

# 基于人工蜂群算法的多抽运拉曼光纤放大器优化设计

陈静, 周清旭, 林雅婷, 江灏\*

福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116

**摘要** 针对多抽运拉曼光纤放大器的优化设计, 将人工蜂群算法与平均功率法相结合, 应用于拉曼光纤放大器反向抽运的优化配置。在满足给定的净增益条件下, 以最小化拉曼增益波动为优化目标建立优化模型, 运用平均功率法对拉曼散射方程进行求解, 并采用人工蜂群算法获得抽运波长和抽运功率的最优配置。采用上述方法分别对 C 波段和 C+L 波段的拉曼光纤放大器进行设计, 实验结果表明, 在不同净增益设计条件下均能得到小于  $\pm 0.4$  dB 的增益波动。相比现有方法, 人工蜂群算法与平均功率法的结合具有较强的设计性能, 能够得到更为平坦的优化结果, 具有一定的实用价值。

**关键词** 光纤光学; 拉曼光纤放大器; 人工蜂群算法; 优化设计

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606002

## Optimization Design of Multi-Pump Raman Fiber Amplifiers Based on Artificial Bee Colony Algorithm

Chen Jing, Zhou Qingxu, Lin Yating, Jiang Hao

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China

**Abstract** Aiming at the optimization design of Raman fiber amplifier with multiple backward pumps, we combine the artificial bee colony algorithm with the average power analysis to optimize the configuration of backward pump of Raman fiber amplifier. On the basis of the given gain, the optimized model is established in order to minimize the ripple of Raman gain. The average power analysis is utilized to solve Raman scattering equations, and the artificial bee colony algorithm is employed to find the optimal pump wavelength and pump power. The proposed method is used to design the Raman fiber amplifier at C band and C+L band. The results show that the gain ripple can be controlled below  $\pm 0.4$  dB under different net gain levels. Compared with the existing methods, the combination of artificial bee colony algorithm and average power analysis has a good performance and can obtain the flatter optimization results, which has certain practical value.

**Key words** fiber optics; Raman fiber amplifier; artificial bee colony algorithm; optimization design

**OCIS codes** 060.2320; 230.2285; 000.3860

## 1 引言

近年来,拉曼光纤放大器作为目前唯一的全波段光放大器,在光通信、电力通信等领域受到广泛关注,可以满足密集波分复用(DWDM)系统对带宽容量的提升需求,拥有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。拉曼光纤

放大器具备全波段放大、低噪声、能抑制非线性效应和容易进行色散补偿等优点,其增益介质是传输光纤本身,可以实现分布式长距离放大传输,特别适用于无中继传输的场合<sup>[2]</sup>。拉曼光纤放大器既可以作为现有掺铒放大器(EDFA)的有利辅助,也可以独立工作,用于放大 EDFA 不能工作的波段,因此,拉曼光

收稿日期: 2017-11-21; 收到修改稿日期: 2018-01-05

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(61703105,61703106)、福建省自然科学基金面上项目(2017J01500)、福建省教育厅中青年科研项目(JAT170107)、福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160415)、福州大学引进人才科研启动项目(XRC-1623,XRC-17011)

**作者简介:** 陈静(1988—),女,博士,讲师,主要从事光学器件优化方面的研究。E-mail: chenjing@fzu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jiangh@fzu.edu.cn

