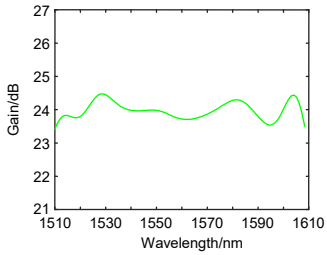
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Article
2020 年，第 47 卷，第 11 期

DOI: 10.12086/oee.2020.190747

基于粒子群优化的二阶拉曼光纤放大器研究



巩稼民，张　晨*，郝倩文，张丽红，王　杰

西安邮电大学电子工程学院，陕西 西安 710121

摘要：为了进一步提升二阶拉曼光纤放大器(RFA)的性能指标，对二阶 RFA 的主要参数进行了分析。首先设计了一个可以通过光开关控制，在二阶和一阶 RFA 两种模式下切换的结构模型，通过模拟仿真证明了二阶 RFA 可以提高系统的增益，改善系统的噪声性能，然后针对二阶 RFA 的增益性能进行了优化，以降低平坦度为优化目标，使用粒子群算法优化泵浦光波长和功率的配置，再经过结构的改进，最终在 100 nm 带宽范围内实现了增益为 24.50 dB，增益平坦度为 0.98 dB 的二阶 RFA。这些结果为以后设计出性能更加完善的二阶 RFA 提供了参考。

关键词：拉曼光纤放大器；二阶泵浦；增益；平坦度；粒子群算法

中图分类号：TN722；TP18　　**文献标志码：**A

引用格式：巩稼民，张晨，郝倩文，等. 基于粒子群优化的二阶拉曼光纤放大器研究[J]. 光电工程，2020，**47**(11): 190747

Research on second-order Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization

Gong Jiamin, Zhang Chen*, Hao Qianwen, Zhang Lihong, Wang Jie

School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract: In order to further improve the performance index of second-order Raman fiber amplifier, the main parameters of second-order RFA were analyzed. First, a structural model that can be controlled by optical switches and switched between two modes of traditional second-order and traditional first-order RFA is designed. It is proved through simulation that second-order RFA can increase the system gain and improve noise performance. The gain performance of first-order RFA is optimized. The optimization goal is to reduce the flatness. The particle swarm optimization algorithm is used to optimize the configuration of the wavelength and power of the pump light. After further structural improvement, a second-order RFA with a gain of 24.50 dB and a gain flatness of 0.98 dB were achieved in a 100 nm bandwidth. These results provide a reference for the design of second-order RFA with better performance in the future.

Keywords: Raman fiber amplifier; second-order pump; gain; flatness; particle swarm optimization

Citation: Gong J M, Zhang C, Hao Q W, *et al.* Research on second-order Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(11): 190747

收稿日期：2019-12-23；　收到修改稿日期：2020-03-02

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61775180)；西安邮电大学研究生创新基金项目(CXJJLY2019052)

作者简介：巩稼民(1962-)，男，博士，教授，主要从事光通信方向的研究。E-mail：gjm@xupt.edu.cn

通信作者：张晨(1996-)，女，硕士研究生，主要从事光通信方向的研究。E-mail：973172298@qq.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

1 引 言

由于波分复用传输系统的广泛应用，对宽带宽、高增益、低平坦度的光放大器的需求迅速增长。和掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier，EDFA)相比，分布式光纤拉曼放大器(distributed fiber Raman amplifier，DFRA)是近年来超大容量、超长距离的光传输应用首选[1-3]。拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier，RFA)[4]是能在任何通信频带中工作的基本放大器，在光纤中不需要特殊掺杂就可以利用拉曼散射产生放大。常规一阶泵浦结构通常用于 DFRA 中，因为它能抑制泵浦信号的相对强度噪声。近年来，DFRA 的双向和高阶泵浦结构已经得到了广泛的应用，用于提高 DFRA 性能。在高阶泵浦中，二阶泵浦应用比较多。在提高光信噪比(optical signal to noise ratio，OSNR)和改善光纤拉曼放大器的有效噪声系数方面，二阶非常有利[5]。二阶泵浦可以产生平坦的功率分布和较低的放大自发辐射。此外，在控制非线性的情况下，二阶泵浦结构通过调整一、二阶泵浦功率比，可以改善有效噪声系数，增加带宽范围[6]。虽然二阶泵浦源所需功率很大，但是短波长的泵浦源更容易实现大功率，所以二阶光纤拉曼放大器具有很高的实用价值。

如何增加 RFA 的输出带宽和减小它的增益平坦度，是目前放大器所要解决的重要问题。本文采用二阶前向多波长泵浦的 RFA 以提高系统的增益，降低平坦度和拓展带宽。因为采用不同波长的泵浦光，可以放大不同波长的信号光，在多个信号波长位置产生的多个增益谱进行叠加就会使增益变得平坦，而且拉曼增益谱交错排布又可以提升带宽。设置泵浦光的参数时，除了根据相关泵浦规律去设定外，采用粒子群算法对一阶泵浦光、二阶泵浦光的参数同时进行优化，使一阶、二阶泵浦光相互作用来实现多泵浦技术进而去降低平坦度，提高二阶 RFA 的性能指标。

