

基于粒子群优化算法的宽带混合光纤放大器的设计

巩译 刘芳 孟繁轲

Design of broadband hybrid fiber amplifier based on particle swarm optimization algorithm

GONG Yi, LIU Fang, MENG Fanke

引用本文:

巩译, 刘芳, 孟繁轲. 基于粒子群优化算法的宽带混合光纤放大器的设计[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 1015–1021. DOI: 10.5768/JAO202243.0508004

GONG Yi, LIU Fang, MENG Fanke. Design of broadband hybrid fiber amplifier based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 1015–1021. DOI: 10.5768/JAO202243.0508004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于粒子群优化的高斯混合灰度图像增强算法

Gaussian mixture grayscale image enhancement algorithm based on particle swarm optimization

应用光学. 2017, 38(4): 592–598 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0402003>

鲸群优化的粒子滤波算法研究

Particle filter algorithm based on whale swarm optimization

应用光学. 2021, 42(5): 859–866 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502006>

类视网膜阵列结构的光纤相控阵方法研究

Research on optical fiber phased array method of retina-like array structure

应用光学. 2021, 42(4): 749–754 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408001>

基于多目标人工鱼群算法的光疗LED照度优化研究

Research on illumination optimization of phototherapy LED based on multi-objective artificial fish swarm algorithm

应用光学. 2021, 42(2): 352–359 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0205004>

基于混合蛙跳优化算法的图像畸变校正研究

Image distortion correction based on shuffled frog leaping algorithm

应用光学. 2017, 38(2): 243–249 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202007>

基于后向散射法测量蒸汽湿度反演算法的优化

Optimization of steam humidity measurement inversion algorithm based on back angle scattering method

应用光学. 2019, 40(4): 612–619 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0402005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 05-1015-07

基于粒子群优化算法的宽带混合光纤放大器的设计

巩 译¹, 刘 芳², 孟繁轲²

(1. 北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 100867; 2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘 要: 基于铒/镱共掺光纤放大器 (erbium-ytterbium doped fiber amplifier, EYDFA) 的理论模型和受激拉曼散射效应的分析理论, 利用 EYDFA 和拉曼光纤放大器 (Raman fiber amplifier, RFA) 的增益谱互补特性, 研究并设计了 EYDFA 与二阶多泵浦 RFA 相结合的混合放大器结构。为了得到高增益和低平坦度的混合放大器, 引入了粒子群算法优化泵浦光波长和功率。仿真结果表明: 在不使用增益均衡器的条件下, 所设计的混合光纤放大器在输出端得到了近似相等的输出光功率, 在 90 nm 的带宽范围内平均增益为 38.78 dB, 增益平坦度为 1.1 dB, 为混合放大器的设计和优化提供了参考。

关键词: 混合光纤放大器; 粒子群优化算法; 拉曼增益; 增益平坦度

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0508004

Design of broadband hybrid fiber amplifier based on particle swarm optimization algorithm

GONG Yi¹, LIU Fang², MENG Fanke²

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100867, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Based on the theoretical model of Erbium-ytterbium doped fiber amplifier (EYDFA) and the analysis theory of stimulated Raman scattering effect, a hybrid amplifier structure combining EYDFA with second-order multi pump Raman fiber amplifier (RFA) was studied and designed by using the gain spectrum complementary characteristics of EYDFA and RFA. In order to obtain a hybrid amplifier with high gain and low flatness, a particle swarm optimization algorithm was introduced to optimize the pump wavelength and power. The simulation results show that, without the use of gain equalizer, the output power of the designed hybrid fiber amplifier is approximately equal, the average gain is 38.78 dB and the gain flatness is 1.1 dB in the bandwidth range of 90 nm, which provides a reference for the design and optimization of the hybrid amplifier.