纤放大器将成为下一代主流的光放大器<sup>[3]</sup>。在商业化的进程中,为了能够在带宽范围内得到比较平坦的增益输出,拉曼光纤放大器常采用多个反向抽运的系统结构。该结构的拉曼光纤放大器的设计核心在于选择合适的抽运波长和抽运功率的组合,使得输出的增益谱尽可能平坦,即最小化带宽范围内的增益波动。由于拉曼光纤放大器的工作原理是基于受激拉曼效应,其输出增益与抽运参数呈现复杂的非线性关系,且不存在解析方程,因此数值优化方法难以求解此类问题。现有的设计方法多采用遗传算法<sup>[4]</sup>、模拟退火算法<sup>[5]</sup>和粒子群算法<sup>[6]</sup>等结合打靶法<sup>[7]</sup>或平均功率法<sup>[8]</sup>,对抽运波长和抽运功率进行优化,以得到最优的抽运光源的配置。但是以上传统的优化方法存在优化效率低、容易陷入局部最优等缺陷,影响拉曼光纤放大器的设计性能<sup>[9-10]</sup>。随着优化算法研究的逐步深入,一些更为先进的优化算法将有助于进一步提升拉曼光纤放大器设计效率和设计性能。

因此,本文将一种改进的人工蜂群算法引入到拉曼光纤放大器优化设计中,人工蜂群算法是一种模仿蜂群行为的群体启发式搜索算法,特别适合解决多变量函数的优化问题,有较快的算法收敛速度。将人工蜂群算法与平均功率法相结合,运用平均功率法对拉曼光纤放大器的数学模型——拉曼耦合方程组进行求解,再分别对 C 波段和 C+L 波段的拉曼光纤放大器进行设计,以获得一种高效高性能的

拉曼光纤放大器设计。

## 2 设计原理与理论模型

### 2.1 多抽运拉曼光纤放大器优化模型

反向多抽运拉曼放大器的原理如图 1 所示,在波分复用(WDM)系统中,多路信号光通过光复用器耦合到一根光纤中传输,在传输过程中信号光功率逐渐衰减。反向抽运的拉曼放大器就是利用反向抽运光在光纤传输中的受激拉曼效应,对信号光进行实时补偿,达到在线放大信号光的目的。为了实现较为平坦的增益输出,一般采用多抽运结构,通过多个抽运光的综合作用满足不同程度的信号放大需求。受激拉曼效应的数学模型可以用拉曼散射耦合方程表示,忽略瑞利色散等影响较小的非线性效应,通常简化后的拉曼散射耦合方程可以表示为

$$\frac{\partial P^\pm(z,i)}{\partial z} = \sum_{j>i} \frac{g(j-i)}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} P^\pm(z,j)P^\pm(z,i) - \sum_{j<i} \frac{i}{j} \frac{g(i-j)}{K_{\text{eff}}A_{\text{eff}}} P^\pm(z,i) \times P^\pm(z,j) - \alpha(i)P^\pm(z,i), \quad (1)$$

式中: $P^\pm(z,i)$ 为频率为*i*的正反向光在光纤长度*z*点的功率; $\alpha(i)$ 为频率*i*的光在光纤中的衰减系数; $g$ 为频率为*i*的光在频率为*j*光作用下的拉曼增益; $K_{\text{eff}}$ 为抽运光和信号光之间的偏振因子, $A_{\text{eff}}$ 为光纤有效纤芯面积。

