

激光与光电子学进展

基于合作搜索算法的二阶碲基光纤拉曼放大器
优化设计巩稼民¹, 金库^{3*}, 张依², 刘尚辉³, 刘海洋², 魏戌盟³¹西安邮电大学现代邮政学院, 陕西 西安 710121;²西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;³西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 随着新一代移动通信系统发展,对高数据速率和更大带宽的需求日益增加,利用碲基光纤作为传输介质,采用了两路二阶泵浦和四路一阶泵浦设计的二阶拉曼光纤放大器实现了对 C+L 全波段信号光进行放大,能够有效缓解带宽增长给光通信网络带来的挑战。首先对简化后的二阶拉曼耦合波方程进行数值求解,再利用合作搜索算法对二阶拉曼光纤放大器泵浦参数进行优化,以达到提升系统输出性能的目的。同时,分析了在相同泵浦参数的配置下一阶拉曼光纤放大器和二阶拉曼光纤放大器的性能以及二阶泵浦光功率、光纤长度这两个重要因素对二阶碲基拉曼光纤放大器平均输出增益和增益平坦度的影响。最终在 1530~1630 nm 的超宽带宽范围内,设计出的二阶碲基光纤拉曼放大器平均输出增益为 27.3601 dB,增益平坦度为 0.6601 dB。

关键词 光纤光学; 碲基光纤; 二阶拉曼光纤放大器; 合作搜索算法; 增益平坦度

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222174

Optimized Design of Second-Order Tellurium-Based Fiber Raman
Amplifier Based on Cooperative Search AlgorithmGong Jiamin¹, Jin Ku^{3*}, Zhang Yi², Liu Shanghui³, Liu Haiyang², Wei Xumeng³¹School of Modern Post, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;²School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710121, Shaanxi, China;³School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710121, Shaanxi, China

Abstract Recently, with the development of new-generation mobile communication systems, the demand for high data rates and large bandwidth is increasing. In this study, we proposed a second-order Raman fiber amplifier designed with two second-order pumps and four first-order pumps to amplify the C+L full-band signal light using a tellurium-based optical fiber as the transmission medium, which can effectively alleviate optical communication network challenges due to bandwidth growth. First, a simplified second-order Raman coupled wave equation is solved numerically, and then the pumping parameters of the second-order Raman fiber amplifier are optimized using a cooperative search algorithm to improve output performance. Meanwhile, the performance of first- and second-order Raman fiber amplifiers under the same pump parameter configuration is analyzed. Additionally, the influence of two key factors, that is, second-order pump optical power and fiber length on the average output gain and gain flatness of a designed second-order tellurium-based Raman fiber amplifier are investigated. Experimental results show that the average output gain of the designed second-order tellurium-based fiber Raman amplifier is 27.3601 dB and the gain flatness is 0.6601 dB in the ultrawide bandwidth range of 1530–1630 nm.

Key words fiber optics; tellurite-based fiber; second-order Raman fiber amplifier; cooperative search algorithm; gain flatness

收稿日期: 2022-07-28; 修回日期: 2022-09-17; 录用日期: 2022-10-13; 网络首发日期: 2022-10-23

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

通信作者: jin_ku@stu.xupt.edu.cn

1 引言

随着 5G 移动通信系统的商用推出^[1],其也存在着局限性^[2],而新一代移动通信 6G 战略的提出,一方面要解决 5G 的局限性,另一方面希望在更高的频率上工作,以实现更宽的带宽^[3],带宽的不断增长和高质量的服务需求给光通信网络带来了前所未有的挑战^[4]。传统的波分复用(WDM)系统网络在容量、业务调度等方面存在不足^[5],因此,实现大容量^[6]、大规模^[7]、提升波分复用系统容量成为了下一代全光通信研究的关键性问题^[8]。而拉曼光纤放大器(RFA)具有噪声系数小^[9]、长距离传输^[10]、全波段放大等特点,成为了能有效解决上述问题的方法之一。目前针对于 RFA 的设计方案多为前向多泵浦^[11],通过多泵浦方案实现信号光的放大,然而此类方案随着光纤长度的不断增加,噪声也会累加,从而严重影响传输带宽以及传输质量。因此,为了在实现降低增益平坦度的同时,有效增加放大带宽范围,一个新的研究热点出现了,即高阶 RFA^[12]。

近几年,国内外对高阶 RFA 的研究不断涌现:2016 年 Tan 等^[13]在不增加信号相对强度噪声的情况下实现了双向二阶拉曼泵浦,将 WDM 传输的范围扩展到 7915 km,为长距离传输提供了方案;2017 年 Li 等^[14]设计了一种用于低噪声分布式光纤放大的二阶拉曼放大器,最大开关增益达到 4 dB,差模增益小于 0.4 dB,实现了二阶泵浦的低噪声放大;2020 年 Ali 等^[15]提出了一种基于二阶受激拉曼散射的宽带串行光

纤放大器,在 90 nm 内平均增益分别为 25.165 dB、19.649 dB;同年,巩稼民等^[16]使用粒子群算法优化二阶泵浦参数,在放大带宽 100 nm 范围内,平均输出增益达到 23.768 dB 且增益平坦度低至 0.9112 dB。上述研究中,所设计的高阶 RFA 并没有在平均输出增益以及增益平坦度这两个重要的指标上同时取得较好的性能,均存在着一定的缺陷。因此,本文首先在采用四阶龙格库塔法对简化后的二阶拉曼耦合波方程进行数值求解的基础上,利用合作搜索算法(CSA)对二阶碲基拉曼光纤放大器(T-RFA)泵浦参数进行优化,最终实现了超宽带宽放大,同时保证了增益平坦。

2 二阶 T-RFA 理论基础与结构设计

2.1 二阶 T-RFA 理论基础

首先,在对信号光的放大机理上,二阶拉曼放大与一阶拉曼放大相比,在传统的泵浦光通过一次拉曼频移,产生 Stokes 频移实现对于信号光的放大的基础上,注入二阶泵浦光,对一阶泵浦光进行放大,然后利用被放大之后的一阶泵浦光与信号光之间的相互作用,使得信号光被有效放大,最终达到“接力式放大”的效果。