2 理论模型及设计原理

2.1 二阶 RFA 的原理

拉曼光纤放大器是以光纤中受激拉曼散射(SRS)[7]为理论基础来实现的，SRS 是泵浦光和信号光在相互作用的过程中产生的一种非线性效应。当低频弱信号光和高频强泵浦光在同一根光纤中传输时，若低频弱信号光刚好在高频强泵浦光的放大范围内，也就是刚好相差一个拉曼频移，则高频强泵浦光会将自身能量传递给低频弱信号光以实现对它的放大。传统的一阶 RFA 只经过一次拉曼放大，而二阶 RFA 需要经过两次拉曼放大。二阶 RFA 是在一阶 RFA 的基础上，增加了与一阶泵浦光相差一个拉曼频移的二阶泵浦，原来的一阶泵浦在二阶泵浦的放大带宽内，先被二阶泵浦放大，然后充当新的泵浦源，去泵浦与它相差一个拉曼频移的信号光，这就是二阶拉曼效应的放大过程。

2.2 理论模型

拉曼光纤放大器的物理放大过程十分复杂，涉及色散和损耗特性以及非线性等因素，在 Kidorf 等给出的耦合方程的基础上，本文主要考虑的是光纤的损耗问题和不同信道的光之间的拉曼散射效应，忽略了其它影响因素，将拉曼耦合波方程简化为[8]

$$\pm\frac{\mathrm{d}P_j}{\mathrm{d}z}=\sum_{\nu_i>\nu_j}\frac{g_{\mathrm{R}}(\nu_i-\nu_j)}{K_{\mathrm{eff}}A_{\mathrm{eff}}}P_iP_j-\sum_{\nu_k<\nu_j}\frac{\nu_j}{\nu_k}\frac{g_{\mathrm{R}}(\nu_j-\nu_k)}{K_{\mathrm{eff}}A_{\mathrm{eff}}}P_iP_k-\alpha_jP_j(j=1,2,...,N)\ ,\quad(1)$$

式中：P_i、P_j、P_k 分别对应第 i，j，k 信道的光功率，ν_i、ν_j、ν_k 对应 i，j，k 信道的光频率，N 为泵浦光和信号光的信道数量和，$g_{\mathrm{R}}(\nu_i-\nu_j)$ 为 i、j 两路信号光之间的拉曼增益系数，$g_{\mathrm{R}}(\nu_j-\nu_k)$ 为 j、k 两路信号光之间的拉曼增益系数，z 为传输距离，α 是衰减系数，A_{eff} 为光纤有效面积，通常分析中，偏振相关因子 K_{eff}=2。对于前向泵浦的拉曼耦合波方程，式(1)取“+”号，本文将利用四阶龙格－库塔法对式(1)数值求解。

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{ASE},j}}{\mathrm{d}z}=-\alpha_jP_{\mathrm{ASE},j}+\sum_{\nu_k>\nu_j}g_{jk}P_{\mathrm{ASE},j}P_k-\sum_{\nu_k<\nu_j}\frac{\nu_j}{\nu_k}g_{jk}P_{\mathrm{ASE},j}P_k+\sum_{\nu_k>\nu_j}g_{jk}P_kh\nu_j\Delta\nu F_{jk}-\sum_{\nu_k<\nu_j}g_{jk}P_kh\nu_j\Delta\nu F_{jk}\ ,$$

$$F_{jk}=\begin{cases}N_{\mathrm{phon}}+1,\nu_k>\nu_j\\-N_{\mathrm{phon}},\quad\nu_k<\nu_j\end{cases},\quad N_{\mathrm{phon}}=\frac{1}{\mathrm{e}^{h\Delta\nu/k_{\mathrm{B}}T}-1}\ 。\quad(2)$$

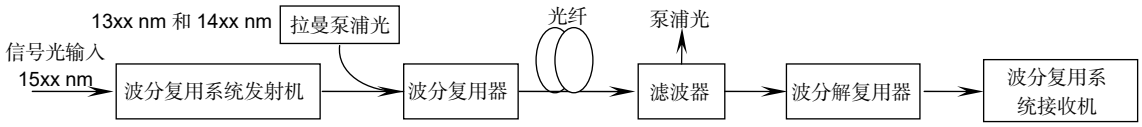


图 1 二阶前向 RFA 结构图

Fig. 1 Structure of second-order forward RFA

在多泵浦前向光纤拉曼放大器中，自发辐射噪声(ASE)耦合方程可以用上式来描述，考虑的是泵浦到泵浦，泵浦到信号和信号对信号的自发拉曼散射，其中 $P_{ASE,j}$ 表示第 j 个信道的 ASE 噪声功率，g_{jk} 表示第 j 信道到第 k 信道的拉曼增益系数，h 为普克朗常数，F_{jk} 为温度依赖因子，N_{phon} 为 ASE 噪声光子数，k_B 为玻尔兹曼常量，T 为光纤中的绝对温度。

2.3 结构设计

目前光通信系统使用的低损耗窗口大部分为 1.5 μm 左右。要放大 1.5 μm 的信号光，则需要与信号光相差一个拉曼频移的一阶泵浦光，即波长在 1.4 μm 左右。而一阶泵浦光充当种子光，又需要与它再相差一个拉曼频移的泵浦光才能将其放大，所以二阶泵浦光波长范围为 1.3 μm 左右。

