

DOI:10.16136/j.joel.2023.07.0721

基于正余弦扰动的海洋捕食者算法优化 RFA 设计

蒋杰伟^{1*}, 金 库², 刘尚辉², 张 依¹, 刘海洋¹, 魏戌盟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)

摘要:为适应下一代 6G 通信网络对光通信网络提出的高速率、宽带宽和大容量的需求,对拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)泵浦参数的优化设计成为了当前光通信系统研究的重点。本文以掺铒碲基光纤为传输介质,提出了一种改进的海洋捕食者算法(modified marine predator algorithm, MMPA),利用该算法优化设计了多泵浦 RFA,有效实现了对 C+L 波段内各信道的平坦光放大。与现有 RFA 优化算法进行对比,MMPA 具有性能优异和鲁棒性强等特点,能有效解决拉曼耦合波方程中的非线性和组合优化等问题,确保 RFA 的高增益和低增益平坦度。仿真结果表明,在 1530—1630 nm 的增益谱宽范围内,放大器的平均增益为 42.36 dB,增益平坦度为 0.67 dB。

关键词:拉曼光纤放大器(RFA);掺铒碲基光纤;改进的海洋捕食者算法(MMPA);增益平坦;正余弦扰动

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)07-0673-09

Optimized Raman fiber amplifier design using marine predator algorithm with sine-cosine perturbation

JIANG Jiewei^{1*}, JIN Ku², LIU Shanghui², ZHANG Yi¹, LIU Haiyang², WEI Xumeng²

(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: To meet the high speed, wide bandwidth, and large capacity requirements proposed by the next-generation 6G communication networks for optical communication networks, the optimal design of pumping parameters for Raman fiber amplifier (RFA) has become the focus of current research in optical communication systems. In this paper, using erbium-doped tellurium-based fiber as the transmission medium, a modified marine predator algorithm (MMPA) is proposed to optimize the design of the multi-pump RFA, which effectively achieves the flat optical amplification for each channel in the C+L band. Compared with the existing optimization algorithms for RFA, the MMPA has the characteristics of excellent performance and strong robustness, which can effectively solve the problems of nonlinearity and combinatorial optimization in the Raman coupled wave equation and ensure the high gain and low gain flatness of the RFA. The simulation results show that the average gain of the amplifier is 42.36 dB and the gain flatness is 0.67 dB in the gain spectral width range of 1530—1630 nm.

Key words: Raman fiber amplifier (RFA); erbium-doped tellurium-based fiber; modified marine predator algorithm (MMPA); gain flattening; sine-cosine perturbation

* E-mail:jin_ku@stu.xupt.edu

收稿日期:2022-10-19 修订日期:2023-02-06

基金项目:国家自然科学基金(61775180,62276210)、陕西省自然科学基金(2022JM-380)和陕西省西安市大学研究生创新基金项目(CXJJDL2022009)资助项目

0 引言

随着移动通信系统的发展,6G技术已成为各国通信发展的竞争焦点^[1],其主要目标是实现高增益、高能效、低延迟和大规模连接^[2],这为光通信系统提出了更高的挑战。拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)因其噪声系数小、响应速度快、非线性失真小等优点^[3,4],已成为光通信系统中实现超宽带和高速率传输的关键设备^[5]。为了获得RFA最优的性能,需要对RFA多泵浦参数进行快速和有效的配置^[6],因此本文提出了一种改进的海洋捕食者算法(modified marine predator algorithm, MMPA)^[7],通过该算法对RFA模型进行参数优化配置,以实现较高的输出增益和较低的增益平坦度。

近年来,国内外学者在RFA模型优化上进行了广泛的研究和探索。SINGH等^[8]于2015年提出了一种混合光放大器(hybrid optical amplifier, HOA)净增益分析模型,利用遗传算法优化了模型的参数,其在频率187—189.5 THz区间上的平坦增益大于18 dB、增益变化小于1.35 dB,表明该方法大大提升了放大器的性能。巩稼民等^[9]于2018年对碲基光纤的拉曼增益谱进行八阶高斯拟合,结合多泵浦技术设计的T-RFA其平均增益为25.518 dB、增益平坦度仅为1.34 dB,验证了碲基光纤具备较高的增益性能。VERMA等^[10]于2021年利用鲸鱼自然优化算法得到了增益为27.13 dB的RFA。巩稼民等^[11]于2022年提出了一种改进的粒子群算法优化后向RFA的设计方案,其平均增益达到了15.93 dB、增益波动为0.36 dB,此方法设计的RFA系统获得了较好的增益平坦度,但输出增益稍差。上述研究设计的RFA在增益带宽、平均输出增益及增益平坦度3个评估指标上还无法同时达到最优,其性能有待进一步提高。另外,在对RFA设计的过程中,当前存在的研究尚缺少对优化策略的性能对比。

基于此,本文提出了一种基于MMPA的RFA泵浦参数优化方法,并与存在的优化策略进行了性能比较。对比分析了不同泵浦数量、不同优化算法优化泵浦参数对输出信号光开关增益的性能影响,并仿真分析了泵浦光功率和信号光功率沿光纤长度的变化趋势及噪声性能。所设计的RFA在1530—1630 nm的超大增益带宽范围内获得了0.67 dB的低增益平坦度,42.36 dB的高输出增益。