在实际的通信系统的 RFA 设计过程中,存在着多路不同波长的信号光以及泵浦光同时耦合进入光纤中传输的情况,需考虑到泵浦光、信号光、泵浦光与信号光之间由于受激拉曼效应而发生能量的转移,以及传输过程中不可避免的双向瑞利散射噪声和放大自发辐射噪声等对二阶 T-RFA 的影响,从而建立简化后的非线性拉曼耦合波微分方程,表示为

$$\pm \frac{dP_j}{dz} = \sum_{\nu_i > \nu_j} \frac{g_R(\nu_i - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_i - \sum_{\nu_k < \nu_j} \frac{\nu_j}{\nu_k} \frac{g_R(\nu_j - \nu_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j + \gamma_j P_j + 2h\nu_i \cdot \sum_{\nu_i > \nu_j} \frac{g_R(\nu_i - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(\nu_i - \nu_j)/KT] - 1} \right\} \cdot \Delta\nu, \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

式中:第 i, j, k 路信道光功率分别用 P_i, P_j, P_k 来表示;第 i, j, k 路信道光频率分别用 ν_i, ν_j, ν_k 来表示; $g_R(\nu_i - \nu_j)$ 为第 i 路以及第 j 路信道两路光之间的拉曼增益系数; $g_R(\nu_j - \nu_k)$ 为第 j 路以及第 k 路信道两路信号光之间的拉曼增益系数; γ_j 为瑞利散射系数; K_{eff} 为偏振相关因子,在一般情况下取值为 1 或 2; A_{eff} 为光纤有效纤芯面积大小; α_j 为第 j 信道信号光在传输介质中的损耗系数; K 为玻尔兹曼常量; h 为普朗克常量; T 为光纤的绝对温度; \pm 号分别表示 RFA 泵浦光注入光纤采用前向和后向。

由于本文设计的二阶 T-RFA 采用前向泵浦结构,泵浦光与信号光均从光纤的同一侧输入,故在式(1)中取 + 号。对于该简化后的拉曼耦合波方程的求解,主要有打靶法、平均功率法以及龙格库塔法,本文采用四阶龙格库塔法对式(1)进行数值求解,具体求解方法为

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

为了实现设计出的二阶 T-RFA 高输出增益,且同时具有较低的增益平坦度,故将合作搜索算法的适应度函数设置为

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

式中： $\max(G_{\text{on-off}})$ 、 $\min(G_{\text{on-off}})$ 分别表示二阶 T-RFA 开关增益的最大、最小值，两者之差即为增益平坦度。

2.2 二阶 T-RFA 结构设计

本文所设计的二阶 T-RFA 结构如图 1 所示，光发射机输出以 1 nm 波长为间隔且波长范围为 [1530 nm, 1630 nm] 的 100 路信号光、4 路一阶泵浦光和 2 路二阶泵浦光。然后通过光合波器耦合注入同一 TeO₂-Bi₂O₃-

ZnO-Na₂O(TBZN) 碲酸盐光纤中进行传输，在传输过程中，由于受激拉曼散射效应^[17]，两路二阶泵浦光与四路一阶泵浦光相互作用，致使一阶泵浦光得到能量，实现一阶放大，然后被放大的一阶泵浦光发生能量转移，使信号光从一阶泵浦光中获得转移的能量，以实现对 C+L 波段共 100 路信号光的放大，最终由波分解复用器分离各路信号光以及泵浦光，完成信号光放大过程。