本文采用的是二阶前向泵浦结构，将二阶泵浦光和一阶泵浦光同时从前向输入，在波分复用器的作用下与输入的信号光一同从光纤输入端进入，信号光经过 SRS 效应被拉曼放大，然后经滤波器将一阶、二阶泵浦光滤除，剩下的信号光被波分复用系统接收机接收。前向泵浦时，无论是信号放大还是 ASE 噪声放大都离光纤输出端较远，这就让被放大的 ASE 噪声还有时间在光纤传输时被逐渐衰减，所以前向泵浦 RFA 具备降低了 ASE 噪声的优点。

3 粒子群优化算法

粒子群算法[9-12]是从鸟群觅食行为得到启发，经过建模仿真，提出的一种随机搜索算法，能解决复杂的优化问题。与遗传算法相比，它在包含“种群”和“进化”的同时，舍去了遗传算法中对个体进行较为复杂的交叉和变异，将每个个体当做一个粒子，在搜索空间中进行搜索，然后在运动过程中不断更新每一个粒子的最佳位置和整个粒子群目前搜索到的最佳位置。粒子群算法适合于求解非线性微分方程，而拉曼耦合方程属于非线性微分方程，所以粒子群算法对拉曼放大器的优化求解具有很强的适用性。

假设一个群落的粒子总数为 N，在一个 D 维的搜索空间中，那么它的第 i 个粒子，可以用 D 维向量表示出位置信息[13]：

$$\boldsymbol{X}_i=(x_{i1},x_{i2},...,x_{iD}),\ i=1,2,...,M \quad 。 \tag{3}$$

同理可得，每个粒子的速度信息也可由一个 D 维向量表示：

$$\boldsymbol{V}_i=(v_{i1},v_{i2},...,v_{iD}),i=1,2,...,M \quad 。 \tag{4}$$

在运动过程中，第 i 个粒子在每个维度上的最优位置，也就是该粒子的个体极值为

$$P_{best}=(p_{i1},p_{i2},...,p_{iD}),\ i=1,2,...,M \quad 。 \tag{5}$$

同理，整个粒子群目前的最优位置，也就是全局最优解可表示为

$$g_{best}=(g_1,g_2,...,g_D) \quad 。 \tag{6}$$

将式(5)、式(6)代入式(7)中，更新粒子的速度和位置为

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1)=v_{ij}(t)+c_1r_1(t)[p_{ij}(t)-x_{ij}(t)] \\ \qquad\qquad +c_2r_2(t)[g_j(t)-x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+v_{ij}(t+1) \end{cases} , \tag{7}$$

式中：$x_{ij}(t)$和 $v_{ij}(t)$分别为第 t 次迭代时，第 i 个粒子在第 j 个维度下的位置和速度，c_1 和 c_2 是学习因子，一般取 $c_1=c_2=1$，r_1 和 r_2 是在[0，1]范围内的随机数。

粒子群算法进行优化求解的过程如下：首先将目标粒子群初始化，将每一个粒子的适应度计算出来，与粒子已经搜索出来的个体极值相比较，取大值作为新的个体极值；再将全部粒子的最佳适应度值与整个粒子群先前搜索到的全局极值对照，取大值为新的全局极值，通过每一次迭代后计算出来的适应度值与两个极值比较，不断的去更新这两个极值，最后判断能否达到所设的终止条件，如能达到，则停止迭代获得最终优化结果，否则继续优化。

4 仿真及优化结果分析

4.1 仿真结果分析

首先，在二阶 RFA 结构的基础上，设计出一个可以通过光开关控制，在二阶和传统一阶 RFA 两种模式下切换的结构。如图 2，第一种模式，波分复用系统发射机输出 80 路信号光与四路一阶泵浦光通过波分复用器耦合进入 30 km 的石英光纤，一阶 RFA 的泵浦光 λ_{p1}~λ_{p4} 波长为 1405 nm、1420 nm、1439 nm、1495 nm，对应功率为 1140 mW、157 mW、179 mW、120 mW；第二种模式，80 路信号光与两路二阶泵浦光、四路一阶泵浦光经过波分复用器耦合，二阶 RFA 的泵浦光 λ_{p1}~λ_{p6} 波长配置为 1325 nm、1342 nm、1405 nm、1420 nm、1439 nm、1495 nm，对应功率为 1168 mW、460 mW、335 mW、157 mW、179 mW、120 mW。二阶泵浦光的损耗系数取 0.2 dB/km，一阶泵浦光的损耗系数取 0.23 dB/km，信号光的损耗系数取 0.19 dB/km。