1 理论模型与结构设计

1.1 RFA理论模型

在RFA增益平坦优化设计中,考虑泵浦光之间、信号光之间及信号光与泵浦光之间产生的受激拉曼散射效应、传输损耗及噪声,建立如下的简易拉曼耦合波方程:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_j}{dz} = & \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_i - \sum_{v_k < v_j} \frac{v_j}{v_k} \cdot \\ & \frac{g_R(v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j + n\gamma_j P_j + \\ & 2hv_i \cdot \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j \cdot \left[1 + \right. \\ & \left. \frac{1}{e^{h(v_i - v_j)/KT} - 1} \right] \cdot \Delta v, (j = 1, 2, \dots, N), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, P_i 、 P_j 和 P_k 分别表示第*i*、*j*和*k*路信道中传输的信号光功率的大小, v_i 、 v_j 和 v_k 分别表示第*i*、*j*和*k*路信道中传输的信号光频率的大小, $g_R(v_i - v_j)$ 和 $g_R(v_j - v_k)$ 表示为第*i*和*j*路信道之间、第*j*和*k*路信道之间的受激拉曼增益系数, α_j 表示第*j*路信道中信号光波在光纤中的衰减损耗系数, K_{eff} 为偏振因子,常取 $K_{\text{eff}} = 1$ 或 $K_{\text{eff}} = 2$, A_{eff} 为光纤有效净截面积, K 和 h 分别表示波尔兹曼常量和普朗克常量, T 为光纤的绝对温度, \pm 表示RFA泵浦光采用前向或后向泵浦,当传输中信号光与注入的泵浦光之间频率差为 Δv 时,此时拉曼增益系数的计算方法如式(2)所示:

$$g_{v_j}(\Delta v) = g_R(\Delta v) \cdot v_j/v_0. \quad (2)$$

本文设计的RFA采用前向泵浦结构,并利用四阶龙格-库塔法对简化之后的非线性拉曼耦合波微分方程进行迭代求解。由于在解决初值问题方面,四阶龙格-库塔具有极好的收敛性与稳定性,在求解过程中,使用改进的多目标海洋捕食者算法(marine predators algorithm, MPA)进行优化,为了能够设计出高输出增益且增益平坦的RFA,将目标函数设置为求解RFA输出增益平坦度,如式(3)所示:

$$fit = \frac{G_{\text{on-off}}}{\max(G_{\text{on-off}}) - \min(G_{\text{on-off}})}, \quad (3)$$

$$G = 10 \lg \frac{P_j(L)}{P_j(0)}, \quad (4)$$

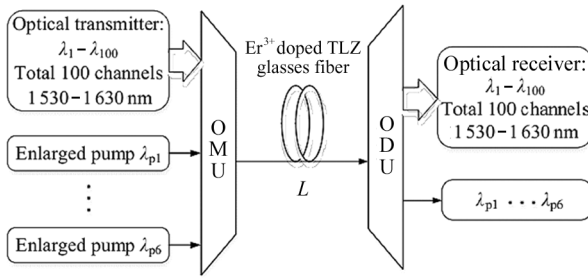
$$\Delta G = \max(G_{\text{on-off}}) - \min(G_{\text{on-off}}), \quad (5)$$

式中, $\max(G_{\text{on-off}})$ 和 $\min(G_{\text{on-off}})$ 分别表示RFA开关增益的最大值和最小值,两者之差 ΔG 为增益平坦度。式(4)中, $P_j(0)$ 为第*j*路信道中信号光的初始输入功率大小, $P_j(L)$ 为第*j*路信道中信号光沿光纤

传输 L km 后的光功率大小。

1.2 RFA 结构设计

本文所设计的超宽带和大增益 RFA 的结构如图 1 所示,其中, $\lambda_1 - \lambda_{100}$ 代表在 C + L 全波段 1530—1630 nm 带宽内共计 100 个信道中传输的信号光; $\lambda_{p1} - \lambda_{p6}$ 为注入的 6 路泵浦光。首先借助光复用器将注入的信号光与泵浦光耦合进入长度 L 的掺铒碲基光纤的同一初始端口;在传输过程中,受激拉曼散射效应使得信号光与泵浦光之间发生能量转移,实现了泵浦光对信号光的供给式放大;最后通过波分解复用器滤除注入的 6 路泵浦光,即得到放大后的信号光。



OMU: optical multiplex unit;
ODU: optical demultiplex unit

图 1 超宽带大增益拉曼光纤放大器的结构
Fig. 1 Structure of Raman fiber amplifier with ultra-wideband and large gain

2 改进的海洋捕食者算法的 RFA 设计及性能对比

2.1 改进的海洋捕食者算法的原理

MPA 是 FARAMARZI 等^[12]于 2020 年提出的元启发式算法,主要模拟了海洋生物之间捕食生存的过程,具体流程如下:

2.1.1 MAP 初始化

首先,MPA 根据种群数量 N 和求解个体维度 D 来构建初始化猎物矩阵 X_{ij} ,选取最佳猎物个体为顶级捕食者,模拟初始化海洋环境的数学模型如式(6)所示:

$$X_{ij} = X_{\min} + \text{rand}(X_{\max} - X_{\min}),$$

$$(i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, D), \quad (6)$$

式中, X_{ij} 表示第 i 个种群第 j 维度的位置, X_{\max} 与 X_{\min} 分别代表目标函数求解空间的上、下界。

2.1.2 MPA 寻优阶段

MPA 优化 RFA 参数是根据不同速度比以及捕

食者和猎物的生命周期划分为 3 个阶段,即高速度、等速度和低速度阶段。在迭代次数小于最大迭代次数的 $1/3$ 时,进入高速度比阶段,顶级捕食者 *Elite* 由于速度远小于猎物 *Prey* 而被迫放弃捕食,猎物选择布朗运动,而捕食者不移动,此阶段的数学模型如式(7)所示:

$$\text{While } \text{Iter} < \frac{1}{3} \text{Max_Iter},$$

$$\text{stepsize}_i = \mathbf{R}_B \otimes (\text{Elite}_i - \mathbf{R}_B \otimes \text{Prey}_i),$$

$$(i = 1 - n),$$

$$\text{Prey}_i = \text{Prey}_i + P \times \mathbf{R} \otimes \text{stepsize}_i, \quad (7)$$

式中, \mathbf{R}_B 表示采用布朗策略随机游走产生的随机数组成的向量; Elite_i 表示迭代次数为 i 时精英种群的位置向量; Prey_i 表示迭代次数为 i 时猎物种群的位置向量; stepsize 表示此阶段的移动步长; P 为常数项,一般设置为 0.5; \mathbf{R} 为 0—1 之间均匀分布的随机向量; Prey_i 与 Elite_i 分别表示本次迭代下第 i 只猎物以及顶级捕食者。

当算法迭代次数处于最大迭代次数 $1/3$ 和 $2/3$ 之间时,MPA 进入等速度比阶段,此时猎物与顶级捕食者的运动速度比较接近,故种群分为两部分:猎物做莱维运动,负责算法在搜索空间内的开发;捕食者做布朗运动,负责算法在搜索空间内的搜索。该两部分的数学模型如式(8)、(9)所示。

$$\frac{1}{3} \text{Max_Iter} < \text{While Iter} < \frac{2}{3} \text{Max_Iter},$$

$$\text{stepsize}_i = \mathbf{R}_L \otimes (\text{Elite}_i - \mathbf{R}_L \otimes \text{Prey}_i),$$

$$(i = 1, \dots, n/2)$$

$$\text{Prey}_i = \text{Prey}_i + P \times \mathbf{R} \otimes \text{stepsize}_i, \quad (8)$$

$$\text{stepsize}_i = \mathbf{R}_B \otimes (\text{Elite}_i - \mathbf{R}_B \otimes \text{Prey}_i),$$

$$(i = n/2, \dots, n)$$

$$\text{Prey}_i = \text{Elite}_i + P \cdot \text{CF} \otimes \text{stepsize}_i. \quad (9)$$

式(8)是模拟前一半种群的运动轨迹,式中 \vec{R}_L 表示莱维运动随机向量。式(9)是模拟后一半种群的运动轨迹,其中 CF 为捕食者移动步长的自适应参数。当算法迭代次数大于最大迭代次数的 $2/3$ 时,进入低速度比阶段后,此时猎物速度远小于顶级捕食者,捕食者的最佳策略为莱维运动,而猎物的运动将会参考顶级捕食者的运动路线以避免被捕食,此阶段的数学模型如式(10)所示:

$$\text{While } \text{Iter} > \frac{2}{3} \text{Max_Iter},$$

$$\text{stepsize}_i = \mathbf{R}_L \otimes (\mathbf{R}_L \otimes \text{Elite}_i - \text{Prey}_i),$$

$$(i = 1, \dots, n),$$

$$\text{Prey}_i = \text{Elite}_i + P \cdot \text{CF} \otimes \text{stepsize}_i, \quad (10)$$

2.1.3 MPA 位置更新

在捕食过程中,考虑海洋中可能形成涡流及鱼群聚集效应对海洋捕食者的影响,致使算法陷入局部最优,即 $FADs$ 为最优解,因此采用较长的跳跃来避免局部最优停滞,数学模型如式(11)所示:

$$Prey_i = \begin{cases} if\ r \leq FADs, \\ Prey_i + CF [X_{min} + R \otimes (X_{max} - X_{min})] \otimes U \\ if\ r > FADs, \\ Prey_i + [FADs(1-r) + r](Prey_{r1} - Prey_{r2}) \end{cases}, \quad (11)$$