Key words: hybrid fiber amplifier; particle swarm optimization algorithm; Raman gain; gain flatness

引言

波分复用技术(wavelength division multiplexing, WDM)作为有效提升传输系统中继距离与可用带宽的技术手段, 随着高速扩张的信息量和日益庞

大的网络用户总数逐渐被通信行业广泛投入使用^[1]。光放大器为 WDM 传输系统中关键性器件^[2], 其性能的改善与开发决定着 WDM 和现代光波通信的发展速度。WDM 系统中应用最广泛的光放

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-12-13

基金项目: 北京信息科技大学重点科研培养项目 (2121YJPY224); 北京信息科技大学基金 (2021XJJ24)

作者简介: 巩译 (1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光通信、车载网络中的信道建模、大规模 MIMO、低功耗通信、非线性 MIMO 方面的研究。E-mail: gongyi@bistu.edu.cn

通信作者: 刘芳 (1997—), 女, 硕士, 主要从事光通信与光信息技术方面的研究。E-mail: lfi15170905229@163.com

大器是掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)和拉曼光纤放大器(Raman fiber amplifier, RFA)。掺铒光纤放大器广泛用于 C+L 波段放大, 提供高增益系数和成本效益, 但工作带宽固定、带宽区间较小^[3-6], 增加了自发辐射(ASE)噪声。RFA 可以放大任意波长的信号^[7-11], 且增益波段灵活、噪声指数(NF)低, 但增加了系统的非线性效应, 降低了泵浦光到信号光的功率传输效率^[12]。

2 个放大器 EDFA 和 RFA 各有优缺点, 级联 2 个放大器可以增加两者的优势。使用混合光放大器(hybrid optical amplifier, HOA)能够降低系统的非线性和噪声系数, 提高增益带宽和系统容量^[13]。但混合放大器的性能取决于许多参数, 包括掺铒光纤放大器和拉曼放大器的光纤长度、泵浦功率及波长等。因此需要优化 HOA 的主要参数, 以使混合系统的增益最大化。

本文以宽带混合放大器的设计与优化为研究目标, 采用能有效改善浓度淬灭、离子聚集效应的铒/镱共掺光纤放大器^[14](erbium-ytterbium doped fiber amplifier, EYDFA)取代 EDFA。对 EYDFA/RFA 混合放大器展开研究, 给出了 EYDFA/RFA 混合放大器理论模型, 并对所设计的混合放大器结构进行合理的参数配置。为了进一步提升混合放大器增益, 改善其增益平坦度, 建立了二阶多泵浦分布式 EYDFA/RFA 混合放大器结构。以增益平坦度和增益值为优化目标设计了二阶多泵浦 EYDFA/

RFA 混合放大器模型下的粒子群优化算法。

1 混合光纤放大器的理论模型与结构设计

1.1 理论模型

混合放大器的数学模型由 RFA 的 Raman 耦合波方程与 EYDFA 传输方程联合构成, 稳态 EYDFA 的传输方程为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_a(\lambda_p)N_{Yb} - (\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p))N_{Yb^*}(z)]P_p(z) - \delta_p(z)P_p(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = -\Gamma_s[\sigma_a(\lambda_s)N_{Er} - (\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_e(\lambda_s))N_{Er^*}(z)]P_s(z) + \Gamma_s\sigma_e(\lambda_s)N_{Er}(z)P_0(\lambda_s) - \delta_s(z)P_s(z) \quad (2)$$

式中: δ_p 为泵浦光散射损耗系数; δ_s 为信号光散射损耗系数; $N_{Er^*}(z)$ 与 $N_{Yb^*}(z)$ 分别表示在 z 处 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 的粒子数浓度; $\sigma_e(\lambda_p)$ 与 $\sigma_e(\lambda_s)$ 分别表示泵浦光与信号光辐射过程中波长相关的截面面积; $\sigma_a(\lambda_p)$ 与 $\sigma_a(\lambda_s)$ 分别表示泵浦光与信号光吸收过程中波长相关的截面面积。

