

DOI:10.16136/j.joel.2023.06.0590

基于自适应差分进化算法的拉曼放大器设计

蒋杰伟^{1*}, 魏戌盟², 巩稼民³, 刘海洋¹, 刘尚辉², 金 库²

(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; 3. 西安邮电大学 现代邮政学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 为满足下一代 6G 网络对光通信网络提出的传输容量大、速率高及传输时延低的要求, 本文将碲酸盐光纤作为光纤增益介质, 并利用自适应差分进化 (adaptive differential evolution, ADE) 算法对拉曼光纤放大器 (Raman fiber amplifier, RFA) 的泵浦参数进行优化。该算法通过引入自适应算子控制变异率的大小, 在保持个体多样性的同时增强全局搜索最优解的能力。最终设计出一款覆盖 100 nm 带宽范围、平均增益为 28.27 dB、增益平坦度为 0.65 dB 的多泵浦 RFA。同时, 在该模型基础上分别研究了泵浦功率和光纤长度对拉曼放大器增益及增益平坦度的影响, 为设计和优化多泵浦拉曼放大器模型提供了参考。

关键词: 拉曼光纤放大器 (RFA); 自适应差分进化 (ADE) 算法; 多泵浦; 碲酸盐光纤
中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)06-0561-08

Design of Raman amplifier based on adaptive differential evolution algorithm

JIANG Jiewei^{1*}, WEI Xumeng², GONG Jiamin³, LIU Haiyang¹, LIU Shanghui², JIN Ku²

(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; 3. School of Modern Post, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

Abstract: To meet the requirements of high transmission capacity, high rate, and low transmission delay proposed by next-generation 6G networks for optical communication networks, this study employs tellurite fiber as the fiber gain medium and optimizes the pumping parameters of the Raman fiber amplifier (RFA) using adaptive differential evolution (ADE) algorithm. By introducing an adaptive operator, the algorithm controls the mutation rates to maintain individual diversity and enhance the ability to search for the optimal solution globally. Finally, a multi-pump RFA is designed, which has bandwidth range of 100 nm, an average gain of 28.27 dB, and a gain flatness of 0.65 dB. Furthermore, the effects of pump power and fiber length on the gain and gain flatness of the Raman amplifier are studied on the basis of this model, which provides a reference for designing and optimizing the multi-pump Raman amplifier model.

Key words: Raman fiber amplifier (RFA); adaptive differential evolution (ADE) algorithm; multi-pump; tellurite fiber

0 引言

未来的第 6 代移动通信网 (6 generation, 6G) 是在 5G 的基础上进行优化升级的^[1], 其具有更大的容量和更低的传输延迟, 传输能力是 5G 的 100

倍^[2,3]。因此, 未来的光通信网络也需要通过不断地技术革新来满足 6G 通信系统的需求。而拉曼光纤放大器 (Raman fiber amplifier, RFA) 是利用受激拉曼散射效应 (stimulated Raman scattering, SRS) 对弱信号光进行放大。相比于其他放大器,

* E-mail: jiangjw924@126.com

收稿日期: 2022-08-21 修订日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金 (62276210, 61775180)、国际科技合作计划项目陕西省重点研发计划 (2020KWZ-017) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (2022JM-380) 资助项目

RFA 具有高增益、低噪声、谱宽宽、作用时间短、可实现超短脉冲放大等特点^[4]。同时 RFA 能够弥补掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 放大带宽窄、增益不平坦的缺陷。为了使 RFA 获得最佳性能,其泵浦参数优化问题是当前研究的热点和难点。前人从不同角度提出了各种方法研究 RFA 的输出增益和平坦度。颜玢玢等^[5]于 2006 年采用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对 5 个后向泵浦 RFA 进行优化设计,实现了放大带宽为 90 nm、开关增益为 15.55 dB、增益平坦度为 0.87 dB 的多泵浦 RFA; CASTELLANI 等^[6]于 2009 年利用两个低功率泵浦源实现了在 C 波段放大带宽为 40 nm、平均拉曼增益为 8.5 dB、平坦度为 0.71 dB 的 RFA; 巩稼民等^[7]于 2014 年利用两段特殊光纤 (AsS 高非线性光纤), 同时采用多泵浦方式设计了一款前放大后补偿的拉曼放大器, 最终获得了 20.45 dB 的平均拉曼增益, 增益平坦度为 0.15 dB; 北京邮电大学的李明杰于 2015 年建立了多泵浦拉曼-掺铒光纤混合放大和二阶泵浦拉曼-掺铒光纤混合放大模型, 并利用差分进化 (differential evolution, DE) 算法对参数进行优化, 分别得到增益带宽为 93 nm、增益平坦度为 1.4 dB 和增益平坦度为 1.2 dB 的增益谱^[8]; 巩稼民等^[9]于 2018 年利用两个泵浦与两段光子晶体光纤级联方法设计了 RFA, 其放大带宽达到 61 nm、平均增益为 22.8 dB、增益平坦度为 0.42 dB。上述研究虽然都对拉曼放大器的放大谱宽、拉曼增益及增益平坦度进行了研究, 但此 3 个指标并没有同时达到最优值。

