

引用格式: GONG Jia-min, ZHANG Yu-rong, XU Jun-hua, *et al.* Research on Gain Characteristics of Second-order Raman Fiber Amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0806001

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

## 二阶拉曼光纤放大器增益特性研究

巩稼民, 张玉蓉, 徐军华, 田宁, 毛俊杰, 何佳蔓, 徐雨田, 尤晓磊

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

**摘要:**为实现较大放大带宽,同时提高输出增益并保持较小的增益平坦度,设计了一种二阶拉曼光纤放大器,采用一个二阶泵浦和四个一阶泵浦对100路信号光进行分布式拉曼放大.首先对二阶拉曼耦合波方程进行数值求解,为进一步提高输出性能,利用粒子群优化算法对二阶拉曼光纤放大器的性能参数进行了优化,然后在相同泵浦参数配置下,对一阶拉曼光纤放大器和二阶拉曼光纤放大器进行对比,最后对二阶拉曼放大器输出增益的影响因素进行分析.通过Matlab仿真,在1 510~1 610 nm的增益带宽范围内所设计的二阶拉曼光纤放大器的平均输出增益为23.768 0 dB,最高输出增益为24.124 4 dB,同时增益平坦度为0.911 2 dB.

**关键词:**拉曼光纤放大器;二阶泵浦;粒子群优化算法;平均增益;增益平坦度

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204908.0806001

## Research on Gain Characteristics of Second-order Raman Fiber Amplifier

GONG Jia-min, ZHANG Yu-rong, XU Jun-hua, TIAN Ning, MAO Jun-jie, HE Jia-man,  
XU Yu-tian, YOU Xiao-lei

(College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** In order to achieve a larger amplification bandwidth, while increasing the output gain and maintaining a small gain flatness, a second-order Raman fiber amplifier is designed, which used a second-order pump and four first-order pumps to perform distributed Raman amplification on 100 channels of signal light. First, numerically solve the second-order Raman coupled wave equation. Simultaneously, in order to further improve the output performance, the performance parameters of the second-order Raman fiber amplifier are optimized by using particle swarm optimization algorithm. Then, under the same pump parameter configuration, compare the first-order RFA with the second-order RFA. Finally, the factors affecting the output gain of the second-order Raman amplifier are analyzed. Through experimental simulation, within the 1 510~1 610 nm gain bandwidth range, the designed second-order Raman fiber amplifier has an average output gain of 23.768 0 dB, a maximum output gain of 24.124 4 dB and the gain flatness is 0.911 2 dB.

**Key words:** Raman fiber amplifier; Second-order pumped; Particle swarm optimization; Average gain; Gain flatness

**OCIS Codes:** 060.2330; 060.4370; 060.4510; 190.5650

基金项目:国家自然科学基金(No.61775180)

第一作者:巩稼民(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光通信. Email: gjm@xupt.edu.cn

通讯作者:张玉蓉(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信. Email: zhangyr1993@163.com

收稿日期:2019-08-22;录用日期:2020-06-23

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

5G技术已经进行商用,以5G为核心的通信板块成为主流<sup>[1]</sup>.5G技术的不断普及,推动了光纤通信的发展,同时对光模块的功能和性能提出了更高的要求<sup>[2-3]</sup>.拉曼放大器(Raman Fiber Amplifier, RFA)是实现超大容量、超长跨距传输的重要器件.目前RFA多采用一阶泵浦,并以多泵浦结构为主.然而随着传输距离的不断增长,噪声会被不断放大,导致噪声累积,这会严重影响传输质量.提高放大带宽同时降低增益平坦度,并减少传输中噪声,将三者同时兼顾就带来一个新的研究热点,即高阶RFA<sup>[4-6]</sup>.

国内外有多名学者对其进行了研究.2002年,CHESTNUT D A等研究发现,二阶泵浦在沿光纤的增益分布设计上具有更大的灵活性,可以通过改变泵浦功率以避免不期望的非线性效应<sup>[7]</sup>.同年PAPEMYI S B等通过三阶拉曼放大,设计出放大带宽为50 nm,平均增益为23 dB,并且增益平坦度为2 dB的RFA<sup>[8]</sup>.北京邮电大学臧可等通过实验采用三阶泵浦的方法所设计高阶拉曼光纤放大器,放大带宽为80 nm,并且增益达到24 dB<sup>[9]</sup>,与国外研究成果相比放大带宽得到了明显的提高.武汉邮电科学院黄金飞等分析了二阶分布式拉曼放大器的噪声性能,实验发现二阶泵浦功率比重分配越大,等效噪声指数越小<sup>[10]</sup>.以上研究以验证为主,并且所设计的高阶RFA具有以下问题:所实现的增益平坦度较高,使得输出性能变差;所实现的放大带宽较窄,与RFA的大带宽发展目标有所差距.