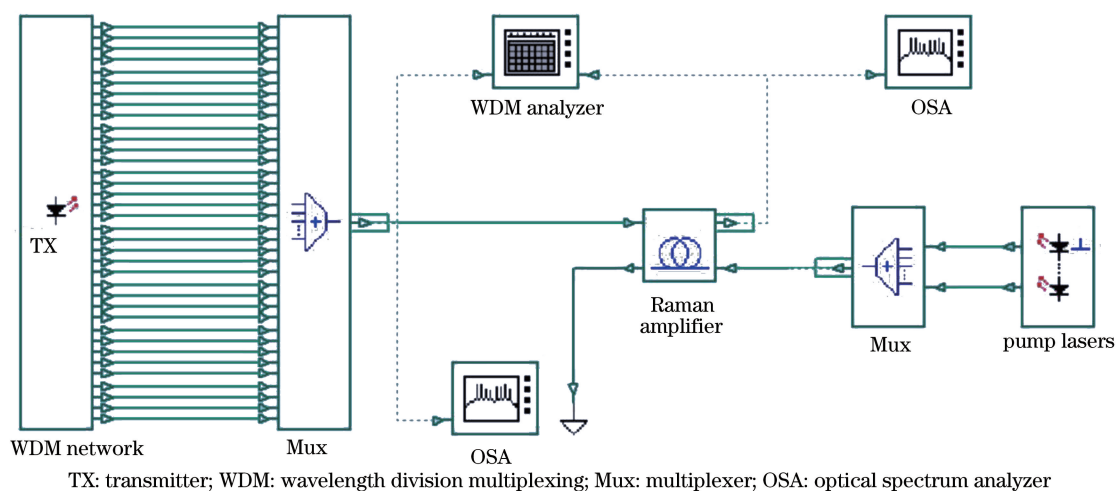


图 1 反向多抽运拉曼放大器的原理图

Fig. 1 Schematic of multi-backward-pump Raman amplifier

设 WDM 系统有  $m$  路信号,拉曼放大器的方向抽运数为  $n$ ,则根据(1)式可以得到  $m+n$  个微分方程,这些微分方程很难得到解析解,因此这里使用平均功率法进行数值求解。通过数值求解可以得到各

路信号光在不同光纤位置的光功率  $P_{s,m}(z)$ ,以及各抽运光在不同光纤位置的光功率  $P_{p,n}(z)$ 。为了评估拉曼放大器设计性能,使用净增益  $G_{\text{net}}(m)$  作为主要评价指标<sup>[11]</sup>:

$$G_{\text{net}}(m) = 10 \lg \frac{P_{s,m}(L)}{P_{s,m}(0)}, \quad (2)$$

式中:  $L$  为传输光纤长度,  $P_{s,m}(L)$  和  $P_{s,m}(0)$  分别为第  $m$  路信号光经过拉曼放大器后的输出光功率和输入光功率。在信号光参数确定的情况下, 系统净增益  $G_{\text{net}}(m)$  完全可以由抽运波长  $\lambda_{p,n}$  和抽运功率  $P_{p,n}$  确定, 可以表示为

$$G_{\text{net}}(m) = \phi(\lambda_{p,n}, P_{p,n}). \quad (3)$$

$$G_{\text{ripple, min}} = \begin{cases} G_{\text{net, max}}(m) - G_t, & G_{\text{net, min}}(m) > G_t \\ G_t - G_{\text{net, min}}(m), & G_{\text{net, max}}(m) < G_t, \quad \lambda_{p,n} \in [\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}], P_{p,n} \in [P_{\text{min}}, P_{\text{max}}], \\ G_{\text{net, max}}(m) - G_{\text{net, min}}(m), & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $G_{\text{ripple, min}}$  为带宽内的净增益波动的最小值;  $G_{\text{net, max}}(m)$  为带宽内的净增益的最大值;  $G_{\text{net, min}}(m)$  为带宽内的净增益的最小值;  $\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}, P_{\text{min}}$  和  $P_{\text{max}}$  分别为待设计的拉曼放大器各抽运波长和功率的上下限。

## 2.2 平均功率法

拉曼放大器优化设计中主要的计算环节是对拉曼散射耦合方程的求解, 平均功率法是目前最高效的一种数值求解方法。其核心思想是用分段代数运算代替积分运算, 将计算光路分割为多个小段, 认为每个小段中的信号光和抽运光功率保持不变。首先将(1)式的拉曼散射方程表示为

$$\frac{\partial P^\pm(z, i)}{\partial z} = [A_i(z) - B_i(z) - \alpha(i)] P^\pm(z, i), \quad (5)$$

$$A_i(z) = \sum_{j>i} \frac{g(j-i)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P^\pm(z, j), \quad (6)$$

$$B_i(z) = \sum_{j<i} \frac{i}{j} \frac{g(i-j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P^\pm(z, j). \quad (7)$$