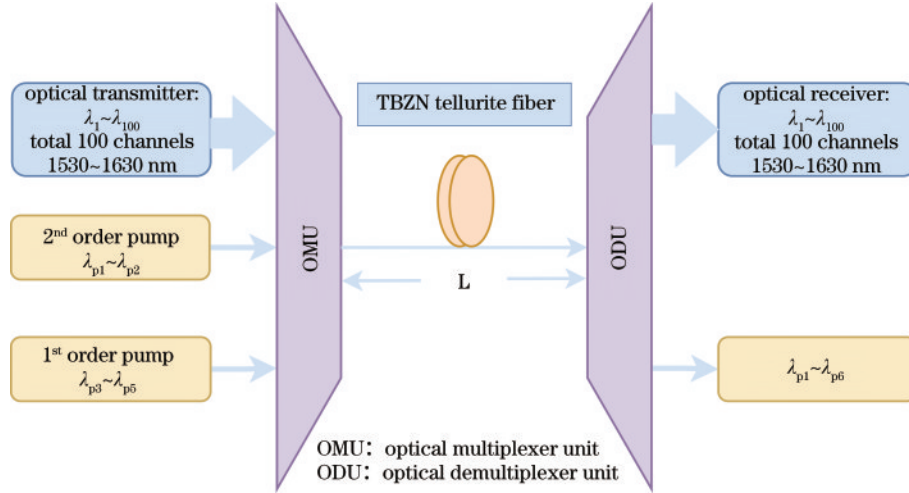


图 1 二阶 T-RFA 结构图

Fig. 1 Structure diagram of second-order T-RFA

3 合作搜索算法

合作搜索算法由 Feng 等^[18]于 2021 年提出，该算法受现代企业团队合作行为的启发所得。该算法具有

鲁棒性强、性能优越等特点，相较于传统放大，收敛速度和搜索精度上都优于几种传统方法^[19]。图 2 为该算法示意图。

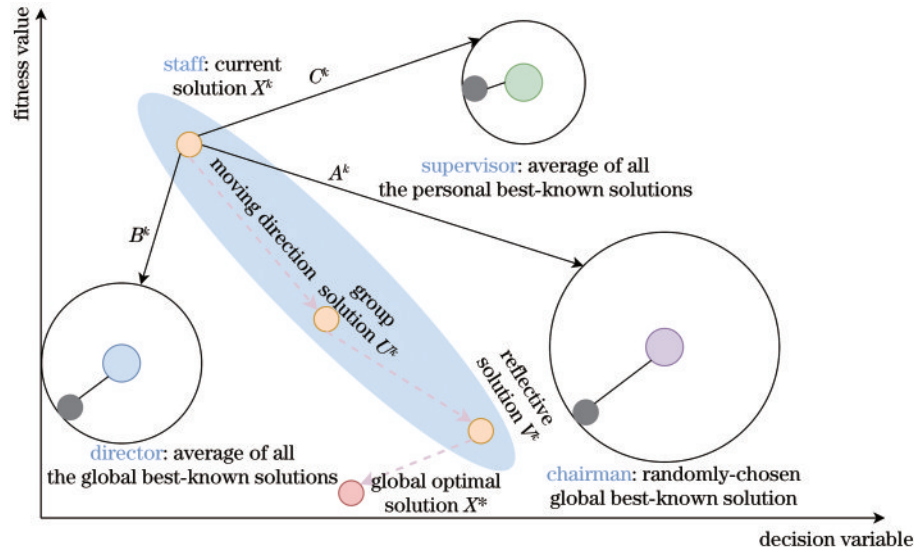


图 2 CSA 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CSA algorithm

根据图 2 中的方法可以有效地提升式 (3) 解空间内所有解的质量，达到近似全局最优解，具体方法如下：

1) 与基于个体的方法相比，CSA 中首先使用了基

于种群的进化机制，进入团队建设阶段，并在搜索空间内生成多个解，如图 2 中 Staff 步骤所示，即生成多个员工充当当前解 X^k ，进而形成初始解空间，这一步可以有效帮助后续最优解的寻找以及跳出局部最优。

2)随后,图 2 中 Staff 种群通过团队沟通阶段随机选择全局最优解 A^k 即为董事长、平均全局最优解 B^k 即为董事会、平均个体最优解 C^k 即为监事会,并通过反思学习阶段的反思学习运算符 V^k 实现全局、局部搜索之间的平衡,这样能有效提高接近全局最优解的概率。

3)进入内部竞争阶段,在内部竞争算子的作用下,将性能较好的解储存,并在进化过程中实现动态更新,这样可以有效保证群体的全局收敛,最终得到全局最优解 X^* 。

3.1 团队建设阶段

在团队建设阶段,团队中的所有员工都是通过下式随机生成,其模拟行为对应于图 2 中的 Staff 步骤。在评估所有解决方案的性能后,将从初始群体中选择 $N \in [1, I]$ 数量的领导者,用于形成外部精英集。

$$x_{i,j}^k = \phi(\underline{x}_j, \bar{x}_j), i \in [1, I], j \in [1, J], k = 1, \quad (4)$$

式中: I 是当前目标函数解空间的维度; $\phi(X, Y)$ 是在 $[X, Y]$ 范围内生成均匀分布随机数的函数; $x_{i,j}^k$ 是第 k 次迭代过程中第 i 个成员的第 j 个位置。

3.2 团队沟通阶段

在团队沟通阶段,每位员工都设定为可以通过与董事长、董事会以及监事会等领导交流信息来获得新的信息,这一行为模拟通过下式表示。团队沟通过程中,主要包括三个部分:董事长的知识内容 A 、董事会的集体知识内容 B 和监事会的集体知识内容 C 。董事长从董事会中随机选出,模拟轮转机制,而董事会和监

事会的所有成员均被赋予了相同的职位。

$$U_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + A_{i,j}^k + B_{i,j}^k + C_{i,j}^k, i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K], \quad (5)$$

$$A_{i,j}^k = \log[1/\phi(0, 1)] \cdot (g_{\text{Best } l, j}^k - x_{i,j}^k), \quad (6)$$

$$B_{i,j}^k = \alpha \cdot \phi(0, 1) \cdot \left[\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M g_{\text{Best } m, j}^k - x_{i,j}^k \right], \quad (7)$$

$$C_{i,j}^k = \beta \cdot \phi(0, 1) \cdot \left[\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I p_{\text{Best } i, j}^k - x_{i,j}^k \right], \quad (8)$$

式中: $U_{i,j}^{k+1}$ 是第 $k+1$ 次迭代中第 i 个成员的第 j 个值; $g_{\text{Best } l, j}^k$ 表示从开始到第 k 次的第 l 个全局最优解的第 j 个值; $g_{\text{Best } m, j}^k$ 表示从开始到第 k 代的第 m 个全局最优解的第 j 个值; $p_{\text{Best } i, j}^k$ 表示第 k 代第 i 个成员最优解的第 j 个值;式(6)中 $A_{i,j}^k$ 表示从式(4)所形成的外部精英集中随机选择的领导获得的知识;式(7)、(8)中 $B_{i,j}^k$ 、 $C_{i,j}^k$ 分别表示到目前迭代为止发现的 m 个全局最优解和 i 个个体最优解中获得的平均知识内容; α 、 β 是调整 $B_{i,j}^k$ 、 $C_{i,j}^k$ 影响程度的学习系数。

3.3 反思学习阶段

在反思学习阶段,群体中其他成员除了向领导者学习外,员工还可以通过总结自己在相反方向上的经验来获得新知识,具体表示为

$$v_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} r_{i,j}^{k+1}, & \text{if } (u_{i,j}^{k+1} \geq c_j) \\ p_{i,j}^{k+1}, & \text{if } (u_{i,j}^{k+1} < c_j) \end{cases}, i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K], \quad (9)$$

$$r_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} \phi(\bar{x}_j + \underline{x}_j - u_{i,j}^{k+1}, c_j), & \text{if } (|u_{i,j}^{k+1} - c_j| < \phi(0, 1) \cdot |\bar{x}_j - \underline{x}_j|) \\ \phi(\underline{x}_j, \bar{x}_j + \underline{x}_j - u_{i,j}^{k+1}), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (10)$$

$$p_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} \phi(c_j, \bar{x}_j + \underline{x}_j - u_{i,j}^{k+1}), & \text{if } (|u_{i,j}^{k+1} - c_j| < \phi(0, 1) \cdot |\bar{x}_j - \underline{x}_j|) \\ \phi(\bar{x}_j + \underline{x}_j - u_{i,j}^{k+1}, \bar{x}_j), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

$$c_j = (\bar{x}_j + \underline{x}_j) \cdot 0.5, \quad (12)$$

式中: $v_{i,j}^{k+1}$ 表示为第 $k+1$ 次迭代时第 i 个反思解的第 j 个值。

$$x_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} u_{i,j}^{k+1}, & \text{if } F(u_{i,j}^{k+1}) \leq F(v_{i,j}^{k+1}) \\ v_{i,j}^{k+1}, & \text{if } F(u_{i,j}^{k+1}) > F(v_{i,j}^{k+1}) \end{cases}, i \in [1, I], j \in [1, J], k \in [1, K], \quad (13)$$

$$x_j = \max \left\{ \min \{ \bar{x}_j, x_j \}, \underline{x}_j \right\}, \quad (14)$$

$$F(x) = f(x) + \sum_{e=1}^E c_e^1 \cdot \max \{ g_e(x), 0 \} + \sum_{j=1}^J c_j^2 \cdot |h_j(x)|, \quad (15)$$