根据以上参数，仿真得到的 ASE 噪声的信噪比和噪声指数曲线如图 3。

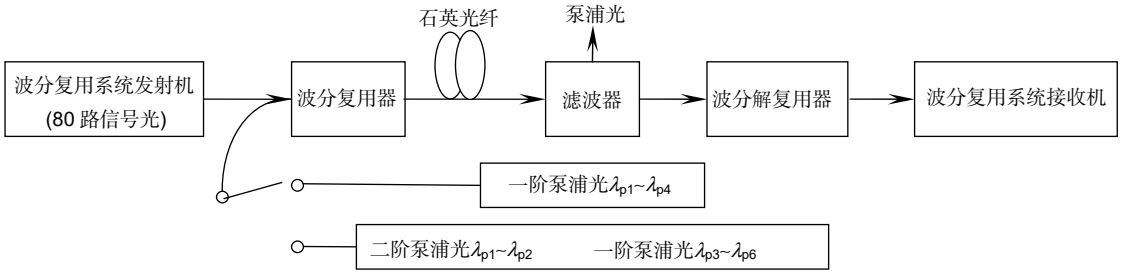


图 2 二阶/一阶 RFA 的结构图

Fig. 2 Structure of second-order/first order RFA

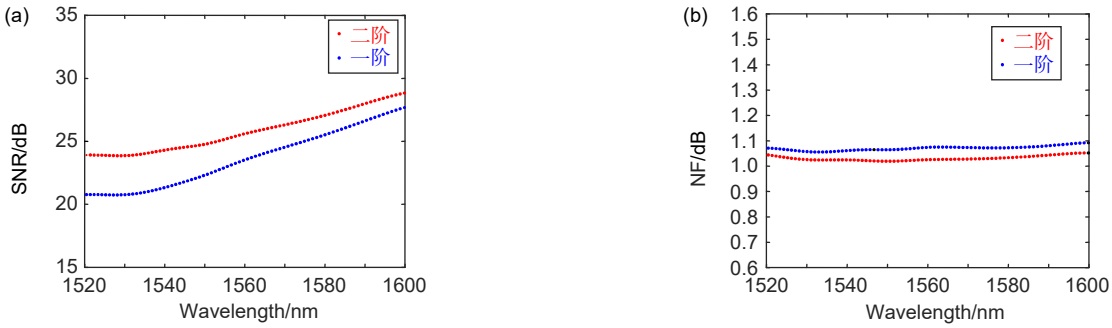


图 3 不同阶 RFA 的信噪比和噪声指数图。(a) 信噪比; (b) 噪声指数

Fig. 3 SNR and NF of RFA of different orders. (a) SNR; (b) NF

RFA 是基于 SRS 效应，但在信号光被泵浦光放大的过程中，也伴随着自发拉曼散射效应，虽然与 SRS 相比，其产生的散射光很微弱，但也会被 RFA 进行放大进而产生噪声，这种噪声被称为 ASE 噪声。衡量一个 RFA 的噪声性能好坏的关键就在于它的信噪比和噪声指数，如果一个 RFA 信噪比很大，它的噪声指数也很大，这个 RFA 的噪声性能依然很差。从图 3 可以看出，与一阶 RFA 相比，二阶 RFA 的信噪比得到了提高，而噪声指数得到了降低，所以二阶 RFA 与一阶 RFA 相比，噪声性能得到了提升。

根据以上参数，对信号光在整段光纤中传输的功率进行分析，图 4 给出了两种结构方案下的信号光功率分布，信号光有 80 路，曲线从下到上信号光波长为 1520 nm~1600 nm。从信号光功率随光纤长度的变化曲线可以看出，无论一阶还是二阶，在 0~15 km 的光纤范围内，信号光都有不同程度的增加，在 15 km~30 km 光纤长度范围内，信号光增加的幅度或急或缓，最终汇聚在一个小范围内。二阶 RFA 与一阶 RFA 相比，有二阶泵浦为一阶泵浦补充能量，所以二阶 RFA 作用下的信号光功率大于一阶 RFA。从图中也可以看出，二阶 RFA 的信号功率分布要比一阶的更均匀，信号功率分布越均匀，放大器的噪声性能越好，所以二阶 RFA 的噪声性能优于一阶，这与图 3 结论一致。

根据以上参数，仿真得到的增益曲线图如图 5 所示。可以明显看到，与传统一阶 RFA 相比，二阶 RFA 的最大增益提高了约 5.45 dB。

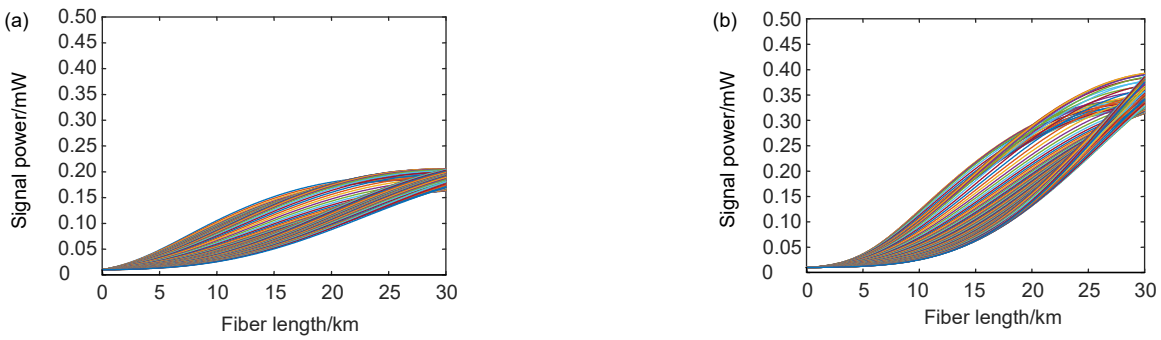


图 4 不同阶 RFA 的信号光功率随光纤长度的分布。(a) 一阶 RFA; (b) 二阶 RFA

Fig. 4 Distribution of signal optical power of different order RFA with fiber length. (a) First-order RFA; (b) Second-order RFA