那么, 对于每一个光纤小段, 输入功率  $P_{\text{in}}^\pm(i)$  和输出功率  $P_{\text{out}}^\pm(i)$  关系可以表示为

$$P_{\text{out}}^\pm(i) = P_{\text{in}}^\pm(i) \times G(z, i), \quad (8)$$

$$G(z, i) = \exp\{[A(z, i) - B(z, i) - \alpha(i)]z\}. \quad (9)$$

根据假设, 每个小段中的信号光和抽运光功率保持不变, 对于每个小段,  $A(z, i)$  和  $B(z, i)$  都可以认为是与  $z$  无关的数, 于是每个小段上的平均光功率可以表示为

$$\bar{P}^\pm(i) = P_{\text{in}}^\pm(i) \frac{G(i) - 1}{\ln G(i)}. \quad (10)$$

于是, 可以根据(5)~(10)式, 给定输入端信号光功率的初始值和输出端抽运光功率的初始值, 依次对每小段光纤反复迭代, 直至指定的终止条件, 这里的

虽然函数  $\phi$  不存在显式的解析表达式, 但可以通过平均功率法求解(1)式和(2)式得到计算结果。因此, 反向多抽运拉曼放大器的优化设计过程就是对各路抽运光源的功率和波长进行优化的过程, 优化的目的就是使各路信号光的净增益满足一定的性能要求。在系统净增益  $G_{\text{net}}(m)$  满足目标增益  $G_t$  的情况下, 以最小化带宽内的净增益波动  $G_{\text{ripple}}$  为优化目标, 建立优化设计模型为

终止条件一般是固定次数, 比如 20 次, 或使输入输出的误差值小于  $10^{-4}$  mW, 从而获得不同光纤位置上信号光和抽运光的相应光功率值, 进而可以得到信号光的净增益等性能参数指标。

## 2.3 改进的人工蜂群算法

人工蜂群算法是一种高效解决多变量函数优化问题的群体智能算法, 由 Karaboga 等<sup>[12-13]</sup> 提出, 受到计算智能学术界的广泛关注。其对优化问题维度不敏感, 因此适用于求解高维问题, 特别适用于拉曼放大器优化这种多变量高维度优化问题。

人工蜂群算法是依据蜜蜂采蜜行为而产生的启发式智能寻优算法, 其最优解的搜索模型包含三个基本部分: 食物源、雇佣蜂和未雇佣蜂, 以最大化食物源的价值为优化目标, 一般衡量食物源价值采用适应度函数。雇佣蜂与食物源一一对应, 食物源的信息包括距离蜂巢的距离、方向以及食物源的价值等, 并以一定的概率与其他蜜蜂共享, 保存现有蜂群的最优解。未雇佣蜂包括两种: 侦查蜂和跟随蜂, 侦查蜂用于寻找新的食物源, 增加搜索的多样性, 避免陷入局部最优; 跟随蜂通过与雇佣蜂分享信息找到食物源, 起到加速算法收敛的作用。人工蜂群算法通过两种行为模型进行更新搜索: 招募雇佣蜂和放弃某个食物源, 包括以下几个步骤<sup>[14]</sup>:

1) 初始化蜂群, 假设初始食物源数量为  $N_p$ , 对于抽运数为  $n$  的拉曼放大器问题, 各食物源第  $g$  次迭代后的位置  $\mathbf{X}_s^{(g)} = [x_{s1}^{(g)}, x_{s2}^{(g)}, \dots, x_{sD}^{(g)}], s=1, 2, 3, \dots, N_p$ , 用抽运波长和抽运功率联合表示, 即  $\mathbf{X}_s^{(g)} = [\lambda_{s1}^{(g)}, \lambda_{s2}^{(g)}, \dots, \lambda_{sD}^{(g)}, P_{s1}^{(g)}, P_{s2}^{(g)}, \dots, P_{sD}^{(g)}], D$  为优化问题的维度。食物源的初始位置可以通过抽运波长和抽运功率的取值范围进行随机初始化。食物源的价值用适应度函数  $\text{fit}(\mathbf{X}_s^{(g)})$  表示。