式中: $F(x)$ 是适应度函数值。为了有效实现多重物理

3.4 内部竞争阶段

在内部竞争阶段,团队通过确保所有表现较好的员工都能得到有效保护,逐步提升市场竞争力,这一行为可由下式模拟。

约束,首先通过等式(14)将 x 中的所有变量修改为可行区域,然后使用等式(15)中的惩罚函数方法通过将约束违反的值合并到目标值 $F(x)$ 来获得适应度值 $F(x)$ 。最后,对于可行解,充分满足所有约束,使适应度值等于原始目标值。

4 参数选择与优化结果分析

4.1 参数选择

在对二阶 T-RFA 模型优化之前,需要对合作搜索算法属性参数进行设置,如表 1 所示。二阶 T-RFA 基本参数配置具体如表 2 所示。

表 1 算法属性参数设置

Parameter name	Value
Number of iterations T	500
Dimension of each individual D	12
Number of groups G	100
Alpha	0.1
Beta	0.15

4.2 优化结果分析

在所设置优化区间(表 2),本文采用合作搜索算法对二阶 T-RFA 模型进行了 200 次优化,选取其中 9

表 2 基本优化参数

Table 2 Basic optimization parameters

Parameter name	Value
Wavelength range of second-pump light /nm	$\lambda_1-\lambda_2 \in [1250, 1345]$
Wavelength range of first-pump light /nm	$\lambda_3-\lambda_6 \in [1376, 1500]$
Power range of second-pump light /W	$P_1-P_2 \in [0.45, 0.7]$
Power range of first-pump light /W	$P_3-P_6 \in [0.05, 0.3]$
Fiber length L /m	250
Iterative steps h /m	5
Maximum pump wavelength λ_{\max} /nm	1500
Minimum pump wavelength λ_{\min} /nm	1250
Maximum pump power P_{\max} /W	0.7
Minimum pump power P_{\min} /W	0.05
Wavelength range of signal light λ_i /nm	1530-1630
Signal power P_i /mW	0.01

组优化的数据如表 3 所示,优化结果用 A、B、C、D、E、F、G、H、I 组来表示。

表 3 9 组优化结果对比

Table 3 Comparison of nine group of optimization results

Parameter name	Value								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
λ_1 /nm	1252.9703	1267.1353	1252.4371	1253.7044	1251.9146	1250.2709	1254.6511	1254.8251	1253.9025
λ_2 /nm	1343.5379	1338.7066	1343.6151	1341.1765	1342.3587	1339.8163	1344.3866	1342.9608	1343.5297
λ_3 /nm	1377.6867	1376.3135	1377.9005	1377.8645	1377.6176	1377.5648	1377.9444	1377.6667	1378.0668
λ_4 /nm	1392.6577	1405.2773	1391.6475	1392.1915	1390.8369	1395.3495	1395.3482	1392.6577	1392.1323
λ_5 /nm	1479.7551	1422.0085	1470.6217	1471.3503	1472.2613	1470.7021	1470.6228	1471.9751	1471.2432
λ_6 /nm	1497.5663	1447.3155	1497.4085	1498.1792	1499.1114	1497.8453	1497.3901	1498.8344	1498.0807
P_1 /W	0.4779	0.5249	0.4878	0.6293	0.5295	0.6938	0.5780	0.5819	0.4815
P_2 /W	0.4948	0.5707	0.5022	0.5078	0.4622	0.6849	0.5359	0.4505	0.5601
P_3 /W	0.2499	0.1731	0.2884	0.1953	0.2447	0.1957	0.2665	0.2041	0.2106
P_4 /W	0.1834	0.1824	0.1894	0.1476	0.2147	0.1931	0.1585	0.1572	0.1517
P_5 /W	0.2198	0.0882	0.2202	0.1972	0.2214	0.1428	0.2084	0.2196	0.2059
P_6 /W	0.1008	0.1274	0.1004	0.1094	0.1181	0.0834	0.0866	0.1089	0.1023
$G_{\text{on-off}}$ /dB	25.2601	27.3601	26.4061	25.3198	26.0119	27.8037	26.4181	24.4181	23.9797
ΔG /dB	0.9186	0.6601	0.9772	0.9226	0.9626	1.3693	1.3374	0.8822	0.8575

对比 9 组优化数据,其对应参数的输出增益如图 3 所示。从平均输出开关增益来看,均取得了大于 20 dB 的结果。但可以发现,B 组优化的泵浦参数,在保证二阶 T-RFA 系统平均输出增益高的同时,增益平坦度也足够低,因此得到的输出增益结果最理想。而相较于 F 组,虽然得到了最大的平均输出增益 27.8037 dB,但是由于 F 组二阶泵浦光功率接近于范围上限值,较大的泵浦光功率一方面会提升向信号光以及一阶泵浦光所转移的能量的大小,另一方面也会导致大功率二阶泵浦之间相互作用,造成增益平坦度劣化。