式中, U 为随机生成的二进制向量数组, r 为处于 0—1 范围内的随机数。

2.2 改进的海洋捕食者算法的 RFA 设计

由于 MPA 存在着以下不足:无法产生高生产力的多样化初始种群、缺乏快速避免局部最优机制^[13], 因此,本文提出在算法等速度比阶段加入并行架构

的正余弦扰动以促进莱维飞行群体与布朗运动群体相互渗透,进一步实现算法探索与开发,其优化流程如图 2 所示。在式(9)中引入随机波动概率 p_n 和波动算子 n 以同时扰动并行架构而产生灵活性更高的波动猎物 P'_F ,筛选出适应度最优者充当波动捕食者 E'_F ,具体如下式:

$$n = \begin{cases} r_1 \sin r_2, p_n < 0.5 \\ r_1 \cos r_2, p_n > 0.5 \end{cases}, p_n \in [0,1], \quad (12)$$

$$r_1 = \frac{a(t_{max} - t)}{t_{max}}, a = 2, \quad (13)$$

$$P'_F = P'_E + n |r_3 E'_E - P'_E|, \quad (14)$$

式中, r_1 为线性递减调整系数, r_2 是随机调整角度,范围为 0 ~ 2π ,以适应波动概率 p_n 以等概率进行波动机制选取,增强搜索能力。式(14)中, r_3 是 0—2 范围内的随机数。波动算子 n 以 r_1 和 r_2 对波动方向和波动补偿两部分进行控制,增大搜索范围和搜索能力。

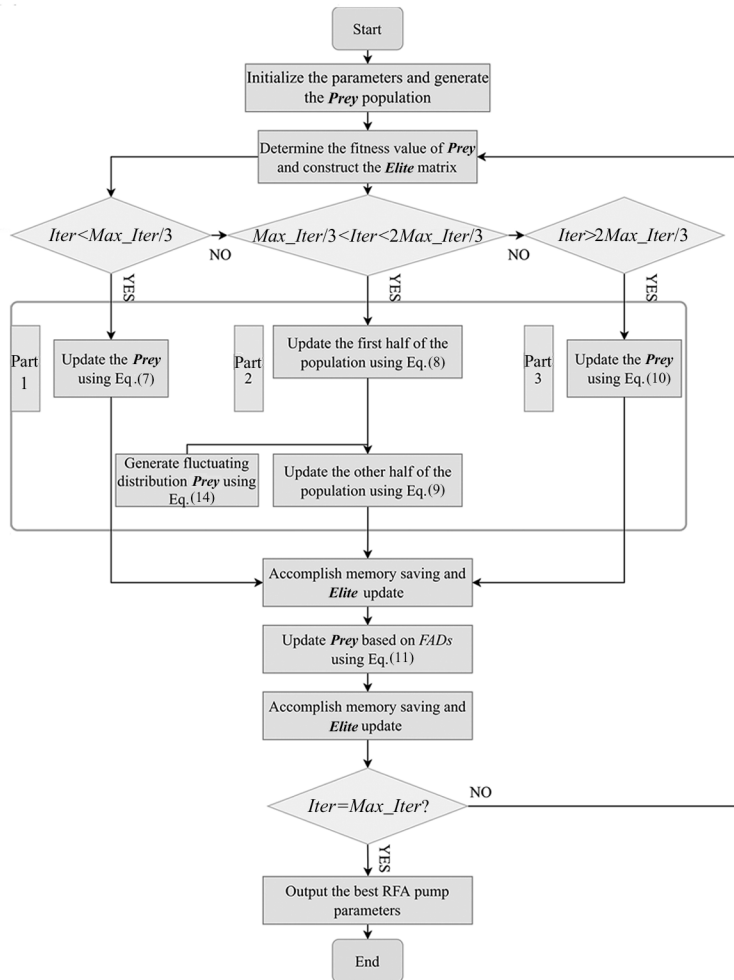


图 2 改进的海洋捕食者算法的 RFA 设计流程图

Fig. 2 Flowchart of RFA design for modified marine predator algorithm

2.3 不同算法在 RFA 设计上的性能对比

为验证 MMPA 在 RFA 设计上具有较优的性能,选取以下算法进行实验对比:MPA^[14]、麻雀优化算法(sparrow search algorithm,SSA)^[15]、树种优化算法(tree-seed algorithm,TSA)、差分进化算法(differential evolution algorithm,DE)和免疫算法(immune algorithm,IA)。为了比较的公平性,将所有算法的初始种群规模均设置为 50,最大迭代次数为 150,在此基础上,各算法的属性参数设置如表 1 所示。

表 1 算法的属性参数设置

Algorithms	Attribute parameters
MPA	$FAD_s=0.2$
MMPA	$FAD_s=0.2$
SSA	$P=0.2, ST=0.8$
TSA	$ST=0.1$
DE	$F=0.5, CR=0.9$
IA	$Pm=0.8, Alfa=2, Beta=1$

设置算法的属性参数后,将增益求解函数作为待优化求解的目标函数,此时 RFA 模型的参数设置如表 2 所示。

表 2 RFA 的参数设置

Parameter names	Values
Fiber length, L	8
Iterative steps, h	0.1
The wavelength range of pump light/nm	[1 350,1 450]
Wavelength range of signal light/nm	[1 530,1 630]
Signal power/mW	0.005
Loss factor of signal light/(dB · km ⁻¹)	21
Power range of pump light/W	[0.1,1.6]