2) 雇佣蜂在食物源附近搜索新食物源。雇佣蜂与食物源的数量一致,并且一一对应,新食物源的更新公式可以表示为

$$v_{sj}^{(g)} = x_{sj}^{(g)} + \varphi_{sj}(x_{sj}^{(g)} - x_{kj}^{(g)}), \quad (11)$$

式中: $\varphi_{sj}(\cdot)$ 为 $0\sim 1$ 之间的随机数; $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ ,  $k \neq s$ ,  $k$ 随机生成。新食物源为  $\mathbf{V}_s^{(g)} = [v_{s1}^{(g)}, v_{s2}^{(g)}, \dots, v_{sD}^{(g)}]$ 。计算  $\mathbf{V}_s^{(g)}$  的价值  $\text{fit}[\mathbf{V}_s^{(g)}]$ , 比较新食物源与原食物源, 若新食物源比原食物源价值高则替代原食物源。

3) 跟随蜂的跟随行为。跟随蜂的数量与雇佣蜂数量相同, 依据从雇佣蜂分享得到的食物源价值选择要跟随的雇佣蜂, 选择概率为

$$p_s = \frac{\text{fit}[\mathbf{V}_s^{(g)}]}{\sum_s^{N_p} \text{fit}[\mathbf{V}_s^{(g)}]}, \quad (12)$$

选择雇佣蜂后按照步骤 2) 的方式在该食物源附近搜索新的食物源。

4) 侦查蜂的产生和食物源的放弃。若食物源在  $\mathbf{X}_s$  经过一定迭代次数搜索后没有获得更好的食物源, 则该食物源被放弃, 该食物源的雇佣蜂转变为侦查蜂, 在搜索空间中再随机产生一个新的食物源。

以此类推, 重复 2)~4) 步, 直到算法满足终止条件, 一般终止条件为指定的最大迭代次数。最后输出得到的最优抽运波长和抽运功率的组合。

### 3 实验结果

依据图 1 所示的实验原理图, 分别进行 C 波段 (1530~1565 nm) 和 C+L 波段 (1530~1620 nm) 反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验, 并与现有文献中不同的拉曼放大器优化设计方法, 包括遗传算法(GA)、蚁群算法(ACO)、粒子群算法(PSO)以及鱼群算法(FSA)的实验结果进行对比, 以此验证所提出的人工蜂群算法设计的有效性。

实验采用标准单模光纤, 各信道的信号光功率为  $-10$  dBm, 信道间隔为  $1$  nm。抽运波长的调节范围为  $1420\sim 1480$  nm, 抽运功率的调节范围为  $10\sim 500$  mW。其中 C 波段反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验采用的光纤长度为  $20$  km, 工作信道波长范围为  $1530\sim 1565$  nm, 待设计的抽运光源数为  $2$ 。C+L 波段反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验采用的光纤长度为  $25$  km, 工作信道波长范围为  $1530\sim 1620$  nm, 待设计的抽运光源数为  $4$ 。

人工蜂群算法在计算机 (CPU: I5 处理器,  $2.4$  GHz; 内存  $4$  G) 上根据不同波段放大器的设计

需求进行设计运算, 将计算得到的抽运功率和抽运波长的组合设置到抽运阵列中, 通过 WDM 分析仪和光谱分析仪 (OSA) 进行实验验证。其中人工蜂群算法的参数设置为: 食物源数为  $25$ , 蜂群总数为  $50$ , 雇佣蜂数与跟随蜂数均为  $50$ , 放弃食物源的迭代上限为  $50$  次, 算法的最大迭代次数为  $200$  次。