为了进一步分析二阶泵浦对 T-RFA 设计的作用,在上述优化系统的基础上,引入噪声项,并选取表 3 中

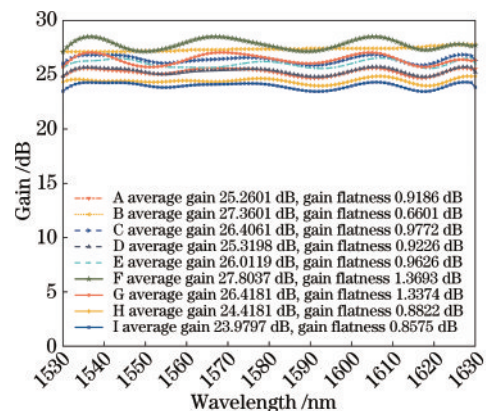


图 3 9 组优化结果的输出增益

Fig. 3 Output gain of nine groups of optimized results

B组数据作为泵浦参数配置,对相同配置下的一阶 T-RFA 以及二阶 T-RFA 对应的输出增益进行对比,如图 4 所示。

由于噪声项的引入,图 4(a)为仅使用 B 组数据中一阶泵浦配置下的一阶 T-RFA 平均输出增益、增益平坦度值分别为 19.3627 dB、11.9512 dB,其中最大输出

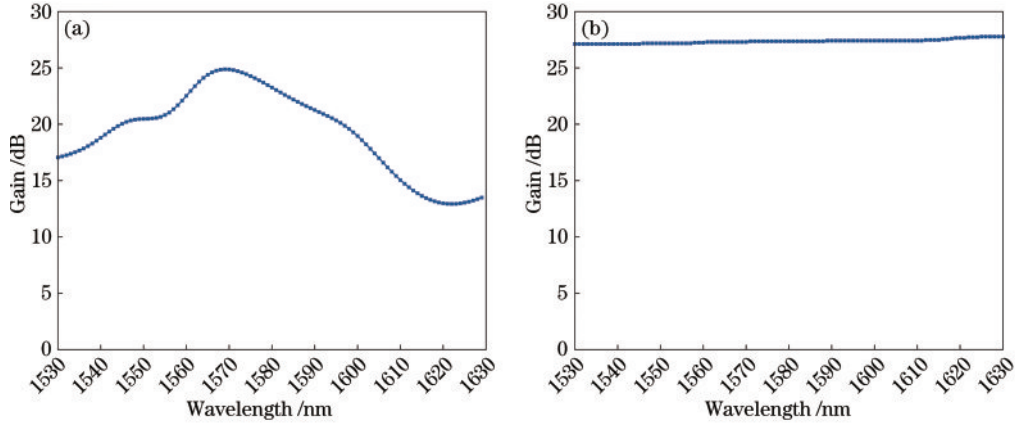


图 4 B 组参数下的输出增益。(a)一阶拉曼光纤放大器;(b)二阶拉曼光纤放大器

Fig. 4 Output gain under the B set of parameters. (a) First-order RFA; (b) second-order RFA

为了进一步分析注入的两路二阶泵浦光对于拉曼光纤放大器放大阶段的作用,将同等参数配置下的一阶

增益值为 24.8781 dB。图 4(b)是在表 3 中 B 组数据泵浦参数配置下,得到的二阶 T-RFA 平均输出增益值为 27.3601 dB,增益平坦度为 0.6601 dB,其中最大输出增益值为 27.7812 dB。对比可见,随着两路高功率二阶泵浦的注入,二阶 T-RFA 系统整体平均输出增益得到了明显提升,并且有效降低了增益平坦度值。

T-RFA 以及二阶 T-RFA 中各路泵浦光功率在长距离碲基光纤中传输时的变化进行仿真,结果如图 5 所示。

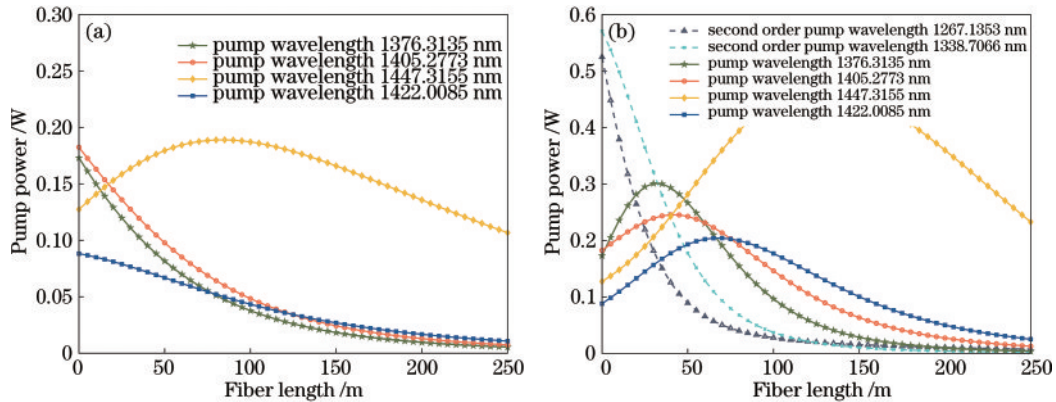


图 5 泵浦光功率随光纤长度的变化。(a)一阶拉曼光纤放大器;(b)二阶拉曼光纤放大器

Fig. 5 Variation of pump power with fiber length. (a) First-order RFA; (b) second-order RFA

对比图 5(a)、(b)可知,引入波长为 1376.3135 nm、1338.7066 nm 的两路二阶泵浦光功率随着光纤长度的增加而出现线性减小,在光纤长度为 250 m 处,两路二阶泵浦光功率几乎耗尽。与图 5(a)相比,波长为 1376.3135、1405.2778、1422.0085 nm 的三路一阶泵浦光对应的光功率不再如图 5(a)中从光纤初始端便开始衰减,而是经过一段距离的传输之后才开始出现衰减的趋势,并且可以观察到四路一阶泵浦光功率的大小随着光纤长度的增加出现先增大后减小的趋势,这是因为新注入的二阶泵浦光与一阶泵浦光在放大过程之中由于相互作用,二阶泵浦光提供给一阶泵浦光能量需要在放大信号光的同时去抵消部分传输中的损耗,因此在一开始短距离传输范围内,四路一阶泵浦光

功率均呈现出上升的现象,然而随着传输距离的不断增长,两路二阶泵浦光功率也随之耗尽,已经无法转移能量给一阶泵浦光,这时由于一阶泵浦光与信号光之间的相互作用,开始将自身能量转移给信号光,最终达到放大信号光的目的,所以此时四路一阶泵浦光功率均开始呈现不同程度的下降趋势,这也同时验证了二阶 RFA 放大理论的正确性。