完成上述参数配置后,利用算法对泵浦参数进行优化,可得到不同优化策略下的信号光输出最大增益 Max G 、平均增益 G 、增益平坦度 ΔG 、平均运行消耗时间 T ,结果如表 3 所示。从表中可知:在约束条件一致的情况下,MMPA 较其他算法的寻优能力和收敛速度更好;对于拉曼放大器增益解函数,相比于 MPA 算法,MMPA 可跳出局部次优解,在最优解捕捉能力上展现出较强的优势。进一步,在算法的时间消耗上,MMPA 较其他算法表现出更低的时间复杂度,优化过程的平均时间消耗仅 97.1512s。此

表 3 不同智能算法的寻优结果

Algorithm	Value			
	Max G /dB	ΔG /dB	G /dB	T /s
MPA	36.027 2	1.061 6	35.547 1	225.742 7
MMPA	41.521 8	0.879 8	40.782 6	97.151 2
GWO	39.137 3	7.786 6	35.503 7	127.177 0
SSA	36.495 3	1.768 8	35.457 6	243.561 1
WOA	37.869 1	4.192 8	35.758 1	102.426 7
TSA	38.971 2	1.273 1	38.382 1	1 148.773 9
DE	38.423 1	0.901 2	37.699 8	268.091 1
IA	36.012 9	0.849 2	35.461 2	168.081 0

对比实验表明本文所提的改进策略是有效的。

为了更直观地分析不同优化策略的性能差异,基于算法迭代过程的目标函数数据,绘制出 MMPA 与其他对比算法的收敛曲线,如图 3 所示。

观察图 3 中不同算法收敛曲线的变化趋势,可以看出 MMPA 仅需 113 次迭代即可搜寻到最佳参数,相较于其他优化策略而言,所需迭代次数更少,其说明本文采取的改进策略有效地提升了求解个体的质量。通过对比还可以看到 MPA 的收敛曲线沿迭代的进程也趋于平缓,展现出 MPA 系算法具有较好的寻优性能。

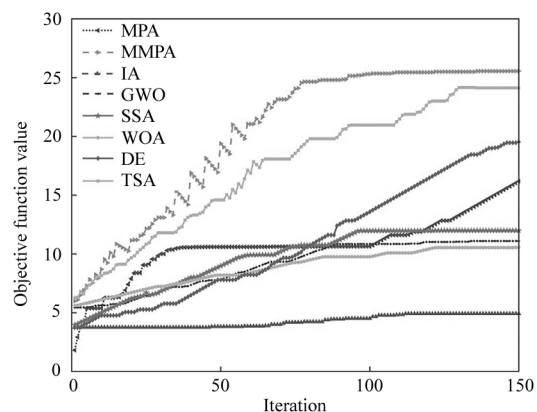


图 3 不同算法的目标函数收敛曲线
Fig. 3 Convergence curves of objective functions with different algorithms

3 RFA 系统的参数选择与优化结果分析

3.1 RFA 参数选择

在使用 MMPA 对 RFA 系统的泵浦参数进行优化前,需对 RFA 系统及算法的基本属性参数进行合理配置,具体如表 4 所示。在 RFA 的设计过程中,由于泵浦数量对 RFA 系统的性能影响较大,首先需要确定最佳的泵浦数量,选取泵浦数量为 3、4、5、6 时,对信号光增益程度进行仿真和对比,绘制不同泵浦数量下的信号光输出增益曲线,如图 4 所示。

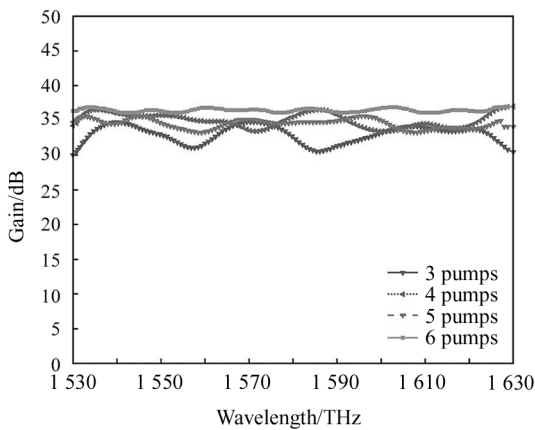


图 4 不同泵浦数量下的信号光输出增益曲线

Fig. 4 Output gain curves of signal light under different pump numbers

从图 4 不难看出:当泵浦数量为 6 时,RFA 系统获得了较高的增益和较低的增益平坦度,因此本文最佳的泵浦数量设置为 6。

表 4 RFA 系统和 MMPA 算法的基本优化参数
Tab. 4 Basic optimization parameters of RFA system and MMPA algorithm

Parameter names	Values
Maximum number of search agents, N	150
Max iteration, I	200
Dimension of each particle, D	12
Perturbation correction factor, P	0.1
Fiber length, L	8
Iterative steps, h	0.1
Wavelength range of pump light/nm	[1 360,1 450]
Wavelength range of signal light/nm	[1 530,1 630]
Signal power/W	0.005
Power range of pump light/W	[0.1,1.6]