#### 3.1 C 波段反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验

首先进行 C 波段反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验, 主要设计不同目标净增益的 C 波段拉曼放大器, 以验证人工蜂群算法对不同目标增益设计的准确性。实验设计了目标净增益为  $0$  dB,  $1$  dB,  $2$  dB,  $3$  dB,  $4$  dB 的拉曼放大器。C 波段拉曼光纤放大器优化设计参数和结果如表 1 所示, 不同目标增益 ( $0$  dB,  $1$  dB,  $2$  dB,  $3$  dB,  $4$  dB) 的设计结果如图 2 所示。设计得到的抽运 1 和抽运 2 的功率分别对应表中的  $P_1$  和  $P_2$ , 波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。目标净增益为  $0$  dB,  $1$  dB,  $2$  dB,  $3$  dB,  $4$  dB 的实验验证结果分别为  $0.0429$  dB,  $1.1023$  dB,  $1.9590$  dB,  $2.8441$  dB,  $3.9615$  dB, 平均净增益误差为  $0.0952$  dB, 很好地满足了目标净增益的要求。针对不同目标净增益设计得到的放大器, 其增益波动虽然随着目标增益的提高有所增加, 从  $\pm 0.1613$  增加到  $\pm 0.3071$ , 但是最大增益波动仅为  $\pm 0.3071$  dB, 处于很低的水平, 具有较好的平坦性能。可见, 人工蜂群算法可以得到较为平坦且满足不同目标增益的拉曼放大器。

表 1 C 波段拉曼光纤放大器优化设计参数和结果

Table 1 Optimal parameters and results for C band Raman fiber amplifiers

Parameter of pumps				Net gain	Ripple
$P_1/\text{mW}$	$P_2/\text{mW}$	$\lambda_1/\text{nm}$	$\lambda_2/\text{nm}$	/dB	/dB
66.8	143.8	1431.2	1458.8	0.0429	$\pm 0.1613$
182.5	87.4	1431.1	1458.6	1.1023	$\pm 0.2038$
98.3	216.6	1430.3	1457.4	1.9590	$\pm 0.2136$
121.0	246.2	1430.6	1457.9	2.8441	$\pm 0.2579$
284.3	147.7	1431.7	1458.2	3.9615	$\pm 0.3071$

从算法层面观察, 目标增益为  $0$  dB 的拉曼放大器优化设计迭代过程如图 3 所示。由图 3 可见, 在针对目标净增益  $0$  dB 的拉曼放大器设计实验中, 人工蜂群算法的优化迭代收敛过程, 从初始增益波动  $1.546$  dB 一直快速下降, 持续优化后, 算法在  $50$  代左右就已经接近收敛, 故人工蜂群算法特别适合求解此类高维度多变量的拉曼放大器优化设计问题。

#### 3.2 C+L 波段反向抽运拉曼光纤放大器的设计实验

为了进一步验证人工蜂群算法针对不同波段设

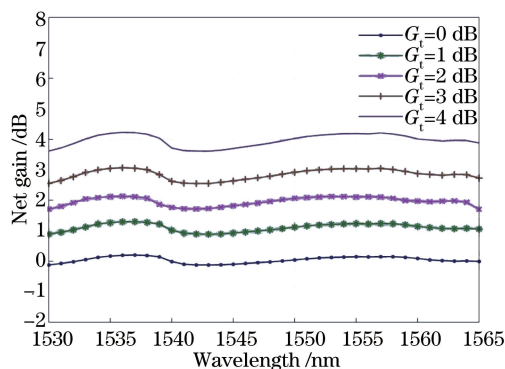


图 2 不同目标增益的设计结果

Fig. 2 Net gain design of different target gains

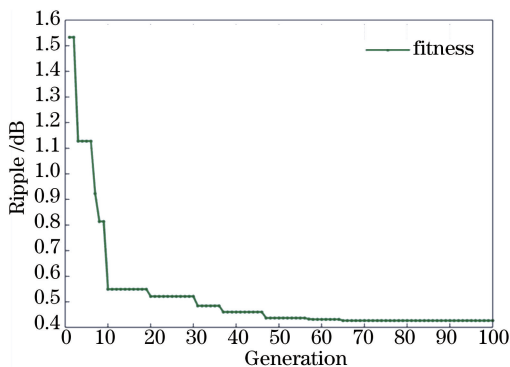


图 3 目标增益为 0 dB 的拉曼放大器优化设计迭代过程

Fig. 3 Evolution process of fitness for Raman amplifier optimization with target gain of 0 dB