本文对二阶RFA的输出特性进行研究,将输出带宽、输出增益以及增益平坦度同时作为研究目标,对放大带宽进一步扩展,在保证较高输出增益的前提下,将增益平坦度降低到1 dB以下,使其更好地满足未来光纤传输系统超宽带、超长距、超大容量的需求.首先介绍了二阶拉曼放大原理,并使用四阶-龙格库塔法对简化后的拉曼耦合波方程进行数值求解,进而使用粒子群优化算法对二阶RFA输出增益进行优化,实现放大带宽提高的同时保证增益均衡.在优化的基础上引入噪声,并对一阶RFA和二阶RFA性能进行对比,最后对二阶拉曼放大器输出增益的影响因素进行分析.通过实验仿真在1 510~1 610 nm的增益带宽范围内得到0.911 2 dB增益平坦度,24.124 4 dB最高输出增益,平均输出增益达到23.768 0 dB,为深入研究高阶拉曼放大技术在超长距无中继光纤通信系统中的应用奠定基础.

## 1 理论基础及结构设计

### 1.1 二阶拉曼光纤放大器理论基础

二阶拉曼放大与一阶拉曼放大原理类似,统一阶RFA是用频率在1.4 μm左右的泵浦光对频率在1.5 μm左右的信号光进行一次拉曼放大,这时泵浦光与信号光之间的频移差为13.2 THz,恰好是一个Stokes频移.二阶拉曼放大利用二次拉曼频移来实现放大功能,不同之处在于,二阶拉曼放大是一种接力式放大.二阶RFA在高于泵浦光频率的一个Stokes频移位置,即频率1.3 μm左右加入二阶泵浦,二阶泵浦先对一阶泵浦进行放大,被放大后的一阶泵浦再对信号光进行放大,并对此进行验证<sup>[10]</sup>.

实际通信系统中,多路信号光和多路泵浦光并存,需考虑泵浦光之间以及信号光与泵浦光之间发生的能量转换,以及各路信号光在光纤传输中的损耗,除此以外,还需考虑双向瑞利(Double Rayleigh Backscattering, DRBS)噪声和自发辐射(Amplified Spontaneous Emmission, ASE)噪声<sup>[11-12]</sup>对二阶RFA的影响,简化后的拉曼耦合波微分方程为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_j}{dz} = & \sum_{\nu_i > \nu_j} \frac{g_R(\nu_i - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_j - \sum_{\nu_k < \nu_j} \frac{\nu_j g_R(\nu_j - \nu_k)}{\nu_k K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j + \gamma_j P_j + \\ & 2h\nu_i \sum_{\nu_i > \nu_j} \frac{g_R(\nu_i - \nu_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j \cdot \left[ 1 + \frac{1}{e^{h(\nu_i - \nu_j)/KT} - 1} \right] \cdot \Delta\nu \quad (i, j, k \in [1 \cdots N]) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $P_i, P_j, P_k$ 分别为第*i*、*j*、*k*路信道传输的信号光功率; $\nu_i, \nu_j$ 和 $\nu_k$ 分别为第*i*、*j*和*k*信道的信号光频率;*N*为信号光和泵浦光的总路数;*z*为传输距离; $A_{\text{eff}}$ 为光纤有效截面积; $K_{\text{eff}}$ 为偏振因子,一般取值为2<sup>[13]</sup>; $\alpha_j$ 为第*j*路光信号在光纤中的损耗系数; $g_R(\nu_i - \nu_j)$ 为*i*、*j*两路信号光之间的拉曼增益系数; $g_R(\nu_j - \nu_k)$ 为*j*、*k*两路信号光之间的拉曼增益系数;*h*为普朗克常量;*K*为波尔兹曼常量;*T*为光纤绝对温度.