由图 5(a)看出，在 80 nm 带宽内，通过四路一阶泵浦光实现了一个最大增益为 20.35 dB，增益平坦度为 1.19 dB 的一阶多泵浦。由图 5(b)可以看出，在 80 nm 带宽内，通过设定的参数实现了一个最大增益为 25.8 dB 的二阶多泵浦 RFA。虽然二阶输出增益很高，但是在 80 nm 带宽内，增益平坦度有 2.5 dB。从图 6(b)可以看出，由于 1495 nm 的一阶泵浦光功率增幅太大而导致四路一阶泵浦光产生的增益叠加不能输出较为平坦的增益曲线，所以二阶 RFA 的增益平坦度很大。

以上参数是凭借工程经验所设置的，虽然二阶 RFA 的增益很高，但没有很好的利用二阶泵浦光与一阶泵浦光之间的关系来实现多泵浦技术进而降低增益平坦度。适当选择泵浦个数、功率和波长可以提高二阶 RFA 的增益平坦度。然而，大量变量手动调整非常耗时且不切实际的，为了克服这一限制，采用粒子群算法来寻找最优的二阶多泵浦配置方案。

4.2 优化结果分析

本文运行了四次优化算法，第 1 次优化与上文提到的二阶 RFA 结构相同，目的是通过优化其功率和波长的配置，降低平坦度，第 2、3、4 次优化为了分析泵浦光个数对增益性能的影响。设置的搜索范围为二阶波长范围 1300 nm~1350 nm，功率 0~1.5 W；一阶波长范围 1400 nm~1495 nm，功率 0~0.5 W；信号光波长范围 1510 nm~1610 nm，信号光初始功率 0.01 mW；拉曼光纤长度 30 km。通过数据的总结和比较给出了每次优化的最佳结果如表 1 所示。

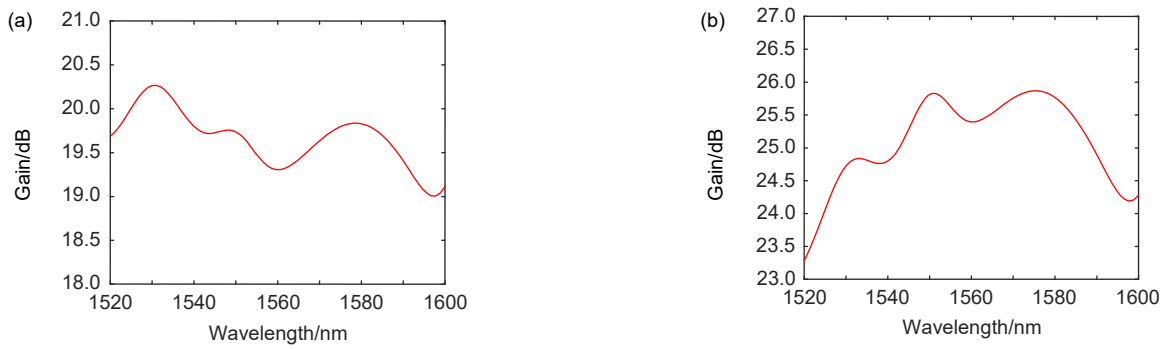


图 5 不同阶 RFA 的增益曲线。(a) 一阶 RFA; (b) 二阶 RFA

Fig. 5 Gain curves of RFA of different orders. (a) First-order RFA; (b) Second-order RFA

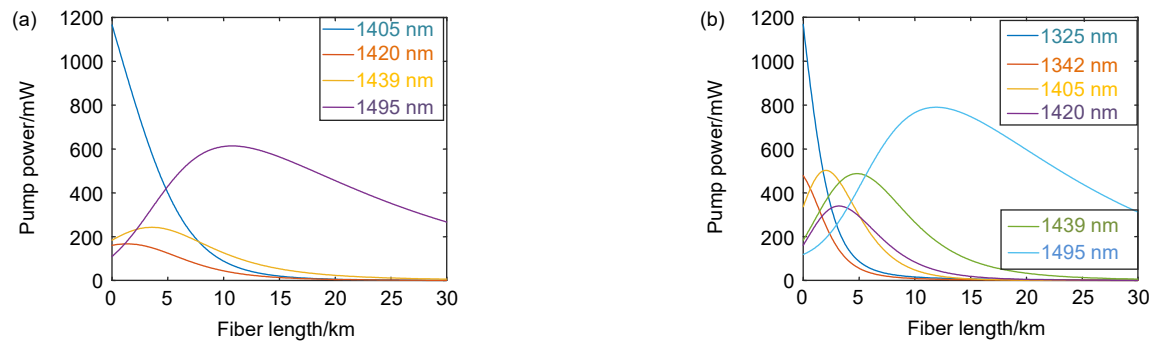


图 6 不同阶 RFA 的泵浦光功率随光纤长度的分布。(a) 一阶 RFA; (b) 二阶 RFA

Fig. 6 Distribution of pump optical power of different order RFA with fiber length. (a) First-order RFA; (b) Second-order RFA