本文以碲酸盐光纤作为增益介质, 首先运用四阶龙格-库塔法求解拉曼耦合波微分方程, 同时使用自适应差分进化 (adaptive differential evolution, ADE) 算法优化各路泵浦光的参数, 然后利用自适应变异算子增加搜索全局最优解的概率, 从而得到最佳的泵浦光参数配置。本文设计的拉曼放大器可实现对 C+L 波段信号光的平坦放大。

1 基本理论

1.1 理论模型

RFA 的工作原理是利用光纤的 SRS, 向光纤中同时注入低频信号光和高频强泵浦光, 当二者的频移差处于该增益光纤的拉曼增益谱带宽范围内时, 会产生 SRS, 使得部分泵浦光的功率转移到频率更低的信号光中, 从而实现对信号光的放大。

RFA 增益平坦优化问题, 主要考虑光纤长度、光纤损耗、泵浦光与信号光之间的 SRS, 而忽略其他非线性效应、瑞利散射以及热噪声带来的影响^[10]。基

于此, 得出简化后的拉曼耦合波微分方程, 如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_j}{dz} = & \sum_{\nu_i > \nu_j} \frac{g_R(\nu_i - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_j - \\ & \sum_{\nu_k < \nu_j} \frac{\nu_j}{\nu_k} \frac{g_R(\nu_j - \nu_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \\ & \alpha_j P_j \quad (j = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, P_i 、 P_j 、 P_k 分别表示第 i 、 j 、 k 路信道的光功率, ν_i 、 ν_j 、 ν_k 分别表示第 i 、 j 、 k 路信道的光频率, $g_R(\nu_i - \nu_j)$ 表示第 i 路和第 j 路信道的两路光频率差对应的拉曼增益系数, $g_R(\nu_j - \nu_k)$ 表示第 j 路和第 k 路信道的两路光频率差对应的拉曼增益系数, A_{eff} 是指光纤有效纤芯面积, K_{eff} 为偏振相关因子, 通常取 2, α_j 表示第 j 路光波中传输的衰减系数。

由于本文多泵浦的注入方式均为前向, 因此式(1)中符号为正。本文基于四阶龙格-库塔法对式(1)进行数值求解, 具体的求解过程如式(2)所示:

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

式中, $P(i, j)$ 表示第 j 路信道在第 i 次迭代时的功率值, h 为四阶龙格-库塔法迭代的步长, $P(i+1, j)$ 为第 $i+1$ 次迭代时第 j 路信道的功率值, 是由第 i 次迭代时的值加上迭代步长与一个估算的斜率乘积所决定, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别指起始处、两个中点处以及终点处的斜率值。

1.2 拉曼放大器的结构设计

本文所设计的 RFA 结构如图 1 所示。信号光与泵浦光从光纤前端输入, 经过光复用器 (optical multiplexer unit, OMU) 同时在光纤中传输, 由于发生了 SRS 相互作用, 信号光从泵浦光中获得能量而得到放大。然后通过光解复用器 (optical demultiplexer unit, ODU) 滤除泵浦光, 进而输出各路信号光。在图 1 中, 信号光的波长范围是 1530 nm—1630 nm, 共 100 路信号光; λ_{p1} — λ_{p6} 是指在光纤前端注入的 6 路泵浦光。

1.3 碲基光纤增益谱分析

与硫系光纤和氟化物光纤相比, 碲酸盐光纤的拉曼增益谱更宽, 物理化学稳定性更好^[11]。TeO₂-Bi₂O₃-ZnO-Na₂O (TBZN) 碲酸盐玻璃光纤的拉曼增益谱图及损耗谱如图 2 所示。从图中不难看出: 当泵浦光与信号光的频移差位于 [0, 1100] cm⁻¹ 范围内时, 信号光均能得到放大; 碲基光纤在 740 cm⁻¹ 附

近的拉曼增益系数 (3.8×10^{-12} m/W) 比石英光纤^[12]的拉曼增益系数 (1.0×10^{-13} m/W) 高出一个数量级,此时,碲基光纤只需十几米到几十米便可实现泵浦光能量的转移和信号光的放大。

为了使得到的增益和增益平坦度性能较优,本文定义 ADE 算法的适应度函数如式(3)所示:

$$fit = \frac{G}{\max(G) - \min(G)}, \quad (3)$$

式中, G 表示 RFA 的开关增益, $\max(G)$ 为开关增益的最大值, $\min(G)$ 为开关增益的最小值, $\max(G)$ 与 $\min(G)$ 的差表示 RFA 的增益平坦度, 定义为 Δ 。适应度值 fit 的大小反映了 RFA 的性能