采用四阶龙格库塔法对拉曼耦合波微分方程进行数值求解.定义 $P_i = y(I, j)$ ,*I*为迭代次数,*h*为迭代步

长,光纤长度与迭代次数和迭代步长的关系为 $L=h \times (I-1)$ ,则简化后的二阶拉曼传输方程采用四阶龙格-库塔数值求解的表达式为

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

可知,当已知各路泵浦光和信号光在光纤介质起始端的初始光功率,便可以利用式(2)沿着自变量的方向进行有限次迭代,得到信号光在传输介质上每一处的功率值,进而得到其增益值。

## 1.2 二阶拉曼光纤放大器结构设计

所设计的二阶RFA结构如图1所示,光发射机输出的100路信号光和5路泵浦光通过光复用器耦合进长度 $L$ 为30 km的石英光纤中,一路二阶泵浦光首先放大四路一阶泵浦光,被放大后的一阶泵浦光与信号光发生相互作用,使得信号光被放大,最终被放大的100路信号光经过波分解复用器分别被其对应的接收机接收,同时滤出5路泵浦光。

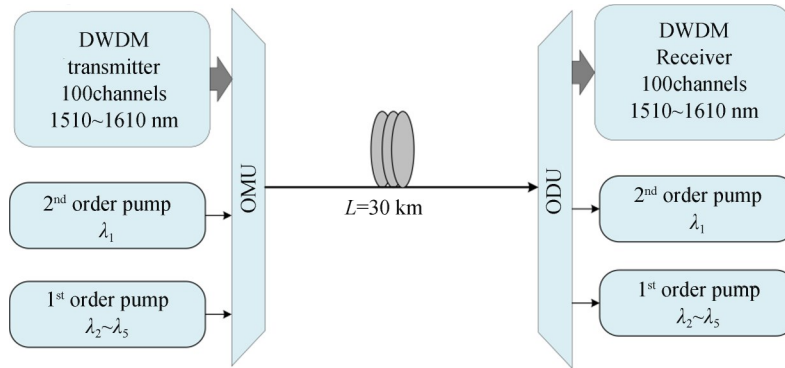


图1 二阶拉曼光纤放大器结构

Fig.1 Structure of second-order Raman fiber amplifier

## 2 优化仿真与分析

### 2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种模拟鸟类捕食行为的群智能算法。每个粒子有速度和位置两个属性,每个粒子都会在搜索空间内单独寻找最优解,找到后并与其他粒子共享,其他粒子不断调整自己的两个属性,最终得到一个全局最优解。粒子群优化算法的优势在于简单易操作,同时收敛速度非常快<sup>[14-16]</sup>。其优化流程如图2。

加入粒子群优化算法对二阶RFA的多路泵浦光参数进行优化,使得在较宽的放大波段内实现较大的输出增益同时保证较低的增益平坦度。因此将二阶RFA的粒子群适应度函数设为拉曼光纤放大器的输出增益与增益平坦度的熵

$$f = \frac{G}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (3)$$

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

$$\Delta G = G_{\max} - G_{\min} \quad (5)$$

式中, $G_{\max}$ 是拉曼光纤放大器输出增益最大值, $G_{\min}$ 为拉曼光纤放大器输出增益最小值, $\Delta G$ 为增益平坦度; $P_j(L)$ 为第 $j$ 路信号光传输距离 $L$ 后的光功率, $P_j(0)$ 为第 $j$ 路信号光初始光功率。

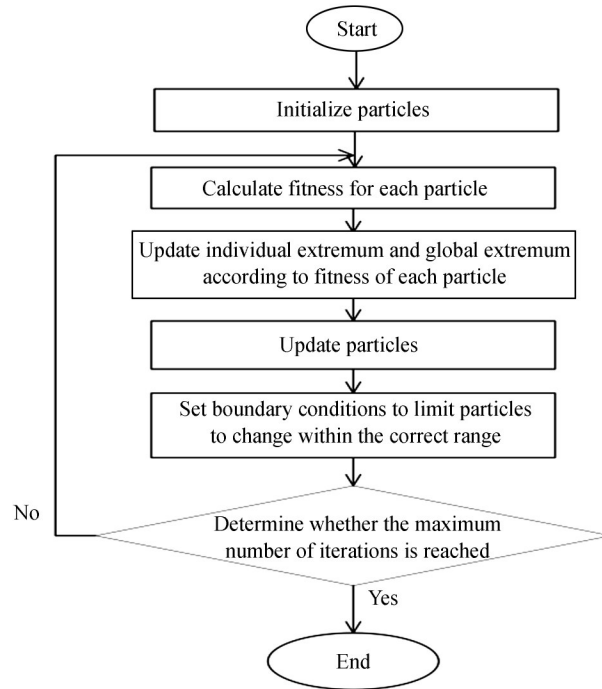


图2 粒子群优化算法流程

Fig.2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

## 2.2 二阶拉曼光纤放大器的增益平坦优化

在不考虑噪声影响下,即忽略式(1)中后两项时,采用5路波长和功率各不相同的泵浦光,因此每个粒子的维度为10;权重因子一般取值在0.8~1.2之间,这里取1;基本优化参数设置如表1.为了实现100 nm的放大带宽,二阶拉曼光纤放大器的优化参数设置如表2,通过优化得到了多组数据,这里选出6组相对最优的数据进行对比分析,如表3所示.