为了更好地观察泵浦参数优化前后二阶 T-RFA 信号光功率的放大效率随光纤传输长度的变化过程,在表 2 参数配置下,对信号光功率变化进行仿真,如图 6 所示。从图 6(a)、(b)可以看出,优化之后的信号光放大程度更好,且从图 6(b)可以观察到,各路信号光在通过二阶 T-RFA 放大之后,其最终输出功率是初

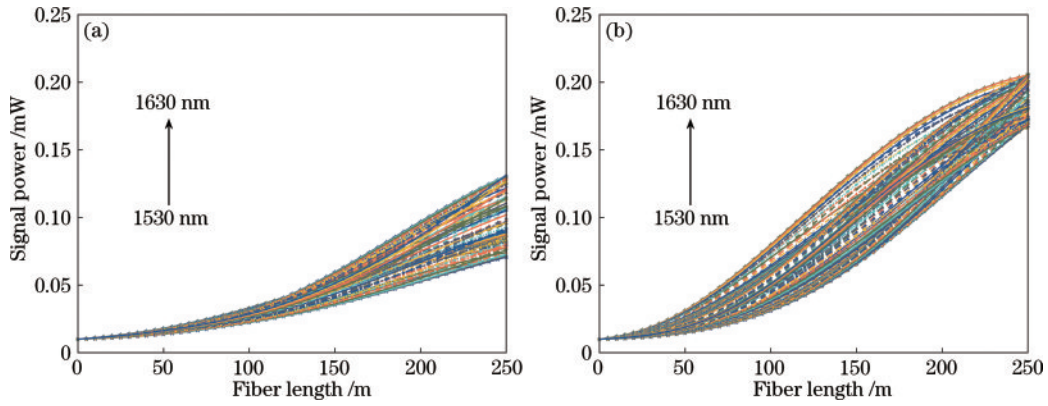


图 6 优化前后 100 路信号光功率随光纤长度的变化。(a) 优化前; (b) 优化后

Fig. 6 Variation of 100-way signal optical power with fiber length before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

始输入功率的 18 倍以上。

而由于信号光在光纤中传输时, 难以避免会产生两种主要的噪声: 自发辐射(ASE)噪声以及双向瑞利散射(DRBS)噪声。为了进一步分析优化过程以及引入二阶泵浦对 T-RFA 噪声的影响, 将同等泵浦配置下二阶 T-RFA 优化前后以及一阶 T-RFA 与二阶 T-RFA 噪声增益进行比较, 如图 7 所示。

由图 7(a)、(b)可知, 二阶 T-RFA 优化前的 ASE、DRBS 噪声平均增益分别为 1.8041 dB、1.8943 dB, 优

化后噪声增益分别为 1.5129 dB、1.1338 dB。对比可见, 经过合作搜索算法优化后, 系统噪声性能也得到了有效提升。由图 7(c)、(d)可知, 一阶 T-RFA 的 ASE、DRBS 噪声平均增益分别为 2.0129 dB、1.1095 dB, 二阶 T-RFA 的 ASE、DRBS 平均噪声增益分别为 1.5221 dB、0.8651 dB, 可以看出在引入了二级泵浦光之后, 二阶 T-RFA 的 ASE、DRBS 噪声平均增益分别下降了 0.4908 dB、0.2444 dB, 证明了引入二阶泵浦光后, RFA 系统中的噪声增益得到了有效降低。

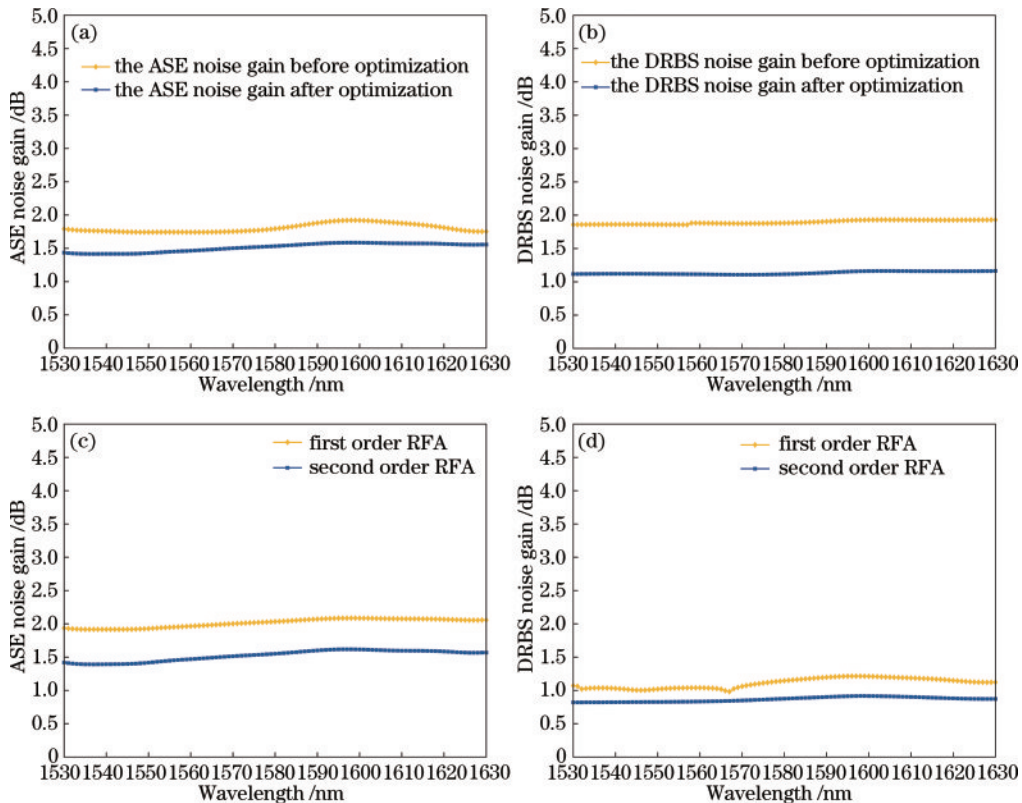


图 7 优化前后以及不同阶 T-RFA 噪声增益变化。(a)(b) 优化前后 ASE、DRBS 噪声增益; (c)(d) 一阶 T-RFA 和二阶 T-RFA 的 ASE、DRBS 噪声增益