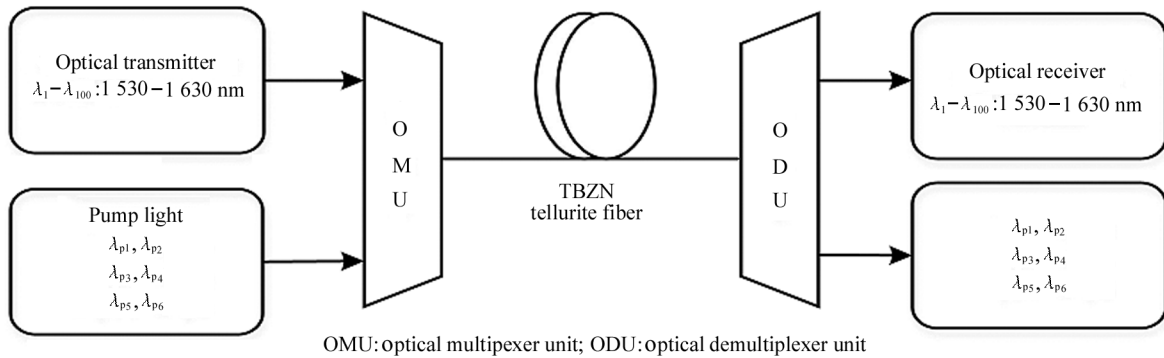


图 1 拉曼光纤放大器结构图

Fig. 1 Structure diagram of Raman fiber amplifier

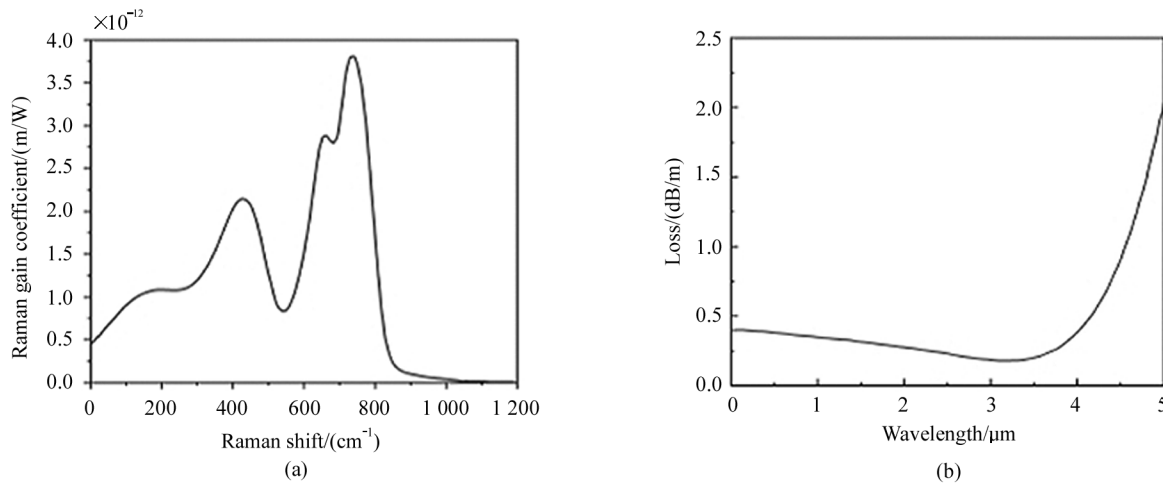


图 2 TBZN 碲基光纤拉曼增益谱和损耗谱:(a) 拉曼增益谱; (b) 损耗谱

Fig. 2 Raman gain spectrum and loss spectrum of TBZN tellurium fiber:(a) Raman gain spectrum; (b) Loss spectrum

优劣。适应度值越大,平坦度越小,放大器输出端输出的增益越平坦;适应度值越小,则情况相反。

2 基于 ADE 算法的 RFA 参数优化

传统的 DE 算法是一种基于群体差异的启发式随机搜索算法,通过随机生成初始种群,以种群中每个个体的适应度值为选择标准来寻找最优参数配置,算法的主要操作包括变异、交叉和选择^[13,14]。DE 算法具有结构简单、较强的全局收敛能力和鲁棒性等特点,因此已经在许多领域得到了应用。