表1 基本优化参数

Table 1 Basic optimization parameters

Parameters	Values
Number of iterations	$T = 50$
Number of particles	$M = 10$
Dimension of each particle	$D = 10$
Weight factor	$w = 1$
Learning factor	$c_1 = 1, c_2 = 1$
Number of pumped light	$n = 5$

在所设置的优化区间内,搜索到的6组较优的泵浦配置,为了更加直观地看到二阶RFA优化输出结果,对六组参数配置进行仿真,得到A、B、C、D、E、F六组参数对应的输出增益如图3.

对比六组数据,发现F组泵浦配置下的二阶RFA,不仅平均输出增益更高并且增益平坦度更低,输出结果最理想,因此选取F组数据进行进一步分析,此时平均输出增益为23.764 7 dB,最大输出增益为24.109 7 dB,增益平坦度为0.876 2 dB.

为了进一步观察二阶泵浦对RFA的作用,在优化基础上,引入自发辐射噪声和双向瑞利噪声,并对相同泵浦参数配置下的一阶RFA和二阶RFA进行对比,对应输出增益曲线如图4.

引入噪声后,仅使用F组中一阶泵浦配置的一阶RFA平均输出增益为8.184 8 dB,最大输出增益为9.582 8 dB,增益平坦度为3.563 6 dB;在F组泵浦参数配置下,二阶RFA平均输出增益为23.768 0 dB,最大输出增益为24.124 4 dB,增益平坦度为0.911 2 dB.对比可见,二阶高功率泵浦的引入,使得整体输出增益明显提高,并且降低了增益平坦度,使得整体输出更加平稳.为了进一步观察二阶泵浦引入对RFA噪声所产生的

表2 二阶RFA优化区间设置  
Table 2 Second order RFA optimization interval setting

Parameters	Values
Wavelength range of signal light/nm	$\lambda_i \in [1\ 510, 1\ 610]$
Power of signal light/mW	$P_i = 0.01$
Fiber length/km	$L = 30$
Wavelength range of second-pump light/nm	$\lambda_1 \in [1\ 300, 1\ 320]$ $\lambda_2 \in [1\ 400, 1\ 415]$ $\lambda_3 \in [1\ 415, 1\ 430]$
Wavelength range of first-pump light/nm	$\lambda_4 \in [1\ 450, 1\ 465]$ $\lambda_5 \in [1\ 480, 1\ 495]$
Power range of second-pump light/W	$P_1 \in [1.0, 2.5]$ $P_2 \in [0.1 \sim 0.5]$ $P_3 \in [0.1, 0.5]$
Power range of first-pump light/W	$P_4 \in [0.05, 0.15]$ $P_5 \in [0.05, 0.15]$

表3 六组优化结果对比  
Table 3 Comparison of six groups of optimization results

Parameters	Values					
	A	B	C	D	E	F
$\lambda_1/\text{nm}$	1 300.4	1 300.5	1 301.9	1 301.5	1 303.8	1 300.5
$\lambda_2/\text{nm}$	1 408.3	1 407.9	1 408.1	1 405.7	1 404.8	1 407.9
$\lambda_3/\text{nm}$	1 416.9	1 417.0	1 420.4	1 420.4	1 420.9	1 417.0
$\lambda_4/\text{nm}$	1 459.9	1 459.3	1 461.4	1 455.2	1 457.3	1 459.3
$\lambda_5/\text{nm}$	1 490.1	1 491.5	1 490.4	1 490.1	1 490.4	1 491.5
$P_1/\text{W}$	2.049 2	2.003 3	2.137 4	1.755 3	2.338 7	2.217 9
$P_2/\text{W}$	0.248 2	0.253 3	0.299 5	0.473 4	0.262 2	0.292 1
$P_3/\text{W}$	0.165 3	0.207 4	0.140 8	0.237 7	0.106 7	0.177 1
$P_4/\text{W}$	0.089 4	0.090 7	0.088 7	0.086 5	0.098 0	0.109 7
$P_5/\text{W}$	0.104 5	0.101 4	0.089 4	0.086 8	0.079 8	0.076 4
$G_{\max}/\text{dB}$	21.971 8	22.723 2	23.272 1	24.225 1	24.154 0	24.109 7
$\bar{G}/\text{dB}$	21.573 4	22.283 2	22.873 2	23.660 5	23.696 6	23.764 7
$\Delta G/\text{dB}$	0.918 1	0.910 7	0.834 9	0.994 4	0.938 2	0.876 2