结合 RFA 功率耦合波方程组, 忽略自发 Raman 散射过程与 Rayleigh 散射过程, 将研究重心放在信号光与泵浦光以及它自身间的作用过程^[15-16], 将完整考虑了 RFA 内部各类物理效应的 Raman 耦合波微分方程^[17-18]简化为如下形式:

$$\pm \frac{dP_j}{dz} = \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{eff}A_{eff}} P_i P_j - \sum_{v_k < v_j} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_R(v_j - v_k)}{K_{eff}A_{eff}} P_i P_k - \alpha_j P_j + \gamma_j P_j + 2h\nu_i \cdot \sum_{v_i > v_j} \frac{g_R(v_i - v_j)}{K_{eff}A_{eff}} P_j \cdot \left[1 + \frac{1}{\exp(h(v_i - v_j)/KT) - 1} \right] \cdot \Delta\nu \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

式中: P_k 、 P_i 、 P_j 分别表示第 k 、 i 、 j 路信道中的光信号所对应的功率; v_i 、 v_j 分别为信号光和泵浦光的初始输入频率; $\Delta\nu$ 为不同信道的频移差; $\alpha(v_i)$ 表示光信号频率在 v_i 时所对应的光纤损耗系数; K_{eff} 为偏振相关因子; A_{eff} 为光纤有效横截面积; $\gamma(v_i)$ 为瑞利散射系数; $g_R(v_i - v_j)$ 为 i 、 j 两路信号光之间的拉曼增益系数; $g_R(v_j - v_k)$ 为 j 、 k 两路信号光之间的拉曼增益系数; k 和 h 分别表示波尔兹曼常量和普朗克常量; $[\exp(h(v_i - v_j)/KT) - 1]^{-1}$ 为玻色-爱因斯坦因子; T 为光纤绝对温度。

上述理论模型以 WDM 系统为基础, EYDFA/RFA 混合放大器的具体求解过程如下: 将信号光

光功率与 EYDFA 的泵浦光功率作为已知的初值代入 EYDFA 的传输方程中, 构成已知初值的非线性微分方程组, 使用四阶龙格-库塔进行求解, 得到光信号通过 EYDFA 部分后的输出光功率。将所得的信号光输出光功率作为 RFA 的输入信号光功率, 联合 RFA 的泵浦光功率构成第 2 个已知初值的非线性微分方程组, 继续使用四阶龙格-库塔, 所得结果即为混合放大器的输出光功率。

1.2 混合放大器的结构设计

本文采用级联结构的前向 EYDFA/RFA 混合放大器模型。

图 1 为所设计的二阶 EYDFA/RFA 混合放大

器的结构示意图。采用前向级联结构的 EYDFA/RFA 混合放大器基本结构^[19], 以 81 路信道间隔为 1.125 nm 的信号光组合注入混合放大器, EYDFA 部分采用单泵浦输入, RFA 部分使用二阶多泵浦模型。81 路信号光先与 EYDFA 泵浦光耦合进入 EYDFA 放大, 放大完成后经矩形滤波器与 RFA 的泵浦光共同耦合进入石英光纤中放大。光谱仪 1、2 可用于监测 EYDFA 放大前后的信号光谱, 光谱仪 3、4 则可监测 RFA 放大前后的信号光谱。

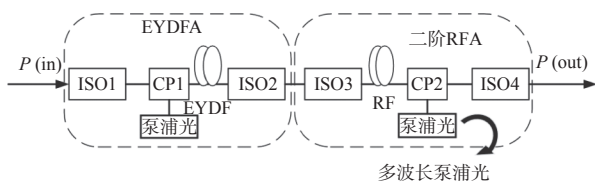


图 1 二阶 EYDFA/RFA 混合放大器结构图

Fig. 1 Structure diagram of second-order EYDFA/RFA hybrid amplifier

2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 起源于鸟群觅食过程中自发的群体搜索行为。PSO 将个体鸟儿抽象成“粒子”, 鸟群寻找的食物则是“目标最优解”, 作为一种搜索目标范围内最优解的智能算法^[20-23]。使用粒子群优化算法对二阶 EYDFA/RFA 混合放大器优化过程如下。