在传统 DE 算法搜索过程中,变异算子设置为常数,但在实施过程中变异算子较难确定。如果变异算子设置太大,算法的搜索效率会降低,同时所求得

的全局最优解的精度也较低;如果变异率设置太小,会使得种群的多样性降低,易陷入局部最优而导致早熟^[15]。鉴于此,本文在传统 DE 算法的基础上,将自适应算子融合进 DE 算法中,形成如式(4)所示的自适应变异算子。

$$\lambda = e^{1 - \frac{M}{M+1-g}}, F = F_0 \times 2^\lambda, \quad (4)$$

式中, F_0 表示初始变异算子, M 为最大进化代数, g 为当前进化代数。在算法启动时,自适应变异算子为 $2F_0$,此时变异算子数值较大,会保持个体多样性,可避免早熟现象;随着迭代次数的增加,变异算子会逐渐降低,到迭代后期变异算子会接近 F_0 ,从而既避免了最优解遭到破坏又增加了搜索全局最优解的概率。

图3为基于 ADE 算法的 RFA 参数优化流程图。利用该算法对 RFA 泵浦参数进行优化时,将 RFA 增益与增益平坦度的比值作为适应度函数,在寻优过程中根据适应度函数值不断更新个体所携带的信息。当满足最大迭代次数时会输出搜索到的最佳泵浦光参数、平均增益及增益平坦度。

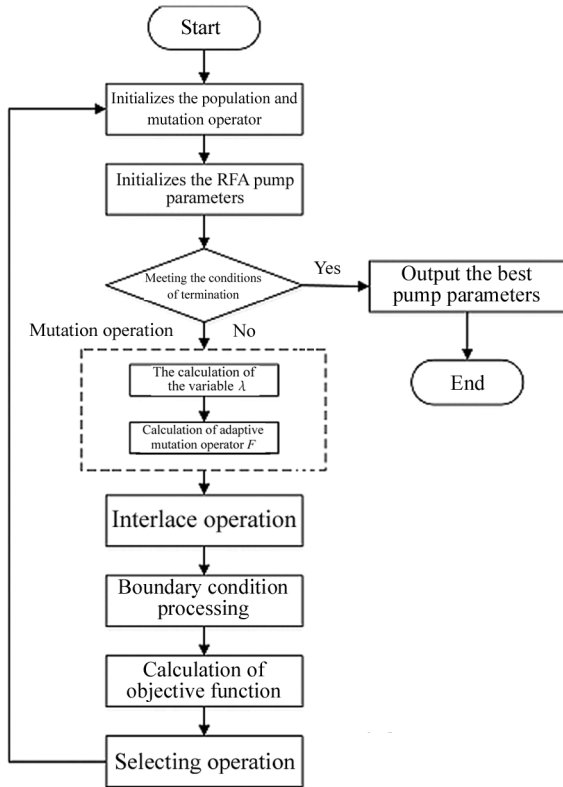


图3 自适应差分进化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of adaptive differential evolution algorithm

3 参数选择与优化结果分析

3.1 参数选择

利用 ADE 算法对 RFA 参数优化前,要对基本参数进行设定,如表1所示。本文采用6路前向泵浦

表1 ADE 算法基本参数

Tab. 1 ADE algorithm basic parameters

Parameter name	Values
D	12
N	80
M	300
F_0	0.3
C	0.5
Fiber length/m	20
Wavelength range of signal light/nm	1530—1630
Signal power/mW	0.01
Wavelength range of pump light/nm	1360—1500
Maximum pump power/W	5
Minimum pump power/W	1

光,每路泵浦光具有2个参数:波长和频率,故每个个体维度 D 为12。 N 表示种群规模, C 表示交叉算子,其取值范围为 $[0,1]$ 之间。

3.2 ADE 算法优化结果分析

3.2.1 ADE 算法优化前后结果对比

本文利用四阶龙格-库塔法求解拉曼耦合波微分方程,结合 ADE 算法得到3组优化数据,分别对应表2中的A、B和C。

表2 ADE 算法优化结果

Tab. 2 ADE algorithm optimization results

Parameters	Values		
	A	B	C
λ_{p1}/nm	1368.5857	1372.7954	1367.5825
λ_{p2}/nm	1375.2422	1380.3918	1371.1083
λ_{p3}/nm	1389.3224	1390.4461	1377.3023
λ_{p4}/nm	1468.4115	1467.9869	1389.4151
λ_{p5}/nm	1479.1667	1480.1307	1470.6784
λ_{p6}/nm	1499.7061	1498.1603	1497.5500
P_1/W	2.3082	4.9391	1.4483
P_2/W	4.9401	4.9983	2.5130
P_3/W	4.8311	3.7999	2.4141
P_4/W	3.0246	3.5850	4.5340
P_5/W	1.5740	1.1259	4.0907
P_6/W	1.2808	1.3124	1.6827
Gain/dB	25.2655	28.2710	23.6079
Δ/dB	0.5558	0.6508	0.8968