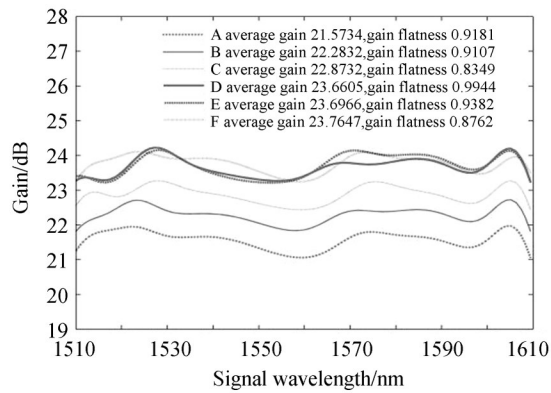


图3 六优化结果的输出增益  
Fig.3 Output gain of six groups of optimized results



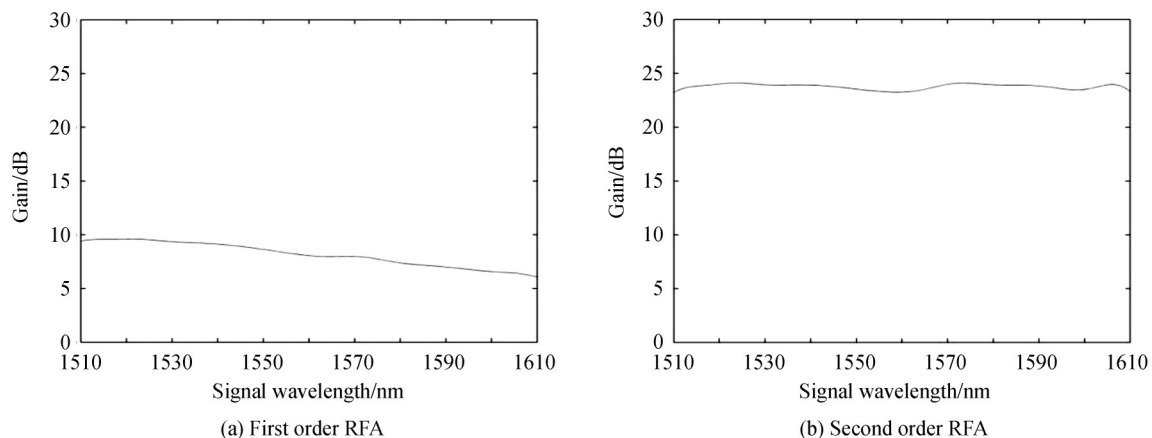


图4 F组参数下的输出增益  
Fig.4 Output gain under the F set of parameters

影响,将同等泵浦参数配置下的一阶RFA和二阶RFA的噪声增益进行对比,对应噪声增益曲线如图5.

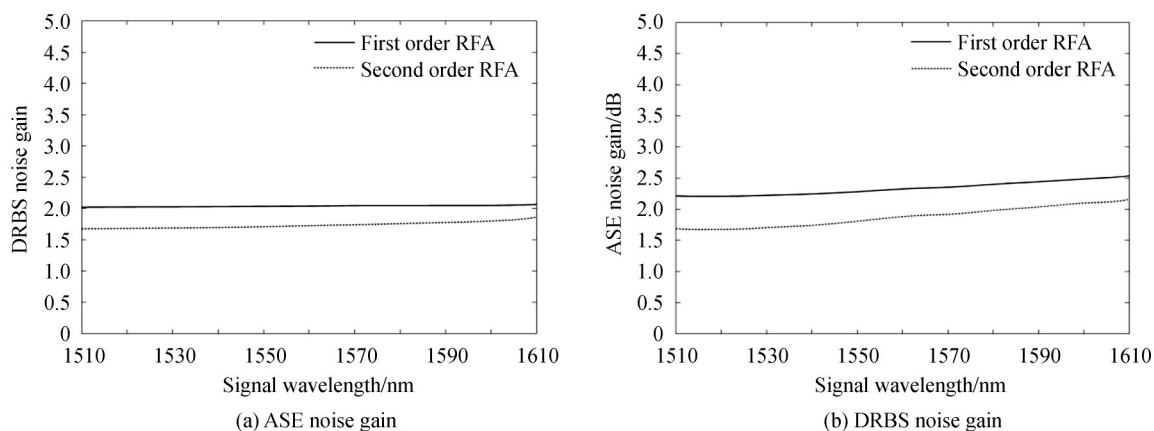


图5 一阶RFA和二阶RFA的噪声增益  
Fig.5 The noise gain of first order RFA and second order RFA