1) 粒子群初始化, 设置学习因子 c_1 、 c_2 , 随机数 r_1 、 r_2 , 使种群中的全部粒子得到初始位置 x_i 与初始速度 v_i 。为个体粒子最佳位置 P_{best} 与粒子群最佳位置 g_{best} 设置初始值;

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) (i = 1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) (i = 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

$$P_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) (i = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

$$g_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_D) \quad (7)$$

2) 计算当前模型下各粒子的适应度值 fit_i ;

$$fit_i = \frac{G_{on-off}}{\max(G_{on-off}) - \min(G_{on-off})} \quad (8)$$

3) 比较此次迭代过程中的粒子适应度值与已获得的个体粒子最佳位置 P_{best} , 若当前适应度值优于已获得的个体极值, 以此适应度值替换掉个体极值; 若当前适应度值小于已获得的个体极值, 个体极值维持原值;

4) 比较此次迭代过程中的粒子适应度值与全局最佳位置 g_{best} , 若当前适应度值优于已有的全局极值, 以此适应度值替换掉全局极值; 若当前适应度值小于已有的全局极值, 全局极值维持原值;

5) 将步骤 3、4 中所得极值代入 (9) 式、(10) 式, 更新当前所得最优解:

$$v_{ij}(t+1) = w \cdot v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (9)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (10)$$

6) 限制粒子变化时的边界条件, 令粒子群在正确的区域内完成迭代, 当粒子位置或速度超出此时模型的范围时, 将适应度归 0;

7) 对比此时结果是否满足终止条件, 满足条件时, 结束循环迭代过程输出所获最优解; 无法满足条件时, 返回步骤 2 重新进入循环, 按照步骤继续依次向下进行迭代。

3 仿真结果及分析

在进行优化之前, 需要对粒子群算法设置一些基本的优化参数, 如表 1 所示。由于采用了 5 个泵浦, 而每一个泵浦具备泵浦波长和泵浦功率 2 个因素, 所以总共有 5 个泵浦波长和 5 个泵浦功率, 故一个粒子的维度为 10。

表 1 粒子群算法参数

Table 1 Parameters of particle swarm algorithm

参数	取值
迭代次数 T	1 000
粒子总数 M	200
空间维度 D	10
惯性权重 w	1
学习因子 c_1	1
学习因子 c_2	1

表 2 为本次仿真的系统参数, 分别确定了泵浦光和信号光的波长、功率的取值范围, 以及光纤长度、光纤损耗系数等基本参数。基于表 1 和表 2 所设置的基本参数, 按照粒子群优化算法的流程进行优化。在优化过程中, 每一次迭代的平均增益和适应度值都可得到, 如果增益和增益平坦度满足循环终止条件, 则结束算法, 获得优化结果; 否则, 会对粒子的位置和速度进行更新, 而更新后的值将会用于下一次的迭代过程。

表 2 二阶 EYDFA/RFA 混合放大器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of second-order EYDFA/RFA hybrid amplifier

参数	取值
信号光波长范围/nm	1 53~1 620
信号光间隔/nm	1.125
信号光初始光功率/mW	0.01
EYDF长度/m	1
EYDFA泵浦功率/mW	600
EYDFA泵浦波长/nm	980
Er^{3+} 浓度/ m^{-3}	$51.4\text{e}+024$
Yb^{3+} 浓度/ m^{-3}	$620\text{e}+024$
EYDFA信号光损耗系数/(dB/m)	0.10
EYDFA泵浦光损耗系数/(dB/m)	0.15
RFA长度/km	30
RFA信号光损耗系数/(dB/km)	0.19
RFA泵浦光损耗系数/(dB/km)	0.23
一阶泵浦光波长范围/nm	1 400~1 510
一阶泵浦光功率范围/mW	0~500
二阶泵浦光波长范围/nm	1 300~1 410
二阶泵浦光功率范围/mW	0~2 500