Fig. 7 Changes in noise gain before and after optimization and at different orders of T-RFA. (a)(b) ASE and DRBS noise gain before and after optimization; (c)(d) ASE and DRBS noise gain of first-order T-RFA and second-order T-RFA

4.3 二阶 T-RFA 的影响因素分析

由于在 RFA 的设计过程中, 光纤的长度决定了注入的泵浦光与信号光之间相互作用的程度, 如果光纤长度设置得不合理, 可能会出现传输损耗大、信号光从泵浦光上得到的能量不足等问题, 导致部分信号光无法被充分放大。因此, 为了更直观地观察光纤长度对二阶 T-RFA 的影响, 在其他参数配置如表 3 中 B 组数据的情况下, 将光纤长度设置为 1000 m, 得到二阶 T-RFA 的平均输出增益和增益平坦度随光纤长度变化如图 8 所示。

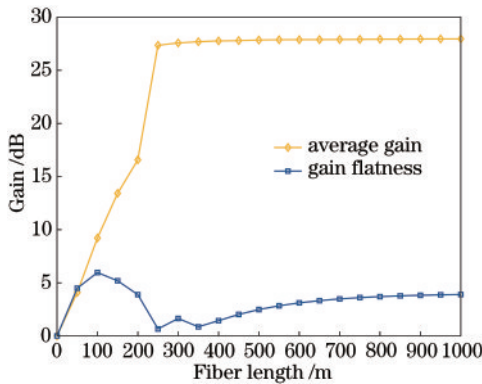


图 8 平均增益和增益平坦度随光纤长度的变化
Fig. 8 Variation of average gain and gain flatness with fiber length

可以看出, 随着光纤长度的增加, 在 0~250 m 范围内, 平均输出增益急剧上升, 而增益平坦度值先上升后下降的现象, 这是因为各路信号光在光纤长度较短时具有不同的放大程度, 很难在传输过程中收敛。因此, 在光纤长度为 0~200 m 的光纤长度范围内, 增益平坦度性能较差, 而随着光纤长度的增加, 在光纤长度为 250 m 处, 信号光在泵浦光的作用下逐步实现均匀放大, 如图 6(b) 所示, 在 250 m 处收敛, 此时信号光平均输出增益值达到平稳点, 且得到最小的增益平坦度值为 0.6601 dB。但随着光纤长度的不断增加, 信

号光在光纤中的损耗也会不断增加, 随后各路信号光功率会呈发散状, 导致增益平坦度的再次劣化, 而每路信号光所获得的能量与克服损耗的能量几乎相同, 从而使得增益平坦度趋于平缓。

由此可见, 光纤长度的配置存在着一个饱和值, 在长度达到该饱和值之后, RFA 系统的平均增益和增益平坦度都只会出现微小的变化, 因此, 本文对于所设计的二阶 T-RFA 光纤长度设置为 250 m, 不仅能保证较高的平均输出增益, 取得较低的增益平坦度, 还能有效减少成本以及资源。

由于二阶 T-RFA 的放大机理决定了二阶泵浦光将作为整个二阶 T-RFA 系统的主要能量来源, 影响着信号光输出增益的特性的优劣, 因此二阶泵浦光配置至关重要, 为了进一步分析二阶泵浦光对二阶 T-RFA 的影响, 将两路二阶泵浦光功率范围设置为 0~0.7 W, 其他基本参数设置不变, 此时的平均输出增益和增益平坦度变化过程如图 9 所示。

从图 9(a) 可以看到, 二阶 T-RFA 的平均输出增益几乎呈现出线性变化, 在不考虑二阶 T-RFA 系统增益平坦度的情况下, 将两路泵浦光功率设置为 0.7 W 时, 取得平均输出增益最大值为 28.7241 dB。但是, 实际设计中不能通过盲目增加泵浦光功率来提升放大器的输出增益, 如图 9(b) 所示: 当第一路二阶泵浦光功率设置为 0.7 W, 第二路二阶泵浦光功率设置为 0 时, 增益平坦度值为 3.0798 dB; 当第一路二阶泵浦光功率设置为 0 W, 第二路二阶泵浦光功率设置为 0.7 W 时, 得到最大增益平坦度值为 11.8761 dB。可见上述两种泵浦光功率设置下增益平坦度值相差较大, 依据表 3 中 9 组优化结果可知, 两路二阶泵浦光之间均存在着较大的频率差, 频率较高的二阶泵浦光会造成释放的能量剧增, 同样加剧二阶泵浦光之间的能量转移, 最终导致增益平坦度的急剧劣化。当高频二阶泵浦光功率接近 0.7 W 时, 增益平坦度值会剧增; 当高频二阶泵浦光功率接近 0 W 时, 两者之间的相互作用削减。其

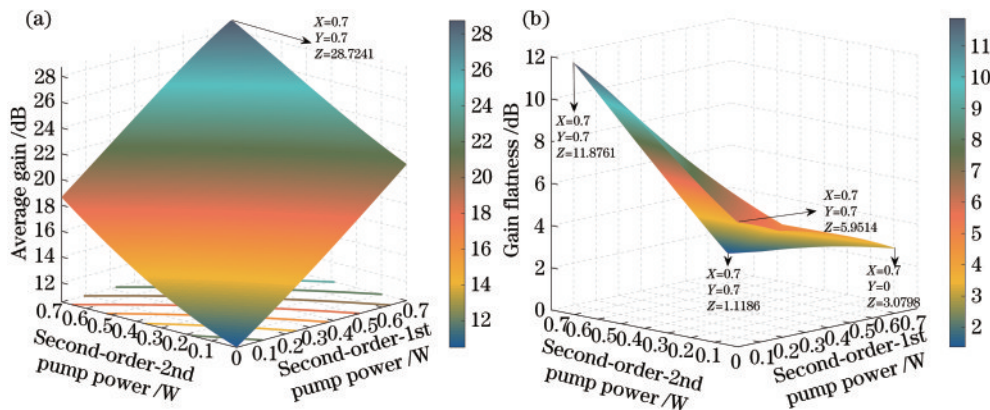


图 9 平均输出增益和增益平坦度随二阶泵浦光功率变化的变化。(a) 平均输出增益的变化; (b) 增益平坦度的变化

Fig. 9 Variation of the average output gain and gain flatness with second-order pump optical power. (a) Variation of the average output gain; (b) variation of the gain flatness