由图5可知,一阶RFA的ASE噪声平均增益为2.3297 dB,DRBS噪声平均增益为2.0376 dB;二阶RFA的ASE噪声平均增益为1.8700 dB,DRBS平均噪声增益为1.7315 dB.对比可见,在同等传输距离同样泵浦参数配置下,引入二阶泵浦使得RFA的ASE噪声平均增益下降0.4597 dB,DRBS噪声平均增益下降0.3061 dB,证明二阶泵浦的引入降低了系统中的噪声.为了进一步了解二阶泵浦光在放大过程中发挥的作用,将同等泵浦参数配置下的一阶RFA和二阶RFA中各路泵浦光在石英光纤中传输时的功率变化进行仿真分析,仿真结果如图6.二阶拉曼光纤放大器中100路信号光功率随光纤长度的变化如图7.

对比图6(a)、(b)可知,引入波长为1300.5 nm的二阶泵浦功率随着光纤长度的变化迅速下降,与图6(a)相比,波长为1407.9 nm和波长为1417.0 nm的两路一阶泵浦对应功率不再直接开始衰减,而是传输一段距离后开始衰减,并且四路一阶泵浦光对应功率在不同程度上呈现先增大再减小的趋势,并且拐点均出现后移现象.这是由于二阶泵浦提供给一阶泵浦的能量可以支撑其抵消部分光纤损耗以及自身转移给信号光的能量,所以一阶泵浦功率均呈现上升现象,随着传输距离的不断加大,二阶泵浦能量被大量消耗,无法再给一阶泵浦提供能量,这时被放大的一阶泵浦光开始将自身的能量转移给信号光,所以一阶泵浦功率均呈现下降现象,验证了二阶放大理论的正确性.观察图7发现,各路信号光经过充分地放大,其输出功率是初始输入功率的60倍以上.