表 1 优化结果

Table 1 Optimization results

No.	Gain/dB	⊿/dB	2nd-order pumps		1st-order pumps	
			λ/nm	P/mW	λ/nm	P/mW
A	24.56	1.20	1319/1323	952/866	1405/1418/1449/1490	320/222/31/98
B	24.61	1.25	1311	1830	1408/1421/1476/1488	337/257/32/95
C	24.50	0.98	1304	1821	1406/1419/1441/1465/1491	410/201/48/35/91
D	24.75	2.73	1317	1849	1415/1452/1483	487/43/135

根据表 1 数据，仿真得到的增益曲线图如图 7。

图 7 中 4 组数据配置下的二阶 RFA 增益图与图 5(a)中一阶 RFA 增益图相比，很直观地看出二阶泵浦光对 RFA 的输出增益具有很明显的提高作用。这是因为二阶泵浦光需要的功率大，并且二阶泵浦光是整个二阶 RFA 的能量来源。图 7 中曲线(A)和图 5(b)中所对应的泵浦结构相同，但优化后的(A)组参数所得的增益平坦度比未优化的图 5(b)有 1.30 dB 的改善，由此可以证明粒子群优化算法对二阶多泵浦的增益平坦度的优化的有效性。从表 1 以及图 7 中均可以看出，使用粒子群算法将一阶泵浦和二阶泵浦的波长和功率同时优化，多泵浦之间的相互作用会提高阶 RFA 的增益性能。

为了研究一阶泵浦个数和二阶泵浦个数对 RFA 增益性能的影响，在表 1 第(A)组的基础上分别通过减少一个二阶泵浦光、增加一个一阶泵浦光、减少一个一阶泵浦光得到 3 种结构的二阶 RFA，然后进行配置优化后得到表 1 中的(B)、(C)、(D)组的数据。显然，从表 1 中可以看出，增加一个二阶泵浦和增加或减少一个一阶泵浦的效果是不一样的。从(A)、(B)组的优化结果中可以看出，在保证二阶泵浦功率大致相同的前提下，减少一个二阶泵浦对信号光的增益和增益平坦度影响都不大，这意味着减少一路二阶泵浦的方案更有优势，它在增益性能大致相同的情况下，使得二阶 RFA 的结构更加简单。对(A)、(C)、(D)组的优化结果进行分析，一阶泵浦光的增加或减少对信号光的增益值影响很小，但对增益平坦度的影响很大。增加一个一阶泵浦可以改善增益平坦度，而减少一个一阶泵浦，在 1510 nm~1610 nm 的带宽范围内，增益平坦度恶化到 2.73 dB，即三路一阶泵浦无法在 100 nm 带宽范围内实现增益平坦，所以在 100 nm 带宽范围内，二阶 RFA 想实现增益平坦，至少需要四路一阶泵浦光。信号光只能被一阶泵浦光放大，一阶泵浦光波长不同，对应的信号光放大部分也不同，所以叠加各自放大的增益后，最终能实现增益平坦。

为了观察二阶泵浦光和一阶泵浦光之间的相互作用关系的过程，根据表 1 中的参数配置进行仿真，仿真结果如图 8 所示。

图 8 为经过优化后的二阶 RFA，它包含二阶泵浦和一阶泵浦，图 8(a)~8(d)分别对应表 1 中的(A)~(D)