3.2 优化结果分析

在四阶龙格-库塔法求解经典拉曼耦合波微分方程后,基于正余弦扰动 MMPA 对设计的 RFA 模型进行参数优化,得到 4 组优化数据如表 5 所示,4 组优化结果分别用 A、B、C 和 D 表示。

优化前的泵浦光波长分别为 1365.230 6 nm、1380.564 0 nm、1407.584 3 nm、1425.572 3 nm、1433.451 3 nm 和 1439.731 4 nm,对应的泵浦光功率为 1.094 8 W、1.152 2 W、0.217 3 W、0.561 6 W、0.100 9 W 和 0.166 7 W,此时平均增益为 35.724 2 dB,增益平坦度为 1.375 8 dB。与表 5 中优化后的 4 组数据进行对比,可以看出 MMPA 优化 RFA 系统可得到较好的泵浦参数,其中 B 和 C 两组均得到 38 dB 左右的平均输出增益,两者的最大泵浦光功率分别为 1.306 9 W 和 1.558 7 W,但性能均逊色于 D 组。实验结果表明,高功率的泵浦光对平均输出增益有一定提升效果,但同时也会加剧传输过程中的泵浦光之间的受激拉曼散射效应,致使各路泵浦光之间的相互作用更强,最终导致不平坦的输出增益,从而可得出 D 组的性能最优,其平均增益可达 42.360 1 dB,增益平坦度仅为 0.679 8 dB。此实验结果验证了基于 MMPA 方法的 RFA 优化设计是合理的。

因泵浦光参数配置的是否合理对信号光放大的优劣是至关重要的,为进一步验证优化策略在 RFA 设计过程中的有效性,通过数值仿真,绘制出引入优化策略前后信号光输出增益曲线如图 5 所示。

对比图 5(a)和(b)优化前后的增益谱图,可看出引入优化策略后,不仅信号光输出增益的值有所增加,增益平坦度的值也得到了进一步的改善,表明 MMPA 对泵浦参数优化配置是有效的。

由于在 RFA 设计过程中,光纤长度也是非常重要的参数,为了进一步研究光纤中所传输的光功率的变化情况,在不改变泵浦参数配置的情况下,对注入的信号光与泵浦光功率随光纤长度的变化进行仿真对比,得到如图 6 和图 7 所示的结果。

在经过长度为 8 m 的掺铒碲基光纤传输之后,在泵浦光的作用下,各路信号光功率先上升后下降,出现先放大后补偿的现象。从图 6 可看出:当光纤长度范围为 0—3 m 时,由于泵浦光与信号光之间充分相互作用,使得泵浦光功率稳态增长;当光纤长度范围为 3—8 m 时,由于泵浦源功率耗尽,长短波长信号光之间开始能量转移,长波长信号光功率随着光纤长度的增加逐渐减小,而短波长信号光功率由

于得到了来自于长波长信号光的增益补偿而稳步上升,因此出现“拐点”;信号光在光纤初始端的功率设置为 0.005 mW,各路信号光在掺铒碲基光纤末端位置处收敛,收敛处的平均输出光功率大小为 19.27 mW,表明光纤末端处的输出功率是光纤初始端光功率的 3800 倍以上,实现了对于信号光的有效放大。

从图 7 中可看出:在光纤长度等于 3 m 处时,注入的 6 路泵浦光功率已几乎耗尽,因此在光纤长度为 3—8 m 范围内,信号光的能量补偿来源于信号光内部,在此过程中,长短波长相互作用,短波长向长波长进行能量的转移,致使其迅速衰减,该过程也符合上述信号光之间的增益补偿原则。

表 5 4 组优化结果对比
Tab. 5 Comparison of optimization results of four groups

Parameter names	Values			
	A	B	C	D
λ_1/nm	1363.6382	1363.6537	1364.1585	1367.0123
λ_2/nm	1363.6816	1382.5063	1364.5233	1382.2057
λ_3/nm	1386.0481	1382.7676	1385.0871	1387.1825
λ_4/nm	1412.8997	1410.7330	1413.3670	1411.5468
λ_5/nm	1430.4891	1431.5354	1432.0917	1432.2769
λ_6/nm	1442.3070	1440.8848	1442.3077	1441.3902
P_1/W	0.5372	0.7245	1.5587	0.2963
P_2/W	1.1997	1.3069	0.2826	1.1967
P_3/W	0.7935	0.1002	0.8974	0.4203
P_4/W	0.4183	0.6099	0.4831	0.6313
P_5/W	0.1474	0.3569	0.1855	0.3923
P_6/W	0.1026	0.1536	0.1002	0.1921
G/dB	37.5514	38.7125	38.5816	42.3601
G_f/dB	0.9131	1.689	0.8152	0.6798