完成多组粒子群优化过程后,最终得到了一个拥有 90 nm 带宽、平均增益达到 38.78 dB 的宽带高增益混合放大器,并且其增益平坦度仅为 1.1 dB,所对应的最优泵浦功率与波长的组合方式如表 3 所示。按照这种组合方式,得到了二阶 EYDFA/RFA 混合放大器增益谱,如图 2 所示。

表 3 优化后的混合放大器泵浦配置方式

Table 3 Optimized pump configuration of hybrid amplifier

参数	1 st —阶 泵浦	2 nd —阶 泵浦	3 rd —阶 泵浦	4 th —阶 泵浦	二阶 泵浦
泵浦波长/nm	1 423.71	1 467.24	1 475.98	1 509.11	1 306.21
泵浦功率/mW	122.7	10.2	308.4	452.9	2 421

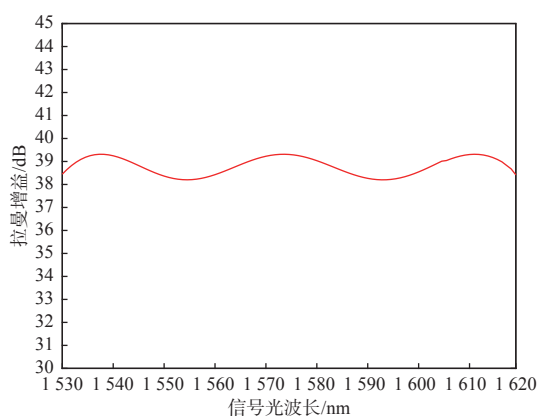


图 2 EYDFA/RFA 混合放大器增益谱

Fig. 2 Gain spectrum of EYDFA/RFA hybrid amplifier

利用前向级联结构的 EYDFA/RFA 混合放大器基本结构,信号光与 EYDFA 泵浦光耦合进入 EYDFA 放大,放大完成后信号光与 RFA 的泵浦光共同耦合进入石英光纤中进行二次放大,得到了高增益、低平坦度的拉曼增益谱。由图 2 可以看出,在 90 nm 带宽内,最大增益为 39.29 dB,最小增益为 38.18 dB,增益曲线在 38.78 dB 上下波动,但波动幅度不超过 1.1 dB,整体上非常稳定。

为了分析 5 个泵浦光在传输过程中的相互作用,研究了泵浦功率随光纤长度的变化情况。从图 3 可以看出,RFA 二阶泵浦光刚进入光纤初始端其功率值就开始急速直线下降,当减小到 300 mW 时开始缓慢变小,随后几乎为 0。而其他 4 路一阶泵浦光则出现先增大后缓慢减小的趋势。这是因为 RFA 二阶泵浦光将能量传递给了 4 个一阶泵浦光,这 4 路泵浦光在传输过程中从二阶泵浦光处吸收能量,随后因光纤损耗和信号光对能量的吸收又逐渐减小。在整个传输过程中,4 个泵浦光互相传递能量,将二阶泵浦光的作用充分展现,是较优的泵浦光配置。

由图 3 可知,RFA 二阶泵浦光波长为 1 306.21 nm,初始功率为 2 421 mW,为整个 RFA 结构提供能量,所以其对 EYDFA/RFA 混合放大器的影响也很大。运用控制变量法,即保持系统其他参数不变,不断改变 RFA 二阶泵浦光功率值的大小,如图 4 所示。当 RFA 二阶泵浦光功率值从 0 开始逐渐增大时,混合放大器的平均增益也在不断增大,当增大到 2.4 W 左右时到达峰值,此后随功率值的增大而开始减小,这是因为泵浦功率为 2.4 W 时,系统增益达到了饱和,而后当再增加泵浦功率时增益便不再增加,因此应该合理设置泵浦功率值,使混合放大器的性能达到最优。