计的普适性,继续进行 C+L 波段反向抽运拉曼光纤放大器设计实验,在同样的人工蜂群算法参数设置下,目标净增益设置为 0 dB,最终得到目标增益为 0 dB 的 C+L 波段设计结果,如图 4 所示。通过优化设计得到的抽运波长分别为 1483.5, 1434.0, 1519.2, 1462.2 nm, 对应的抽运功率分别为 53.3, 156.1, 117.2, 72.1 mW, 实验验证平均净增益为 0.0562 dB, 增益波动为  $\pm 0.2933$  dB, 在满足目标净增益条件下,同样具有较好的增益平坦度。

图 5 为不同波长抽运功率沿着光纤变化过程,反映了所设计的 C+L 波段放大器 4 个抽运功率分别沿着光纤传输的变化过程。根据反向抽运原理从右往左观察,可以看出,短波长的抽运光(1434.0 nm)会率先将能量转移给其他抽运光和信号光,而长波长的抽运光(1519.2 nm)先被其他抽运光补充,而后又向信号光转移能量,表现出光功率先升后降的现象。总之,所有抽运光在反向传输过程中最终都会转移能量给信号光,使信号光得到放大。

### 3.3 算法比较分析

最后,将所提出的人工蜂群算法与现有文献中不同的拉曼放大器优化设计方法进行对比。重点与遗

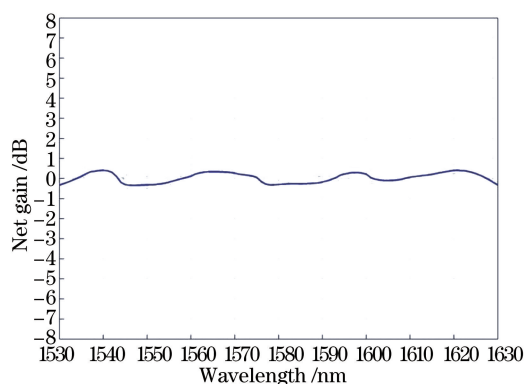


图 4 目标增益为 0 dB 的 C+L 波段设计结果

Fig. 4 0 dB net gain design of C+L band

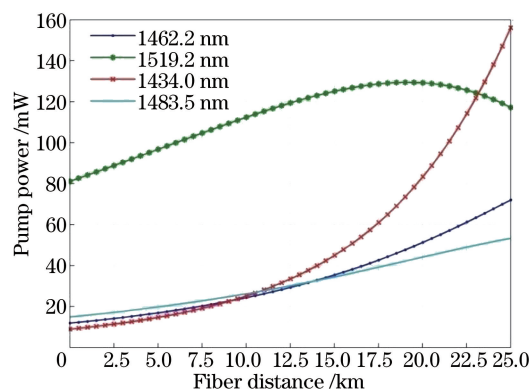


图 5 不同波长抽运功率沿着光纤变化过程

Fig. 5 Evolution of pump power with different wavelengths along fiber

传算法(GA)、蚁群算法(ACO)、粒子群算法(PSO)以及鱼群算法(FSA)配合打靶法(ShA)与平均功率法(APA)进行对比,对比结果如表 2 所示。对于 C 波段设计,提出的人工蜂群算法与平均功率法相结合的优化设计结果相比 GA+ShA、PSO+ShA、ACO+APA 以及 FSA+APA,具有较低的增益波动;对于 C+L 波段设计,所提算法也同样具有一定的性能优势。由此可见,所提出的人工蜂群算法与平均功率法相结合的拉曼放大器优化设计方法能够实现性能更加优越的拉曼光纤放大器的优化配置。