从表2的3组优化结果可以看出,A组的增益平坦度是3组中最优的,增益值居中;B组的增益值是3组中最高的,平坦度低于A组;C组的增益是3组数据中最低的,同时增益平坦度也是最大的。在平坦度相差0.095 dB的情况下,B组的增益比A组增益高出3 dB左右,因此,选定B组的参数配置时,RFA的性能最佳。

图4(a)和(b)分别表示优化前和优化后RFA的输出增益。通过对比优化前后的RFA输出增益曲线,可以看出优化前的增益曲线波动很大,且在 $[1550\text{ nm}, 1600\text{ nm}]$ 范围内的增益明显高于其他部分。出现该现象的主要原因是由于未使用优化算法之前,6个泵浦的参数配置是不合理的;算法优化之后,能高效找到6个泵浦的最佳参数,由图4(b)也能看出优化之后的RFA输出增益平坦且波动小。由此可见,ADE算法对RFA参数的优化具有较强适用性。

图5为各路信号光功率随着光纤长度的变化趋势。从图中可看出,在基于表2中B组的参数配置

下,经过 20 m 的光纤长度传输后,100 路信号光的功率从最初的 0.01 mW 提高到了 1.5—1.8 mW,是原始功率的 150—180 倍。因此,该 RFA 可有效提高信号光的输出功率,同时提升输出端的增益和增益平坦度的性能。此实验进一步验证了该 ADE 算法可有效解决 RFA 参数配置的难题。

图 6 为 6 路泵浦光功率随着光纤长度的变化趋势。当泵浦光开始传输时,第 1、第 2 和第 3 路泵浦光的功率呈现出快速衰减的趋势,在 8.5 m 附近,3 路泵浦光功率几乎衰减为 0。产生上述现象的主要原因是,在多泵浦 RFA 中,短波长的泵浦光不仅要承担放大各路信号光的作用,而且泵浦光之间也会发生 SRS,存在功率转移现象。因此,在配置泵浦功率时,应当适当提高短波长泵浦光的功率。而其余 3 路泵浦光功率呈现先增大后减小的趋势,并在不同位置取得功率最大值。由于短波长与长波长的泵浦光在光纤中相遇时也会产生 SRS,此时,短波长的泵浦

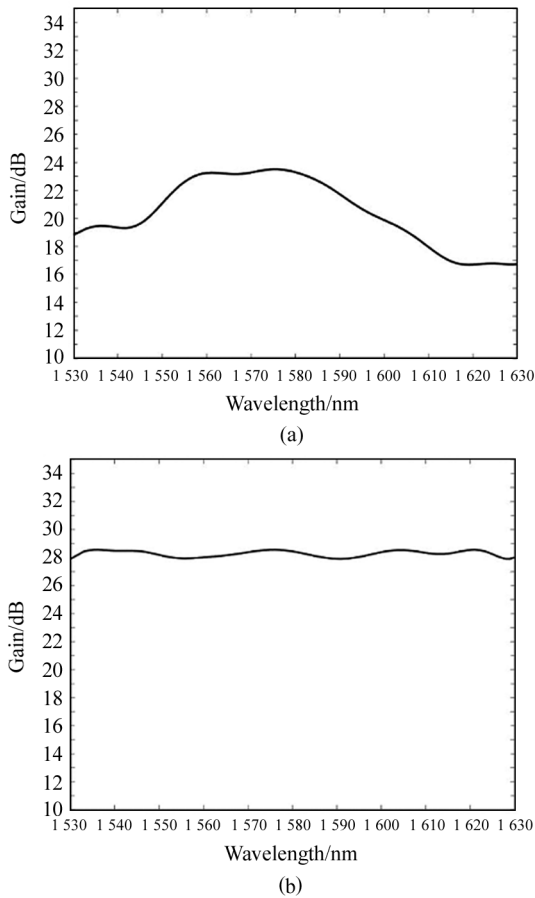


图 4 ADE 算法优化前后 RFA 的输出增益:
(a) 优化前; (b) 优化后

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

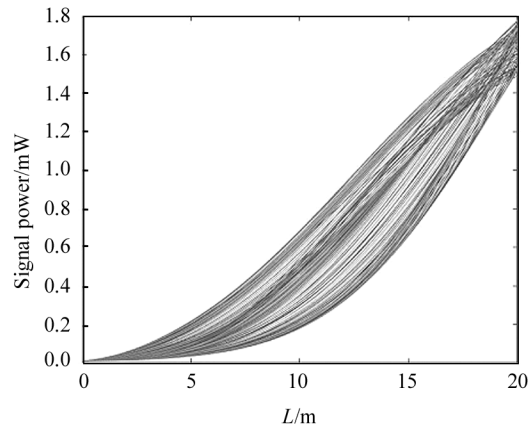


图 5 各路信号光功率随光纤长度的变化
Fig. 5 Variation of the optical power of each signal with the length of the fiber

