

摘 要

当前密集波分复用技术 (DWDM) 已成为提高光纤通信系统传输容量最有效的技术, 掺铒光纤放大器 (EDFA) 由于其增益带宽等方面限制已难以满足 DWDM 需要, 而以传输光纤为增益介质的光纤拉曼放大器 (FRA) 由于具有可实现超宽带放大、增益波段由泵浦波长决定、能够进行分布式放大、噪声性能好等优点得到广泛关注, 日益成为研究热点。

由于单波长泵浦 FRA 的增益曲线很不平坦, 为获得更宽和更平坦的增益谱, 一般采用多波长泵浦, 并且需要优化设计 FRA 的泵浦配置。本文对宽带光纤拉曼放大器的泵浦配置做了研究。

首先, 基于经典的 Runge-Kutta 算法反复迭代求解 FRA 的功率耦合方程, 求解过程中综合考虑了信号衰减、信号光、泵浦光以及各种噪声之间的各种相互作用, 相比于其它求解方法, 该方法求解精度更高, 并且取得了较快的收敛速度。

其次, 应用粒子群优化算法 (PSO) 优化反向多波长泵浦 FRA 的泵浦波长和泵浦功率, 在改进优化算法的基础上, 仅仅应用 6 个泵浦波, 得到的增益带宽达 100nm , 最大增益波动小于 0.6dB 的拉曼平坦增益谱。与国内应用其它优化算法得到的结果相比, 无论增益谱宽度还是增益平坦度都处于较优状态。

最后, 研究了增益谱宽超过 100nm 的超宽带 FRA 的优化设计。一开始讨论了在宽带 FRA 优化设计中影响其增益平坦度的几个重要参数, 分析表明, 宽带 FRA 的增益带宽、增益大小以及增益平坦度三者存在制约关系, 设计中需要合理平衡三者关系; 接下来讨论了拉曼放大器的噪声特性以及抑制方法; 最终优化仿真中, 应用 12 个泵浦波, 优化设计得到了一种增益谱涵盖大部分 S 波段, 几乎全部的 C 波段和 L 波段, 平坦增益带宽 135nm 的超宽带 FRA。仿真结果表明, FRA 能够独立实现超宽带放大, 其增益带宽具有其它类型光放大器无法比拟的优势, 必将成为未来超宽带光放大器的一种重要选择。

关键字: 光纤拉曼放大器; 泵浦配置; 增益平坦; 粒子群优化; 超宽带

Abstract

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) is the most efficient technology which can improve the capacity of optical fiber communication system remarkably, and EDFA can not meet the needs of DWDM for its limited gain bandwidth. Meanwhile, another amplifier named FRA (Fiber Raman Amplifier) gradually moves into people's view. FRA is an amplifier based on transmission fiber, and it belongs to the hot area of current research because of its excellent features: an ultra-broad-band amplifier, can amplify any wave band with suitable pumps, distributed amplification, good noise feature etc.

The gain spectra of FRA with single pump are unevenness. In order to get the broader and more flat gain spectra, multiwave-pumping and optimizing the pumped lasers' wavelength and power are necessary. This paper studies pumps' scheme of broadband FRA.

Firstly, solve the propagation equation of FRA by using the classic Runge-Kutta arithmetic iteratively, and the analysis includes all the interactions of pumps, signals, noise without any approximation. Compared with other arithmetic, this method has better precision and convergence.

Secondly, use the PSO(Particle Swarm Optimization) optimizing the 6 pump lasers' wavelengths and power and make betterment, then a FRA with the gain ripple less than 0.6 dB in 100 nm gain spectra is obtained. The FRA's gain bandwidth and gain flatness are better than other domestic results.

Finally, the study's emphasis is laid on the ultra-broadband FRA. At first, three important parameters are investigated, and the results show that FRA's gain bandwidth, gain magnitude and gain flatness restrict each other and equilibrium is necessary for them. Then give a study of FRA's noise property and restraint methods. Finally, by optimizing 12 pumps' wavelengths and power, a FRA with flatness gain spectra of 135 nm which comprise the most part of S-band and nearly all of the C-band and L-band. The results show that FRA can be used as an ultra-broadband

amplifier independently, with the unique feature of gain spectra bandwidth, FRA becomes one of the most promising ultra-broadband amplifiers in future.

Key words: Fiber Raman Amplifier (FRA); Pumps' scheme; Gain flatness; PSO;
Ultra-broadband

缩 略 词

ASE	Amplification Spontaneous Emission (放大器自发辐射)
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing (粗波分复用)
DCF	Dispersion Compensation Fiber (色散补偿光纤)
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing (密集波分复用)
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier (掺铒光纤放大器)
FWHM	Full Width at Half Magnitude (半值全宽)
FRA	Fiber Raman Amplifier (光纤拉曼放大器)
GA	Genetic Algorithm (遗传算法)
GFF	Gain Flattening Filter (增益平坦滤波)
LWPF	Low Water Peak Fiber (低水峰光纤)
ZWPF	Zero Water Peak Fiber (零水峰光纤)
NF	Noise Figure (噪声指数)
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio (光信噪比)
PSO	Particle Swarm Optimization (粒子群算法)
SAA	Simulate Anneal Arithmetic(模拟退火算法)
SBS	Stimulated Brillouin Scattering(受激布里渊散射)
SIR	Signal Interference Ratio (信号干扰比)
SMF	Standard Single-Mode Fiber (标准单模光纤)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (信号噪声比)
SOA	Semiconductor Optical Amplifier (半导体光放大器)
SRS	Stimulated Raman scattering(受激拉曼散射)