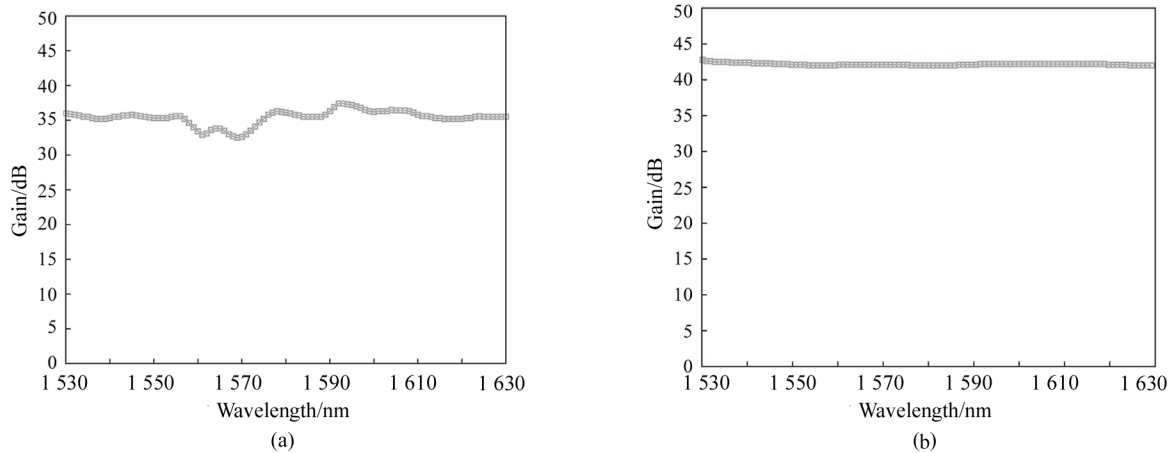


图 5 优化前后的 RFA 输出增益:(a) 优化前;(b) 优化后

Fig. 5 The output gain of RFA before and after optimization:(a) Before optimization;(b) After optimization

由于信号光在传输过程中,不可避免地会产生放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)噪声和双向瑞利散射(double Rayleigh back-scattering, DRBS)噪声,为进一步观察优化策略的引入对 RFA 噪声所产生的影响,绘制相同配置下的优化前后的 ASE 和 DRBS 噪声增益谱,得到图 8 的实

验结果。不难看出:优化前,ASE 和 DRBS 平均噪声增益分别为 1.4969 dB 和 2.6852 dB,平坦度分别为 0.6112 dB 和 0.3215 dB;经 MMPA 优化后,ASE 和 DRBS 的平均噪声增益分别为 0.7789 dB 和 2.1266 dB,平坦度分别为 0.3714 dB 和 0.3192 dB。实验对比表明,基于 MMPA 算法对 RFA 系统参数优化后,

不仅得到了较高的平均输出增益和较低的增益平坦度,并且噪声增益也得到了明显降低,噪声性能取得了较好的提升。

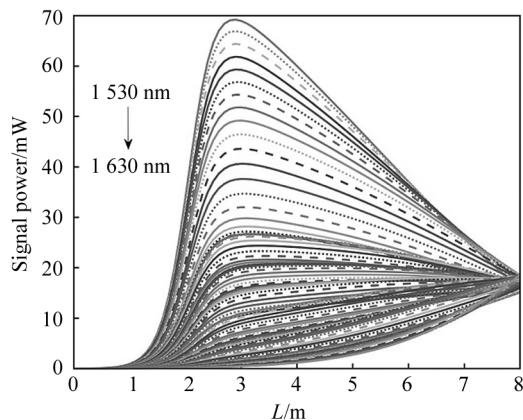


图6 信号光功率随光纤长度的变化曲线
Fig. 6 The change curve of signal light power with the length of the fiber

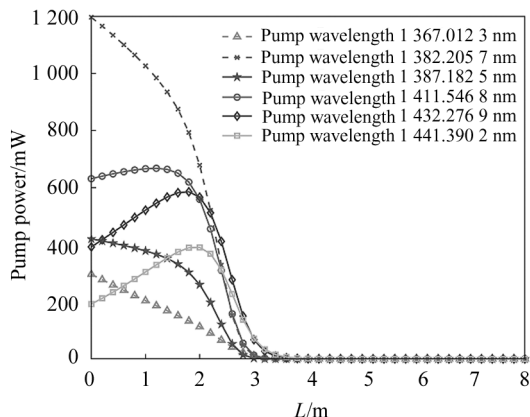
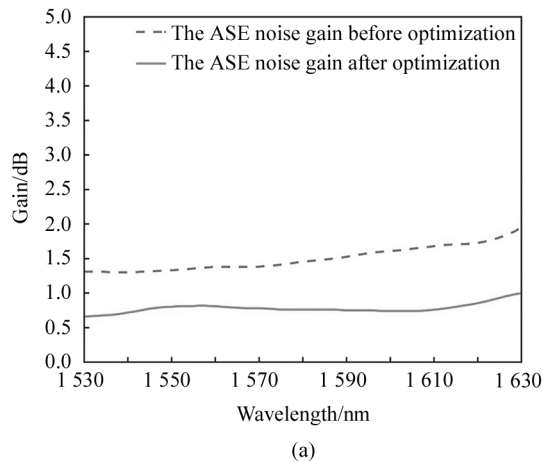