光将自身一部分能量传递给长波长的泵浦光,导致前 3 路泵浦光的衰减量小于增加量。因此,长波长的泵浦光功率出现先增大现象,当增加到一定程度时,即达到功率峰值处,泵浦的增加量小于放大信号光产生的衰减率,功率就会呈现衰减趋势。

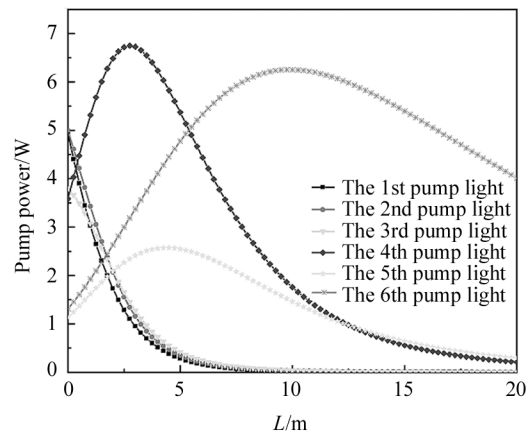


图 6 泵浦光功率随光纤长度的变化
Fig. 6 The variation of pump optical power with fiber length

3.2.2 与 GA 的对比

GA 是模拟生物进化机制的寻优搜索算法。它把解空间中每一个可能的解编码为一个向量,称为一个染色体。算法开始时先随机地产生一些染色体,计算其适应度值,根据适应度对各染色体进行选择复制、交叉、变异等遗传操作^[13,16]。与 ADE 算法不同,GA 算法参数过多,不同的参数设置对寻优结果影响较大,在使用时需不断调整,加大了该算法的使用难度。其次在处理高维问题时,GA 算法收敛速

度慢,甚至很难收敛^[17]。

为了进一步验证 ADE 算法在 RFA 参数设计上具有良好的性能,本文引入 GA 进行对比实验,并将 RFA 增益以及增益平坦度作为衡量算法寻优能力的指标。在保证种群规模、最大迭代次数及参数寻优范围一致的情况下,利用上述两种算法分别进行 3 次实验,得到如表 3 所示的 A、B、C 3 组仿真结果。不难看出,随着增益的不断增加,GA 增益平坦度的恶化程度更高,当增益为 27.3687 dB 时,增益平坦度已超过 1.5 dB。同时对比 B 和 C 两组实验,可知:当增益值相差较大时,ADE 的增益平坦度波动程度要远小于 GA。因此,利用 ADE 算法对泵浦参数进行优化的稳定性要强于 GA 算法。

表 3 两种算法在增益及增益平坦度上的 3 组对比结果

Tab.3 Three groups of comparison results on gain and gain flatness of the two algorithms

Type	ADE		GA	
	Gain/dB	Δ /dB	Gain/dB	Δ /dB
A	19.1096	0.5124	18.5617	0.7372
B	21.6907	0.6282	20.8096	0.8993
C	28.2710	0.6508	27.3687	1.5646

为了更加直观地体现二者的差异,将波长作为横坐标,增益值为纵坐标绘制增益曲线图,结果如图 7 所示。对比两个算法的曲线可知:当二者增益值相差不大时,ADE 算法的 3 条增益曲线的波动范围要远小于 GA 算法,即前者的增益平坦度更优,从而验证了 ADE 具有更强的寻优能力且适应性更高。