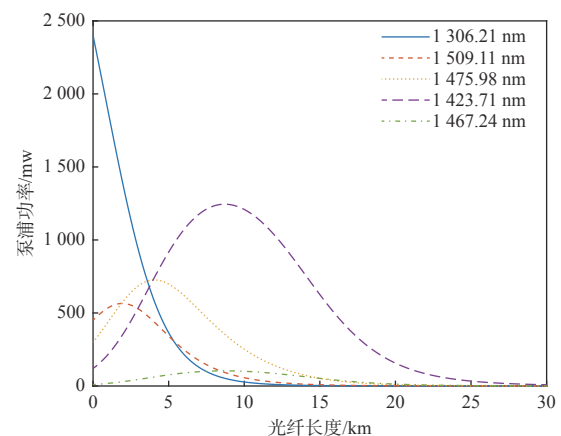


图 3 RFA 泵浦光功率沿光纤长度的变化

Fig. 3 Variation of RFA pump power along fiber length

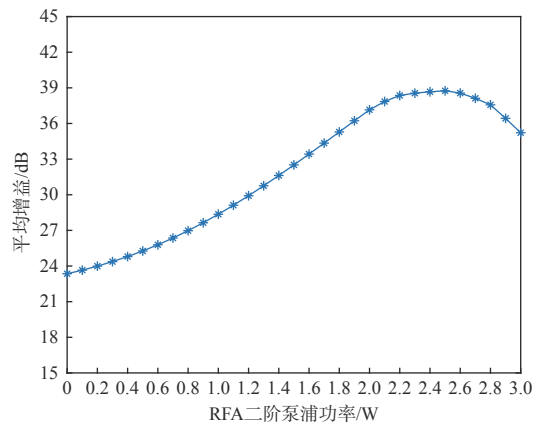
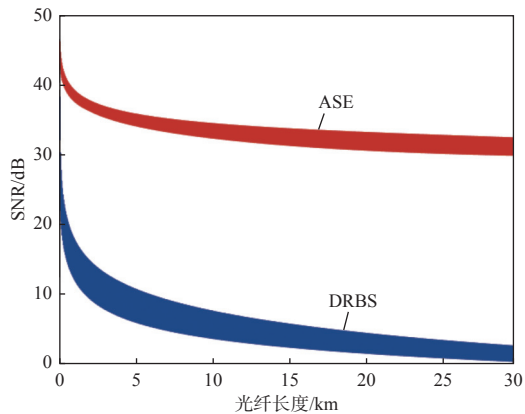
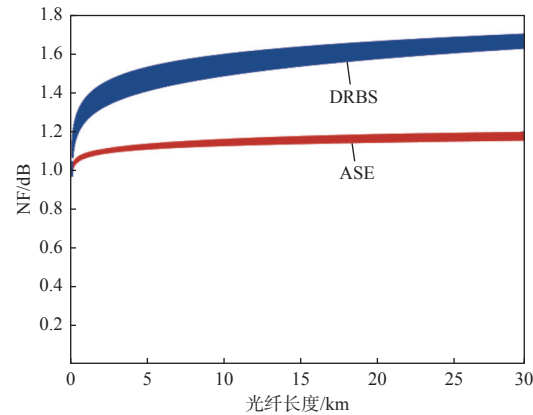


图4 RFA 二阶泵浦功率对混合放大器平均增益的影响
Fig. 4 Effect of RFA second-order pump power on average gain of hybrid amplifier

图 5(a) 为 ASE 噪声和双瑞利散射 (DRBS) 噪声的信噪比随光纤长度的变化情况。从图中我们可以看出, 光纤输入端系统 ASE 噪声和 DRBS 噪声的信噪比分别为 46 dB、38 dB, SNR 随光纤长度的增加不断减小, 其中 ASE 噪声的信噪比减小比较缓慢, 在 10 km 之后信噪比大致稳定在 32 dB, 而 DRBS 噪声的信噪比在 0~30 km 之间一直在减小。在图 5(b) 中, 输入端系统 ASE 噪声和 DRBS 噪声的噪声系数为 1 dB, 随着光纤长度的增加, ASE 噪声和 DRBS 噪声的噪声系数都成增长趋势。ASE 噪声系数在 5 km 之后停止增长, 并保持不变, 而 DRBS 噪声系数随着光纤长度增大而不断增大。结合图 5(a)、5(b) 我们可知, 在输入端时 ASE 噪声和 DRBS 噪声较小, 噪声性能良好, 但随着光纤长度的增加, 信噪比快速下降、噪声系数快速增加, 严重影响了系统的性能。DRBS 噪声与 ASE 噪声相比, 信噪比下降更快, 噪声系数增加更为明显, 因此, DRBS 噪声对系统影响更大, 在优化设计放大器时应考虑噪声对 RFA 性能的影响。