图7 泵浦光功率随光纤长度的变化曲线
Fig. 7 The change curve of pump light power with the length of the fiber



(a)

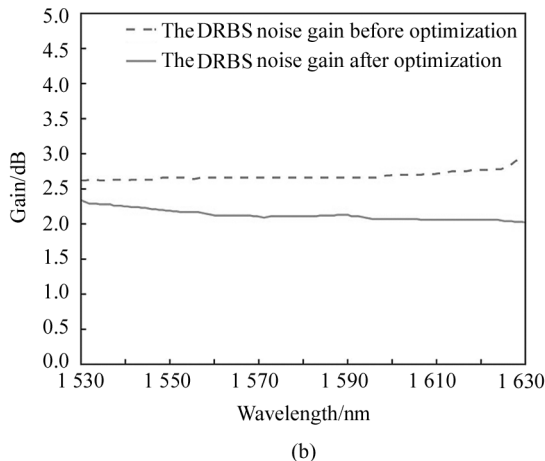


图8 优化前后的 ASE 和 DRBS 噪声增益:
(a) ASE 噪声增益; (b) DRBS 噪声增益

Fig. 8 The noise gains of ASE and DRBS before and after optimization: (a) The noise gain of ASE; (b) The noise gain of DRBS

4 结 论

本文采用高非线性的掺铒碲基光纤作为 RFA 的放大介质,提出了一种基于正余弦扰动策略的 MPA 对泵浦光参数进行优化。设计了一款分立式超带宽大增益 RFA,其平均输出增益和增益平坦度分别为 42.360 1 dB 和 0.679 8 dB,表明 MMPA 对 RFA 模型优化设计的有效性。详细对比了 MMPA 和其他算法的性能差异,探索了光纤长度对 RFA 的泵浦光和信号光功率的影响。此外,本文分析了算法对噪声增益的影响,其中 ASE 和 DRBS 噪声的平均增益分别小于 0.778 9 dB 和 2.126 6 dB,表明设计的 RFA 具有良好的噪声特性。本文所设计的前向多泵浦掺铒碲基 RFA 具有结构简单、超大带宽、高增益和增益平坦的特点,MMPA 具有优良的全局搜索能力,可为 RFA 寻优得到最佳的泵浦配置,在保证较高输出增益的同时,其增益平坦度低于 1 dB,为下一代光通信网络中 RFA 的设计提供了参考。

参考文献:

[1] FENG W WEI S, CAO J. 6G technology development vision and terahertz communication[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(24): 244303.

[2] AKHTAR M W, HASSAN S A, GHAFAR R, et al. The shift to 6G communications: vision and requirements[J]. Human-Centric Computing and Information Sciences, 2020, 10(1): 53.

[3] CURRI V, CARENA A. Merit of Raman pumping in uniform

- and uncompensated links supporting NyWDM transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 554-565.
- [4] BORRACCINI G, STRAULLU S, FERRARI A, et al. Flexible and autonomous multi-band Raman amplifiers[C]//2020 IEEE Photonics Conference (IPC), September 28-October 1, 2020, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE, 2020: 1-2.
- [5] BROMAGE J. Raman amplification for fiber communications systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 79-93.
- [6] 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.
- [7] FARAMARZI A, HEIDARINEJAD M, MIRJALILI S, et al. Marine predators algorithm: a nature-inspired metaheuristic [J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 152: 113377.
- [8] SINGH S, KALER R S. Performance optimization of EDFA-Raman hybrid optical amplifier using genetic algorithm [J]. *Optics and Laser Technology*, 2015, 68: 89-95.
- [9] GONG J M, DING Z, LI S P, et al. Multi-pumped tellurite-based Raman fiber amplifier based on Gaussian fitting of gain spectrum [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(6): 245.
- [10] VERMA R, JANYANI V, NANDA S J. Optimization of hybrid amplifier parameters for improved optical link performance[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(9): 488.
- [11] GONG J, LU J, GAO R, et al. Design of backward-pumping RFA based on modified particle swarm optimization algorithm[C]//2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMT-MA), January 15-16, 2022, Changsha, China. New York: IEEE, 2022: 594-599.
- [12] TANG A, XIE L, HAN T, et al. Multi group marine predator algorithm[C]//2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), March 26-28, 2021, Changsha, China. New York: IEEE, 2021: 514-517.
- [13] FU H, LIU S L, GUAN Z F, et al. Phased-improvement marine predators algorithm and its application[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(4): 902-910.
付华, 刘尚霖, 管智峰, 等. 阶段化改进的海洋捕食者算法及其应用[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 902-910.
- [14] FARAMARZI A, HEIDARINEJAD M, MIRJALILI S, et al. Marine predators algorithm: a nature-inspired metaheuristic[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 152: 113377.
- [15] TANG A, ZHOU H, HAN T, et al. A chaos sparrow search algorithm with logarithmic spiral and adaptive step for engineering problems [J]. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2022, 130(1): 331-364.

作者简介:

蒋杰伟 (1982—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光通信与光信息技术方面的研究。