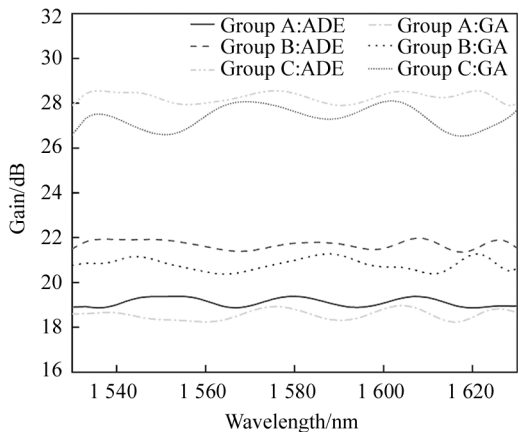


图 7 两种算法的增益曲线对比

Fig.7 Comparison of the gain curves of the two algorithms

3.3 影响因素分析

本文采用的多泵浦 RFA 模型可以在实现超宽

带传输的同时也能实现增益平坦。下文从光纤长度以及泵浦功率两方面分别论述对 RFA 增益和增益平坦度的影响。

3.3.1 光纤长度对拉曼放大器的影响

为了研究光纤长度对增益和增益平坦度的影响,将光纤长度的变化范围设置为[0 m,40 m],在保证 RFA 其他参数不变的情况下,得到图 8 中的平均增益和增益平坦度随光纤长度的变化曲线。当光纤长度较小时,随着光纤长度的增加,泵浦光与信号光之间的相互作用更充分,使得各路信号光的增益不断增加;当平均增益达到峰值后,随着光纤长度的增加,信号光要克服光纤中的传输损耗,增益就会呈现出逐渐下降的趋势。因此,图中平均增益呈现出先逐步上升,到达峰值之后再平稳下降的趋势。进一步分析还可得到:光纤长度在[0 m,5 m]范围内,增益平坦度呈线性增加;在[5 m,20 m]范围内,增益平坦度逐渐减小,并且在 20 m 处取得最小值;之后,随着光纤长度的增加,增益平坦度逐渐恶化。因此,光纤长度为 20 m 可以保证平均增益和增益平坦度两个指标都达到最优值。本文 RFA 设计中将光纤长度设置为 20 m。

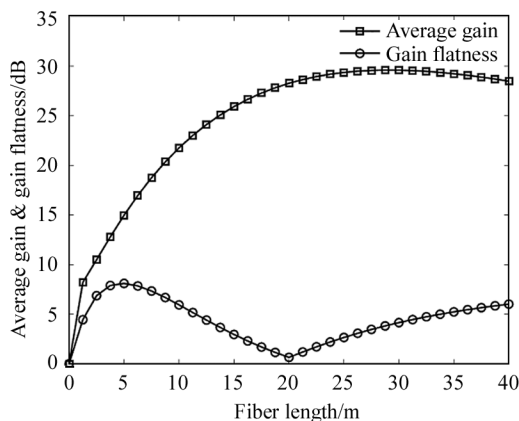


图 8 平均增益和增益平坦度随光纤长度的变化

Fig.8 Variation of average gain and gain flatness with fiber length

3.3.2 泵浦功率对拉曼放大器的影响

在研究泵浦功率对 RFA 产生的影响时,将 6 路泵浦光的功率设置相等,并保持 RFA 其他参数不变,得到的仿真结果如图 9 所示。6 路泵浦光功率的变化范围为 0—5 W,由于光纤的拉曼增益谱和泵浦光功率的双重影响,随着功率的增加,RFA 的平均增益呈现出先升高后减小的趋势。泵浦光功率增大,RFA 的增益就会增大。但因为饱和增益的存在,相

等设置的6路泵浦光功率与输出增益不会呈现出正相关,而是平均增益存在一个峰值。一旦平均增益到达峰值后,随着功率的增加,平均增益就会呈现出下降趋势,同时增益平坦度也呈现恶化态势。由此可知:泵浦功率比较小时,泵浦光的能量主要用于放大信号光,微弱的信号光能得到充分放大;而当功率逐渐增大时,泵浦间的能量转移变强,具有相同能量大小的泵浦会存在短波长能量向长波长能量转移的现象,此时用于放大信号光的泵浦能量会与前者有较大变化。因此,需要利用优化算法对各路泵浦光参数进行优化配置以使得RFA性能最优。

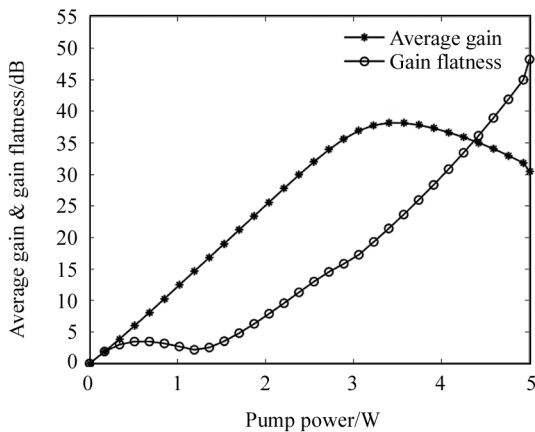


图9 增益和增益平坦度随泵浦光功率的变化

Fig. 9 Variation of gain and gain flatness with pump power

从上述分析可知信号光获得的增益大小不仅与泵浦光功率有关,还与光纤长度有关。因此,在设计RFA模型时,要同时考虑泵浦光参数的配置和光纤长度两者对系统性能的影响,从而达到系统性能最优且光纤材料用料最少的目标。

4 结论

本文选用的传输介质是高非线性TBZN磷酸盐光纤,首先基于四阶龙格-库塔法求解耦合波微分方程,再利用ADE算法对6路泵浦光参数进行优化,得到了最优的泵浦光参数。本文设计了一款覆盖C+L波段的高增益、低平坦度的RFA,其平均增益为28.27 dB,增益平坦度为0.65 dB。同时,本文深入分析了光纤长度和泵浦光功率对增益、平坦度的影响,验证了本文研究的RFA是有效可行的,为利用多泵浦RFA实现超宽带传输提供了新思路。本文所设计的RFA可以弥补RFA和EDFA混合使用及采取增益互补级联方式产生成本过高的缺陷,实现方式较为简单且成本较低。