(a) 各信道SNR随光纤长度的变化



(b) 各信道NF随光纤长度的变化

图5 EYDFA/RFA 混合放大器各信道 SNR 及增益 NF 随光纤长度的变化

Fig. 5 Variation of SNR and NF of each channel of EYDFA/RFA hybrid amplifier with fiber length

根据以上仿真结果, 说明了在 1 530 nm~1 620 nm 的放大带宽内, 当放大器的系统增益达到饱和之后, 即使再增加泵浦功率, 增益也不再增加。同时, 由于噪声的存在使得对系统产生较大影响, 因此, 在优化设计放大器时应使用优化算法合理设置泵浦功率值, 找到达到饱和增益时的最大泵浦功率, 使混合放大器的性能达到最优, 并考虑噪声对 RFA 性能的影响。

4 结论

建立了二阶多泵浦分布式 EYDFA/RFA 模型, 为了优化二阶 EYDFA/RFA 混合放大器的增益以及平坦度, 设计了二阶混合放大器粒子群优化算法流程, 并制定了相应的适应度函数, 经过粒子群优化过程后, 得到了一个带宽 90 nm、增益 38.78 dB 的宽带高增益混合放大器, 增益平坦度仅为 1.1 dB, 工作区间覆盖 C+L 波段。同时也分析了二阶泵浦对其增益的影响, 以及当光纤长度增加时系统 ASE 和 DRBS 噪声的变化情况, 为混合放大器的设计和优化提供了参考。随着机载、车载以及舰载的各类光电成像系统的广泛应用, 该装置可以提高系统检测效率, 为光电成像系统设计、装配和性能提升提供计量保障, 具有广泛的使用价值。

参考文献:

[1] 吴舰. 浅析光纤通信传输的应用及发展方向[J]. 中国新通信, 2020, 22(17): 25-26.
WU Jian. Analysis on the application and development direction of optical fiber communication transmission[J].