表 2 所提出的方法与其他算法的对比结果

Table 2 Comparison results of proposed method and other methods

Method	Band	Ripple
GA+ShA <sup>[7]</sup>	C	$\pm 0.6(1.2)$
PSO+ShA <sup>[7]</sup>	C	$\pm 0.25(0.5)$
ACO+APA <sup>[15]</sup>	C	$\pm 0.23(0.46)$
FSA+APA <sup>[16]</sup>	C	$\pm 0.33(0.66)$
ACO+APA <sup>[15]</sup>	C+L	$\pm 0.385(0.75)$
Proposed method	C	$\pm 0.16$
Proposed method	C+L	$\pm 0.29$

## 4 结 论

提出了一种新的结合人工蜂群算法与平均功率法的多抽运拉曼放大器优化设计方法,完成了 C 波段和 C+L 波段的设计实验并与现有文献对比。结果表明,人工蜂群算法适用于解决多抽运拉曼放大器优化设计问题,其设计结果很好地满足了目标净增益的要求,同时,拉曼放大器的平坦度性能能够得到最大限度的优化,因此所提出的人工蜂群算法与平均功率法相结合的优化方法对于拉曼光纤放大器的设计具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] Supradeepa V, Feng Y, Nicholson J W. Raman fiber lasers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 023001.
- [2] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201005.  
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201005.
- [3] Li H X, Zhang R. Progress of fiber amplification network and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010002.  
李宏勋, 张锐. 光纤放大网络及其应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010002.
- [4] Ferreira G C M, Cani S P N, Pontes M J, *et al.* Optimization of distributed Raman amplifiers using a hybrid genetic algorithm with geometric compensation technique[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(3): 390-399.
- [5] Yan M H, Chen J P, Jiang W N, *et al.* Automatic design scheme for optical-fiber Raman amplifiers backward-pumped with multiple laser diode pumps [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 948-950.
- [6] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. Pump scheme for gain-flattened Raman fiber amplifiers using improved particle swarm optimization and modified shooting algorithm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11033-11045.
- [7] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. Shooting algorithm and particle swarm optimization based Raman fiber amplifiers gain spectra design[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(17): 3348-3352.
- [8] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. Flat gain spectrum design of Raman fiber amplifiers based on particle swarm optimization and average power analysis technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50: 226-230.
- [9] Chen J, Jiang H, Liu T D, *et al.* Optimization for Raman fiber amplifiers based on least squares support vector regression model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123004.  
陈静, 江灏, 刘瞰东, 等. 基于最小二乘支持向量回归模型的拉曼光纤放大器优化设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123004.
- [10] Khalaf A A M, Mustafa F M. Raman amplifier performance under new wavelength ranges[J]. *Journal of Optical Communications*, 2016, 37(1): 9-21.
- [11] Tong Z, Wei H, Jian S S. Numerical simulation and optimization of broadband fiber Raman amplifiers using multi-wavelength pumps[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(2): 193-196.  
童治, 魏淮, 简水生. 多波长抽运宽带光纤拉曼放大器的数值模拟与优化[J]. *光学学报*, 2003, 23(2): 193-196.
- [12] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. *Journal of Global Optimization*, 2007, 39(3): 459-471.
- [13] Karaboga D, Gorkemli B, Ozturk C, *et al.* A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2014, 42(1): 21-57.
- [14] Akay B, Karaboga D. Artificial bee colony algorithm variants on constrained optimization [J]. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 2017, 7(1): 98-111.
- [15] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. Novel design of flat gain spectrum Raman fiber amplifiers based on ant colony optimization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(23): 1823-1825.
- [16] Jiang H M, Xie K, Wang Y F. Optimization of pump parameters for gain flattened Raman fiber amplifiers based on artificial fish school algorithm [J]. *Optics Communications*, 2011, 284: 5480-5483.