参考文献:

- [1] LI L. An analysis of the sixth generation mobile communication technology[J]. Shanxi Electronic Technology, 2022(1): 57-59.
李蕾. 第六代移动通信技术探析[J]. 山西电子技术, 2022(1): 57-59.
- [2] XU Y S, XU R J. Technical application and development prospect of 6G mobile communication[J]. Information Recording Materials, 2021, 22(12): 35-36.
徐乙坤, 徐瑞俊. 6G移动通信的技术应用及发展前景[J]. 信息记录材料, 2021, 22(12): 35-36.
- [3] ZHANG Y G, ZHANG W F, ZHANG S H. Overview of the development of 1-6G mobile communication systems[J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2020, 32(17): 157-160.
张勇敢, 章伟飞, 张森洪. 1-6G移动通信系统发展综述[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(17): 157-160.
- [4] FANG Y J, ZHAO R Y. Development status of raman fiber amplifiers[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2018(19): 76-77.
方音佳, 赵蕊月. 拉曼光纤放大器的发展现状[J]. 科技创新与应用, 2018(19): 76-77.
- [5] YAN F F, WANG K R, YU C X, et al. Broadband gain-flattened multiwavelength pumped Raman fiber amplifier[J]. Optical Precision Engineering, 2006, 14(2): 155-158.
颜纷纷, 王葵如, 余重秀, 等. 增益平坦的多波长泵浦宽带拉曼光纤放大器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 155-158.
- [6] CASTELLANI C E S, CANI S PN, SEGATTI M E V, et al. Design methodology for multi-pumped discrete Raman amplifiers: case-study employing photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14121-14131.
- [7] GONG J M, ZHAO Y, LENG B. Gain-flattened raman fiber amplifier based on highly nonlinear fiber[J]. Applied Optics, 2014, 35(2): 353-358.
巩稼民, 赵云, 冷斌. 基于高非线性光纤的增益谱平坦拉曼光纤放大器研究[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 353-358.
- [8] LI M J. Study on the flattening of the gain spectrum of the multi-wavelength hybrid optical amplifier[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
李明杰. 多波长混合光放大器增益谱平坦化的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [9] GONG J M, LI S P, XING R P, et al. Cascade photonic crystal fiber Raman amplifier based on Gaussian fitting

- [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(11): 1411-1415.
 巩稼民, 李思平, 邢仁平, 等. 基于高斯拟合的级联光子晶体光纤拉曼放大器[J]. *激光与红外*, 2018, 48(11): 1411-1415.
- [10] PERLIN V E, WINFULH G. Optimal design of flat-gain wide-band fiber Raman amplifiers[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2002, 20(2): 250-254.
- [11] GONG J M, LU J J, GAO R J, et al. Design of back-pumping Raman fiber amplifier based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2022, 33(4): 436-442.
 巩稼民, 卢姣姣, 高睿杰, 等. 基于改进粒子群算法的后向泵浦 RFA 设计[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(4): 436-442.
- [12] WANG Z Y. Research on raman fiber amplifier and multi-wavelength raman fiber laser[D]. Nanjing: South East University, 2005.
 王著元. 拉曼光纤放大器及多波长拉曼光纤激光器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [13] BAO Z Y, YU J Z. Intelligent optimization algorithm and its MATLAB example[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 37-45.
 包子杨, 余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2018: 37-54.
- [14] GONG J M, ZHU Z H, LEI S T, et al. Multi-pumped Te-based Raman fiber amplifier based on differential evolution algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(6): 559-566. .
 巩稼民, 朱泽昊, 雷舒陶, 等. 利用差分进化算法优化设计的多泵浦 Te 基光纤拉曼放大器[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(6): 559-566.
- [15] LIAO X Y, LI J, LUO Y K, et al. Differential evolution algorithm based on adaptive mutation operator[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(6): 128-134.
 廖雄鹰, 李俊, 罗阳坤, 等. 基于自适应变异算子的差分进化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(6): 128-134.
- [16] FAN S. Theoretical research and application of genetic algorithm[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2017(23): 21-22.
 范爽. 遗传算法理论研究及其应用[J]. *科技与创新*, 2017(23): 21-22.
- [17] BAI X M, HAN J X. Research on convergence of differential genetic algorithm[J]. *Journal of Software Guide*, 2016, 15(10): 26-29.
 白晓明, 韩家新. 差分遗传算法收敛性研究[J]. *软件导刊*, 2016, 15(10): 26-29.

作者简介:

蒋杰伟 (1982—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光通信、机器学习等方面的研究。