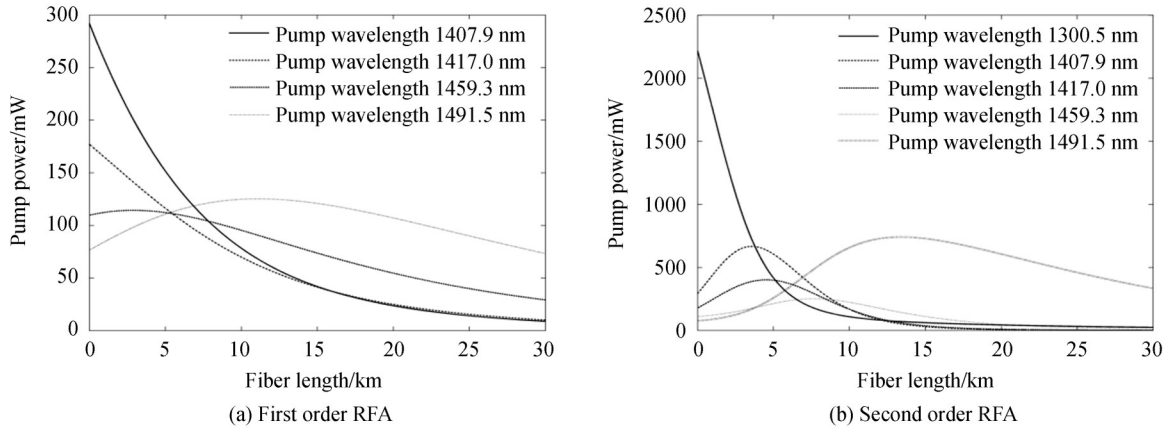


图6 泵浦光功率随光纤长度的变化

Fig.6 The powers of pumped lights vary with the fiber length

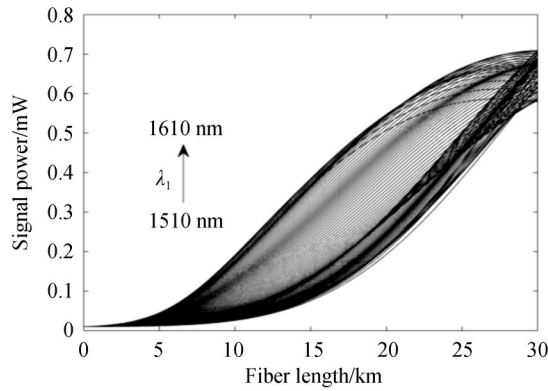


图7 100路信号光功率随光纤长度的变化

Fig.7 The powers of 100-channel signal lights vary with the fiber length

### 2.3 二阶拉曼光纤放大器的影响因素分析

#### 2.3.1 光纤长度对二阶拉曼光纤放大器的影响

为了更直观地看到光纤长度对二阶 RFA 的影响,在其他参数设置不变的情况下,将光纤长度增加到 100 km.随着光纤长度的延长,二阶 RFA 的平均输出增益和增益平坦度的变化如图 8.观察到随着光纤长度加长,放大器的平均输出增益先快速上升后趋于稳定.这是由于随着光纤长度的增加,泵浦光和信号光进行充分地相互作用,使得输出增益快速上升,但是信号光在光纤中的损耗也会不断加大,使得放大效果出现弱化,总的输出增益就会趋于稳定,达到增益饱和状态.

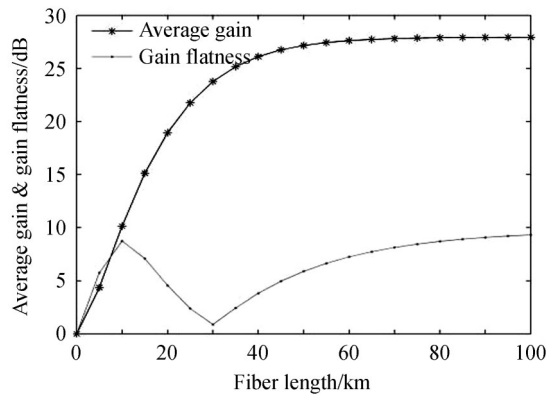


图8 平均增益和增益平坦度随光纤长度的变化

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

同时0~30 km内增益平坦度先增大后减小,在光纤长度为30 km处增益平坦度最佳,当光纤长度大于30 km增益平坦度恶化.这是由于光纤长度较短时,信号光无法得到均匀放大,适当的增加光纤长度,使得泵浦光对信号光的放大变得均匀,所以光纤长度为30 km处增益平坦度达到最佳.

综上可知,光纤长度有一个饱和值,所设计的光纤长度为30 km,不仅保证了较高的平均输出增益和较低的增益平坦度,同时更加地节约资源.

### 2.3.2 泵浦参数对二阶拉曼光纤放大器的影响

为了更直观地看到二阶泵浦光功率对二阶RFA的影响,在其他参数设置不变的情况下,仅改变二阶泵浦光功率,此时二阶RFA的平均输出增益和增益平坦度的变化如图9.

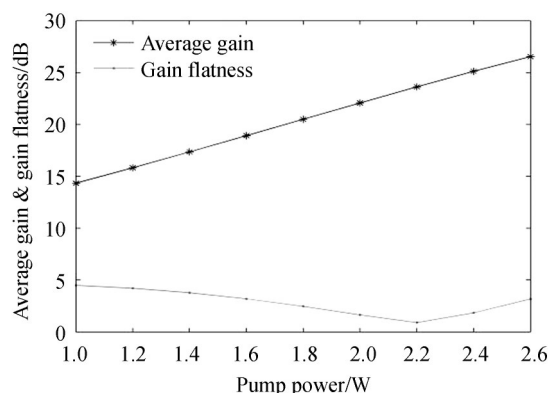


图9 平均增益和增益平坦度随二阶泵浦光功率的变化

Fig.9 Variation of average gain and gain flatness with pumped light power

观察发现随着二阶泵浦光功率的增大,泵浦光功率与二阶RFA的平均输出增益呈线性增长,是由于二阶泵浦光功率越大,对一阶泵浦的放大越明显,一阶泵浦光与信号光之间的受激拉曼作用越剧烈,信号光会得到更多来自泵浦光的能量,从而输出增益也越大.同时增益平坦度先上升后下降,是由于通过被二阶泵浦放大的一阶泵浦光对波长不同的信号光放大程度不同,当二阶泵浦光功率在2.2 W附近时得到最低增益平坦度.