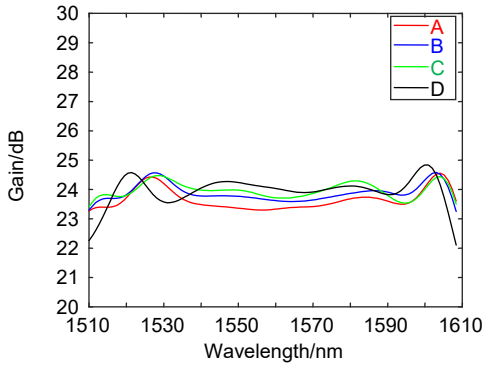


图 7 二阶 RFA 的增益

Fig. 7 The gain of second-order RFA

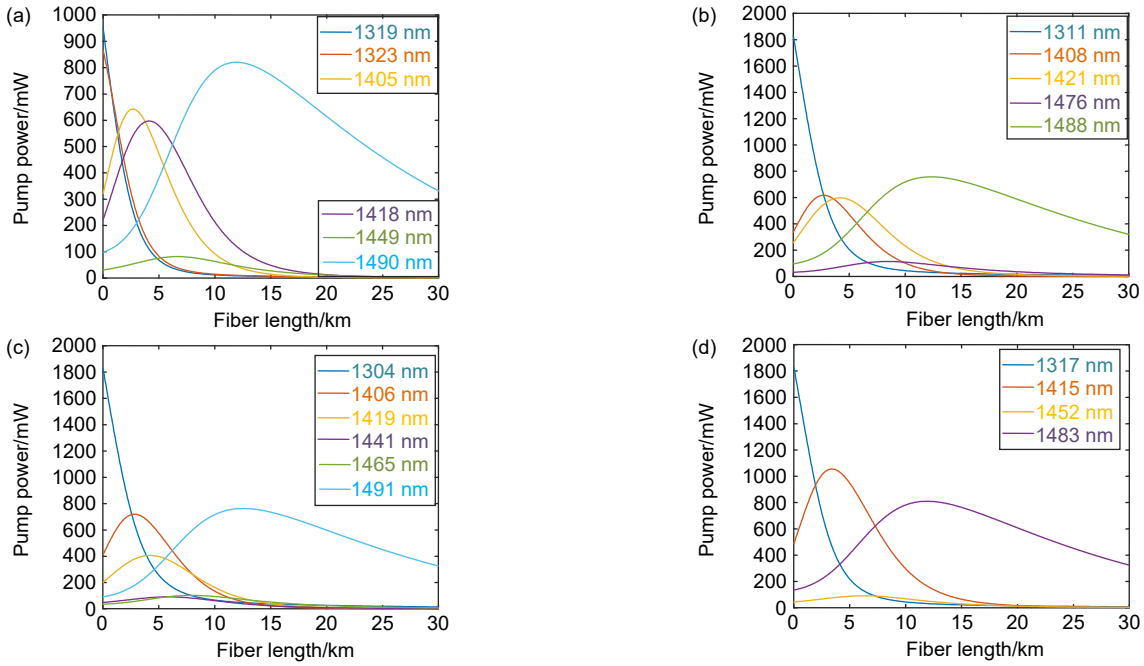


图 8 泵浦光功率随光纤长度的变化曲线

Fig. 8 Curve of pump optical power with fiber length

组配置。从图 8 中可以看出，二阶泵浦光在进入光纤后迅速下降，并且在光纤长度为 15 km 时几乎为 0，这是由于二阶泵浦为整个二阶 RFA 提供能量，它不能直接对信号光进行放大，而是将自身能量转移给了一阶泵浦光，再加之在光纤中衰减，所以最终为 0。而一阶泵浦的功率都得到了增大，其中最长波长的一阶泵浦光增幅最大，因为它不仅从二阶泵浦处得到能量，而且比它波长短的一阶泵浦光也会泵浦它，给它提供能量，所以增加的最多。但是因为一阶泵浦在被二阶泵浦放大后，接着去放大信号光，而且还会在光纤中被衰减，所以它们的功率都是先增大后减小。图 8 中 4 个图比较可得，一路二阶泵浦，五路一阶泵浦结构下的一阶泵浦光的变化曲线的增加幅度更加均衡，从增加到最大功率的值和其所处的位置来看也能更好地相互补偿，所以图 7 中增益曲线(C)最为平坦。图 8(a)与未优化的二阶泵浦功率曲线图 6(b)相比，可以发现四路一阶泵浦的变化幅度更加相近，所以叠加后的平坦度更低，优于未优化的，这再一次证明了粒子群算法适用于优化二阶 FRA 的增益性能。

5 结 论

二阶 RFA 基于光纤中的二阶拉曼效应，先用二阶泵浦光放大一阶泵浦光，然后用它充当新的泵浦源去放大信号光。整个过程中二阶泵浦光不会对信号光产生放大作用，它为一阶泵浦光在光纤传输中补充能量，因此二阶 RFA 能在获得更大增益的同时，使信号功率分布得更加均匀，所以二阶 RFA 比起传统一阶 RFA，噪声性能也得到了改善。本文采用粒子群优化算法对二阶 RFA 的泵浦光波长和功率进行了优化，并对二阶 RFA 的结构进行了改进，最终在 100 nm 带宽内使用一路二阶泵浦、五路一阶泵浦实现了增益为 24.50 dB，增益平坦度为 0.98 dB 的二阶 RFA，证明了粒子群优化算法在优化二阶 RFA 增益性能方面的有效性。最后分析了泵浦光个数对二阶 RFA 性能的影响，分析得出一阶泵浦光的个数对改善增益平坦度有很大的作用。

参考文献

[1] Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M, *et al*. Pump interactions in a 100 nm bandwidth Raman amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(5): 530–532.

[2] Gainov V, Gurkin N, Lukinih S, *et al*. Record 500 km unrepeatered 1 Tbit/s (10x100G) transmission over an ultra-low loss fiber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(19): 22308–22313.

[3] Zhu B Y, Borel P, Carlson K, *et al*. Unrepeatered Transmission of 6.3 Tb/s (63x128 Gb/s) Over 402-km Fiber Link[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(17): 1711–1714.

[4] Zhou W T, Cui L M, Zhang W, *et al*. Study on integrated configuration of optical amplifiers in the ultra long haul optical transmission system[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2016, **39**(6): 1360–1363.
周文婷, 崔力民, 张玮, 等. 超长距光传输系统中光放大器综合配置技术研究[J]. 电子器件, 2016, **39**(6): 1360–1363.

[5] Fang Y J, Zhao R Y. Development status of Raman fiber amplifier[J]. *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.

