a bidirectional pumped Raman amplifier is solved by the shooting method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004(12): 46-49.
刘红林,张在宣,庄松林.用打靶法求解双向泵浦的拉曼放大器传输方程[J].光电工程, 2004(12): 46-49.
- [11] SAHU K S, JENA M Kr. Combining the shooting method with an operational matrix method to solve two point boundary value problems[J]. International Journal of Applied and Computation Mathematics, 2021, 7(2): 1-19.
- [12] ZHU G W, GENG L X, ZHU X S, et al. Towards ten-watt-level 3—5 μm Raman lasers using tellurite fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7559-7573.
- [13] LEI W J. Study on supercontinuous properties of tellurite glass and its microstructure fiber[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 23-29.
雷雯婕.碲酸盐玻璃及其微结构光纤的超连续特性研究[D].南京:南京邮电大学, 2019: 23-29.
- [14] GONG J M, DING ZH, LI S P, et al. Research on wide-band Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. Study on Optical Communications, 2018(5): 46-51+68.
巩稼民,丁哲,李思平,等.基于粒子群优化的宽带拉曼光纤放大器研究[J].光通信研究, 2018(5): 46-51+68.
- [15] JIANG L, YE R Z, LIANG C Y, et al. Improved second-order oscillatory particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(9): 130-138+167.
蒋丽,叶润舟,梁昌勇,等.改进的二阶振荡粒子群算法[J].计算机工程与应用, 2019, 55(9): 130-138+167.
- [16] YAO C ZH, YANG J M. Improved PSO algorithm based on variable inertia weight and dynamic neighborhood[J]. Computer Engineering, 2011, 37(21): 20-22.
姚灿中,杨建梅.基于变惯性权重及动态邻域的改进 PSO 算法[J].计算机工程, 2011, 37(21): 20-22.

作者简介:

巩稼民 (1962—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光电子和光通信方面的研究。