综合分析可知,二阶泵浦光的功率变化虽然和输出增益变化呈正比,但是不能无限增大,它存在一个最优功率取值范围,因此在设计二阶拉曼光纤放大器时需要综合考虑输出增益和增益平坦度,在保证输出增益较大的情况下,保持增益均衡.

## 3 结论

针对二阶RFA的增益特性进行研究.首先设计了二阶RFA并对其进行优化和仿真,然后分析了改变光纤长度或者改变泵浦功率对二阶RFA输出增益及对应增益平坦度性能的影响.最终所设计的二阶RFA在1 510~1 610 nm的增益带宽范围内得到增益平坦度为0.911 2 dB,最高输出增益为24.124 4 dB,平均输出增益达到23.768 0 dB.并且所设计的二阶RFA与传统的RFA相比具有平坦输出放大带宽大、噪声低、输出增益高的优点.与现有结果相比,所设计的二阶RFA不仅放大的平坦输出带宽达到100 nm,并且在保证较高输出增益的情况下,增益平坦度降到了1 dB以下,为未来高阶拉曼放大技术在超长距离光纤通信中应用提供了参考.

### 参考文献

- [1] SHA Hao. Application of optical fiber communication in 5G communication system[J]. *Engineering Technology*, 2016, (11): 00091.  
沙浩. 光纤通信在5G通信系统中的应用[J]. 工程技术, 2016, (11): 00091.
- [2] ZHANG Hua, HUANG Wei-ping. Product definition and enabling technologies for 5G wireless transceiver[J]. *ZTE Technology Journal*, 2018, 24(4): 51-53.  
张华, 黄卫平. 5G无线光模块的需求分析和关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(4): 51-53.
- [3] LI Ming. On performance of optical wireless communication with spatial multiplexing towards 5G[J]. *IEEE Access*, 2018, 6



- (99): 28108-28113.
- [4] FARALLI S, PASQUALE F D. Impact of double rayleigh scattering noise in distributed higher order raman pumping schemes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(6): 804-806.
- [5] BROMAGE J. Raman amplification for fiber communication systems [C]. Optical Fiber Communications Conference, IEEE, 2004.
- [6] LI Jia-xiong, CAI Cheng-kun, DU Jiang-bing. Ultra-low-noise mode-division multiplexed WDM transmission over 100km FMF based on a second-order few-mode raman amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(16): 3254-3260.
- [7] CHESTNUT D A, DE MATOS C J S, REEVESHALL P C, *et al.* Copropagating and counterpropagating pumps in second-order-pumped discrete fiber raman amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(19): 1708-1710.
- [8] PAPERNYI S B, KARPOV V I, CLEMENTS W R L. Third-order cascaded raman amplification [C]. Optical Fiber Communication Conference & Exhibit, IEEE, 2002.
- [9] ZANG Ke. Optimization on bandwidth in the third-order pumped distributed fiber raman amplifier[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(7): 076112.
- [10] HUANG Jin-fei, FU Cheng-peng, YU Chun-ping. 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.
- [11] BOLOGNINI G, BONONI A. Reduction of double rayleigh scattering noise in distributed raman amplifiers employing higher-order pumping[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 6996-7003.
- [12] CHENG Xiao-peng, YU Chong-xiu, DENG Yun-yi, *et al.* Influence of raman effect on the noise characteristics in a dual pump FOPA[J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **7**(6): 447-450.
- [13] GONG Jia-min, GUO cui, SHEN Yi-nan, *et al.* Gain-flattened photonic crystal raman fiber amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(7): 99-104.  
巩稼民, 郭翠, 沈一楠, 等. 一种增益平坦的光子晶体拉曼光纤放大器 [J]. 光子学报, 2017, **46**(7):99-104.
- [14] 包子阳, 余继周. 智能优化算法及其MATLAB实例[M]. 北京:电子工业出版社, 2016:103-122.
- [15] GONG Jia-min, DING Zhe, LI Si-ping, *et al.* Research on broadband raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J].*Study on Optical Communications*, 2018, **209**(5): 50-55+72.  
巩稼民, 丁哲, 李思平, 等. 基于粒子群优化的宽带拉曼光纤放大器研究[J]. 光通信研究, 2018, **209**(5): 50-55+72.
- [16] MOWLA A, GRANPAYEH N. Design of a flat-gain multipumped distributed fiber raman amplifier by particle swarm optimization[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, **25**(12): 3059-3066.