次,由于两种泵浦配置不同,其具有的增益系数、衰减系数均不同,综合上述原因,便会出现两种不同二阶泵浦功率配置下增益平坦度值出现差异巨大的现象。当把两路二阶泵浦光功率同时设置为 0 W、0.7 W 时,增益平坦度分别为 5.9514 dB、1.1186 dB。将第一路二阶泵浦光功率设置为 0 W,第二路泵浦光功率在 0~0.7 W 范围内递增,此时增益平坦度的变化趋势为逐步增大;将第二路二阶泵浦光功率设置为 0 W,第一路泵浦光功率在 0~0.7 W 范围内递增,此时增益平坦度的变化趋势是先下降再上升。

通过上述分析可知,二阶泵浦光功率的变化虽然与平均输出增益的变化成正比,但是这种增长并不是无限,它存在着一个最佳的泵浦功率取值范围,较低功率的二阶泵浦光无法给一阶泵浦光提供足够能量,而过高功率的二阶泵浦光之间也存在相互作用,致使输出增益劣化,由此可见,泵浦光功率的选取对于 RFA 性能至关重要。而在设计二阶 T-RFA 时也应该综合地考虑两个重要的指标,即平均输出增益、增益平坦度,在二阶 T-RFA 系统实现超高增益的同时保证增益均衡。

5 结 论

本文采用合作搜索算法优化设计了一款高增益、宽带宽、低增益平坦度的长距离传输的二阶 T-RFA,通过改变传输介质长度以及两路二阶泵浦光功率,分析其对所设计的二阶 T-RFA 系统平均输出增益以及对应的增益平坦度性能的影响。最终设计出的二阶 T-RFA 实现了在 C+L 波段共 100 路超宽增益频谱范围内得到平均输出增益、增益平坦度值分别为 27.3601 dB、0.6601 dB,最高输出增益为 27.7812 dB。通过对比验证了合作搜索算法对二阶 T-RFA 模型优化的有效性,与传统设计方案通过工程应用经验相比,系统性能大幅提升。同时,通过分析一阶 T-RFA 与二阶 T-RFA 输出增益以及噪声增益变化,得出二阶 T-RFA 能有效降低噪声带来的影响。与现有的设计方案相比,本文设计的二阶 T-RFA 不仅实现了超大带宽范围的平坦增益输出,而且得到了较高输出增益,为未来 6G 全光网络通过 RFA 在超远距离范围内提升系统容量和优化系统性能提供了参考与设计方案。

参 考 文 献

- [1] Duan X D, Sun T, Liu C, et al. Cognitive intelligence based 6G distributed network architecture[J]. *China Communications*, 2022, 19(6): 137-153.
- [2] Bhat J R, Alqahtani S A. 6G ecosystem: current status and future perspective[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 43134-43167.
- [3] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228.
- [4] Zhao J, Du J B, Yue Y, et al. Special issue on advanced technique and future perspective for next generation optical fiber communications[J]. *Photonics*, 2022, 9(5): 280.
- [5] Zhao Z P, Zhao Y L, Ma H L, et al. Cost-efficient routing, modulation, wavelength and port assignment using reinforcement learning in optical transport networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 64: 102571.
- [6] 杨海林, 刘丽娟, 彭迪, 等. 光纤信能共传技术研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1100001. Yang H L, Liu L J, Peng D, et al. Research progress of power-over-fiber technique applied to radio-over-fiber systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1100001.
- [7] Li X, Guo B L, Wang D J, et al. Core function prepositioning for point-to-point service slicing in large-scale optical networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(18): 1054-1057.
- [8] 巩稼民, 朱泽昊, 雷舒陶, 等. 利用免疫算法优化设计的宽带大增益拉曼光纤放大器[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 399-406. Gong J M, Zhu Z H, Lei S T, et al. Broadband high gain Raman Fiber Amplifier optimized by immune algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 399-406.
- [9] Istianing D K, Heryana A, Syahriar A. Characteristics of Raman amplifiers in fiber optic communication systems [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1454(1): 230-233.
- [10] Islam M N. Raman amplifiers for telecommunications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(3): 548-559.
- [11] 巩稼民, 刘芳, 吴艺杰, 等. 基于神经网络和人工蜂群算法的拉曼光纤放大器设计方案[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2006002. Gong J M, Liu F, Wu Y J, et al. Design of Raman fiber amplifier based on neural network and artificial bee colony algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2006002.
- [12] Rapp L. Performance limits of unrepeated systems using higher-order codirectional Raman pumping[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2013, 67(7): 616-623.
- [13] Tan M, Rosa P, Le S T, et al. Transmission performance improvement using random DFB laser based Raman amplification and bidirectional second-order pumping[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2215-2221.
- [14] Li J X, Du J B, Ma L, et al. Second-order few-mode Raman amplifier for mode-division multiplexed optical communication systems[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 810-820.
- [15] Ali M H, Ali A H, Abdulsatar S M, et al. Pump power optimization for hybrid fiber amplifier utilizing second order stimulated Raman scattering[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(6): 274.
- [16] 巩稼民, 张玉蓉, 徐军华, 等. 二阶拉曼光纤放大器增益特性研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(8): 0806001. Gong J M, Zhang Y R, Xu J H, et al. Research on gain

- characteristics of second-order Raman fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0806001.
- [17] 王泽锋, 黄威, 李智贤, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望(I): 基于受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401008.
- Wang Z F, Huang W, Li Z X, et al. Progress and prospects of fiber gas laser sources (I): based on stimulated Raman scattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401008.
- [18] Feng Z K, Niu W J, Liu S. Cooperation search algorithm: a novel metaheuristic evolutionary intelligence algorithm for numerical optimization and engineering optimization problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 98: 106734.
- [19] Niu W J, Feng Z K, Li Y R, et al. Cooperation search algorithm for power generation production operation optimization of cascade hydropower reservoirs[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(8): 2465-2485.