- China New Telecommunications, 2020, 22(17): 25-26.
- [2] 胡庆旦. 对光纤通信元器件与模块技术发展趋势的思考[J]. 电子制作, 2015(1): 143-144.
- HU Qingdan. Thoughts on the development trend of optical fiber communication components and modules[J]. Practical Electronics, 2015(1): 143-144.
- [3] 刘毅, 郭荣荣, 易小刚, 等. 掺铒光纤Sagnac环掺铒光纤放大器增益平坦特性[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 988-994.
- LIU Yi, GUO Rongrong, YI Xiaogang, et al. Erbium-doped fiber amplifier gain-flatness of a Sagnac loop with an erbium-doped fiber[J]. Chinese Optics, 2020, 13(5): 988-994.
- [4] AWSAJ M K, GOKTAS H H, YUCEL M, et al. Gain and noise figure analysis of erbium doped fiber amplifier based on double pass configuration using forward pumping[J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, 2021, 1094(1): 012095.
- [5] 陈相玮. 少模掺铒光纤放大器的理论模型研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- CHEN Xiangwei. Research on theoretical model of few-mode erbium-doped fiber amplifiers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [6] GAUR C B, FERREIRA F, GORDIENKO V, et al. Experimental comparison of fiber optic parametric, Raman and erbium amplifiers for burst traffic for extended reach PONs[J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19362-19373.
- [7] KRZCZANOWICZ L, IQBAL M A, PHILLIPS I D, et al. High capacity wideband discrete Raman amplifiers: progress, challenges, and future prospects[C]//2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 19-23, 2020, Bari, Italy. USA: IEEE, 2020: 1-4.
- [8] HAMAOKA F, NAKAMURA M, OKAMOTO S, et al. Ultra-wideband WDM transmission in S-, C-, and L-bands using signal power optimization scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(8): 1764-1771.
- [9] 杨建虎, 戴世勋, 胡丽丽, 等. 光纤放大器应用及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2003(5): 33-38.
- YANG Jianhu, DAI Shixun, HU Lili, et al. Application and research progress of optical fiber amplifier[J]. Progress in laser and Optoelectronics, 2003(5): 33-38.
- [10] IONESCU M, LAVERY D, EDWARDS A, et al. 74.38 Tb/s transmission over 6300 km single mode fiber with hybrid EDFA/Raman amplifiers[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, San Diego, California. Washington D. C. : OSA, 2019: 1-3.
- [11] RENAUDIER J, ARNOULD A, LE GAC D, et al. 107 Tb/s transmission of 103 nm bandwidth over 3×100 km SSF using ultra-wideband hybrid Raman/SOA repeaters[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA. USA: IEEE, 2019: 1-3.
- [12] 张一弛. 远程光纤水听器系统中EDFA/FRA混合光放大技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- ZHANG Yichi. Research on the EDFA/FRA hybrid optical amplification in the remote optical fiber hydrophone system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [13] MAHRAN O. Study characteristics of 27 dBm Er/Yb co-doped/Raman hybrid amplifier (HA) compared to Er/Yb co-doped fiber amplifier only[J]. Optik, 2016, 127(18): 7092-7098.
- [14] 占生宝, 张杰, 王鹏, 等. 泵浦功率变化对EYDFA自动增益控制影响的研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1123-1127.
- ZHAN Shengbao, ZHANG Jie, WANG Peng, et al. Study on influence of pump power changes on automatic gain control of EYDFA[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(10): 1123-1127.
- [15] SHPOLYANSKIY Y A, KOZLOV S A, BESPALOV V G. Stimulated Raman scattering and four wave mixing with self-phase and cross-phase modulation of intense fs laser pulses[C]//Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 23-28, 1992, Baltimore, MD. USA: IEEE, 1992: 128.
- [16] WEN S, CHI Sien. Distributed erbium-doped fiber amplifiers with stimulated Raman scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(2): 189-192.
- [17] GONG Jiamin. The effect of SRS on signal power in single mode silica fiber in DWDM optical communication system with equally spaced channels[J]. Chinese Journal of Lasers B, 1999, B8(6): 51-54.
- [18] GONG Jiami. Analytical model of non-dispersion-limited transient stimulated Raman scattering in single-mode silica fiber in WDM optical communication system[J]. Chinese Journal of Lasers B, 1999, B9(2): 175-181.
- [19] 朱晓宁, 郑磊, 李巨浩, 等. 引入二阶泵浦后不同泵浦方式拉曼放大器性能比较[C]//全国集成光学学术会议, 2003.
- ZHU Xiaoning, ZHENG Lei, LI Juhao, et al. Performance comparison of Raman amplifiers with different

- pumping modes after introducing second-order pumping [C] // National Academic Conference on integrated optics, 2003.
- [20] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.
FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753.
- [21] 喻祥, 孙辉, 赵嘉, 等. 自适应多策略粒子群优化算法的研究综述[J]. 南昌工程学院学报, 2016, 35(3): 71-75.
YU Xiang, SUN Hui, ZHAO Jia, et al. Review on adaptive multi-strategy particle swarm optimization[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2016, 35(3): 71-75.
- [22] 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(5): 46-51.
GONG Jiamin, DING Zhe, LI Siping, et al. Research on broadband Raman fiber amplifier based on particle swarm optimization[J]. Study on Optical Communications, 2018(5): 46-51.
- [23] 朱梦. 基于改进粒子群算法的混合拉曼—掺铒光纤放大器增益平坦性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
ZHU Meng. An investigation on gain flatness of hybrid Raman-erbium doped fiber amplifier based on improved particle swarm algorithm[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.