[6] Zang K. Research on the characteristics of the Higher-order Raman fiber amplifier[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
臧可. 高阶光纤拉曼放大器的特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.

[7] Huang J F, Fu C P, Yu C P. The effect of second order DRA pumping way on the performance of the noise[J]. *Study on Optical Communications*, 2016(5): 62–64.
黄金飞, 付成鹏, 余春平. 二阶 DRA 泵浦方式对噪声性能的影响[J]. 光通信研究, 2016(5): 62–64.

[8] Chen Y F. Improved energy detector for random signals in Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, **9**(2): 558–563.

[9] Wang D Y, Jiang H M, Xie K. Study on polarization dependent gain of fiber Raman amplifiers with bidirectional pumps[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(2): 0222003.
王丹燕, 姜海明, 谢康. 双向多泵浦光纤拉曼放大器偏振相关增益研究[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(2): 0222003.

[10] Al-Asadi H A, Hambali N A M B A. Experimental evaluation and theoretical investigations of fiber Raman amplifiers and its gain optimization based on single forward pump[J]. *Journal of Laser Applications*, 2014, **26**(4): 042002.

[11] Yang W X, Zhang X S. Overview of particle swarm optimization algorithms[J]. *Gansu Science and Technology*, 2012, **28**(5): 88–92, 73.
杨伟新, 张晓森. 粒子群优化算法综述[J]. 甘肃科技, 2012, **28**(5): 88–92, 73.

[12] Xu H M. Research on multiobjective particle swarm optimization algorithms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
徐鹤鸣. 多目标粒子群优化算法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

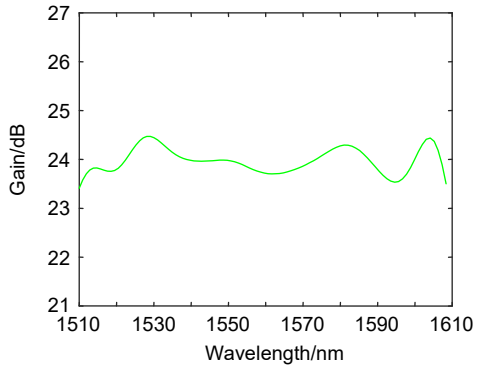
[13] Feng J Z, Chen X, Zheng S L. Improved MOPSO algorithm and its application[J]. *Application Research of Computers*, 2014, **31**(3): 675–678, 683.
冯金芝, 陈兴, 郑松林. 一种改进的多目标粒子群优化算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2014, **31**(3): 675–678, 683.

[14] Gong J M, Ding Z, Li S P, *et al*. Research on broadband raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. *Study on Optical Communications*, 2018, **44**(5): 46–51, 68.

Research on second-order Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization

Gong Jiamin, Zhang Chen*, Hao Qianwen, Zhang Lihong, Wang Jie

School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China



The gain of second-order RFA

Overview: With its own advantages, RFA has gradually occupied an increasingly important position in the optical fiber communication systems. The current research on RFA is still focused on traditional first-order RFA. During the continuous development of optical amplifier technology, the performance of other types of optical amplifiers has also in the gradual improvement. Facing such a competitive trend, people's eyes are gradually turning to higher-order Raman amplifiers. In the high-level, people first put research hotspots into the second-order RFA research and development, and experiments. How to increase the output bandwidth of RFA and reduce its gain flatness is an important problem to be solved by current amplifiers. In this paper, a second-order forward multi-pumped FRA is used, and pumps with different wavelengths have different gain peak amplification for different frequency signals, so as to achieve amplification of the entire band of signal light. First, it is proved through simulation that the second-order RFA can increase the system's gain and improve the noise performance of the system. Then, the second-order RFA's gain performance is optimized. The output gain and gain flatness are taken as the optimization goals within the 100 nm bandwidth. The particle swarm optimization algorithm is used to optimize the configuration of the wavelength and power of the pump light, so that the first- and second-order pump light interact to realize the multi-pump technology to reduce the flatness and improve the performance of the second-order RFA. In the analysis of the optimization results of the particle swarm optimization algorithm, a simpler and more efficient second-order RFA structure is given through the data summary and comparison, and the structure optimization of the second-order RFA is realized. In the optimized structure, the optimal configuration of the pump light wavelength and power of the second-order RFA is also given through continuous search and optimization of the algorithm. In addition, a single second-order pump and five first-order pumps used in the 100 nm bandwidth realized the second-order RFA with gain of 24.50 dB and gain flatness of 0.98 dB, which proved the effectiveness of the particle swarm optimization algorithm in optimizing the gain performance of the second-order RFA. Finally, the effect of the number of pump light on the performance of the second-order RFA is analyzed. It is concluded that the number of first-order pump light has a great effect on improving the flatness of the gain. These results provide a reference for the design of the second-order RFA with better performance in the future.

Citation: Gong J M, Zhang C, Hao Q W, *et al*. Research on second-order Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(11): 190747

Supported by National Natural Science Foundation of China (61775180) and the Graduate Innovation Fund Project of Xi'an University of Posts and Telecommunications (CXJJLY2019052)

* E-mail: 973172298@qq.com