第 1 章 绪论

1.1 研究光纤拉曼放大器的相关背景

二十一世纪是信息日益膨胀的时代,人们除了对传统的信息服务的需求越来越大外,越来越多的新的多媒体信息业务也加入进来,造成了信息通道的拥挤,甚至堵塞。相应的,作为长途干线通信主体的光纤通信一直朝着大容量、高速率、长距离的方向发展。应运而生的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术日益成为提高光纤通信系统传输容量最有效的技术。由于 WDM 技术可以更加充分的利用光纤通信的巨大带宽资源,从九十年代中后期开始在网络建设中开始大量应用,很快成为骨干网建设的首选技术。WDM 技术能取得如此的成功,光放大技术的支持必不可少^[1-3]。

在过去的十几年中,掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)取代了传统的光-电-光中继方式,实现了一根光纤同时传输多路放大的信号,大大降低了光中继的成本;并且 EDFA 容易与传输光纤耦合,增益高噪声低的优点,所以成功的应用于 WDM 系统,极大的提高了光纤的传输容量和传输距离,获得了巨大的成功。但是随着社会的发展,人们对传输容量的需求是有限度的,传统的 EDFA 在 $1.55 \mu\text{m}$ 窗口附近 C 波段 ($1530\text{-}1565 \text{ nm}$) 约 30 nm 的带宽就远远不能满足人们的需要了。石英光纤第三第四的低损耗窗口的 S 波段 ($1480\text{-}1520 \text{ nm}$), L 波段 ($1570\text{-}1610 \text{ nm}$) 甚至 S+波段 ($1450\text{-}1480 \text{ nm}$), L+波段 ($1610\text{-}1640 \text{ nm}$) 将近 200 nm 的带宽资源,是 EDFA 放大器无法应用的;并且随着光纤制造技术的进步,已经能够消除 $1.37 \mu\text{m}$ 处的吸收高峰,将来通信波段渴望扩展到 $1.2 \mu\text{m}$ 到 $1.7 \mu\text{m}$,这些都促使人们寻找更好的放大器来利用光通信丰富的频带资源。在这种情况下,光纤拉曼放大器(Fiber Raman Amplifier, FRA)应运而生。FRA 具有其他光放大器无法比拟的优势在于它具有在整个光纤波段提供放大的能力,并且随着泵浦激光的波长改变可以放大在 1270 nm 到 1670 nm 之间的任意波段,这可以充分利用光纤通信的带宽,并且 FRA 还具有可以分布放大和良好的噪声性能的优点,已经成为最具有应用前景的一种光放

大器。无论是和 EDFA 组成混和放大器 (EDFA+FRA) 还是独立的应用于密集波分复用系统 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM), 都显示了良好的性能^[38-40]。

传输容量最高的几个 WDM 试验系统均采用了拉曼放大技术。2000 年 3 月, OFC2000 会议上, 美国朗讯公司发布 3.28Tb/s--WDM 试验系统, 该系统速率 $3.28\text{Tb/s}=82\times 40\text{Gb/s}$ (C 波段 40 波分复用, L 波段 42 波分复用), 信道间隔 100GHz, 传输距离 300km, 中间两级放大; 2000 年 9 月, 德国西门子 OPTISPHER 网络公司又公布 7.04Tb/s--WDM 系统, 该系统传输速率 $7.04\text{Tb/s}=176\times 40\text{Gb/s}$, 传输距离 50km; 2001 年初阿尔卡特发布 10.24Tb/s--WDM 系统, 该系统速率 $10.24\text{Tb/s}=256\times 40\text{Gb/s}$ (C、L 两波段), 传输距离 100km, 采用了分布拉曼放大和残余边带技术及极化复用, 使频带利用率达 1.28bit/s/Hz; 2001 年 3 月, OFC2001 年会上, 日本 NEC 公司又发布了当前世界上最高记录, 该系统速率为 $10.92\text{Tb/s}=273\times 40\text{Gb/s}$ (采用 S、C、L 三个波段), 传输距离 117km, 采用了分布拉曼放大与集中光纤放大以及极化复用, 频带利用率 0.8bit/s/Hz。这证明了拉曼放大技术的重要性^[4,45-48]。

国内在光纤拉曼放大器的研究并且在实际工程中成功应用方面的佼佼者是在武汉邮电科学研究院。2002 年, 在完成国家“863 计划”拉曼放大器的研制任务后, 武汉邮电科学研究院下属的烽火通信集团下的武汉光迅科技公司在黑龙江通信公司佳木斯本地网 SDH 线路改造中, 成功实现了拉曼光纤放大器的工程应用, 揭开了拉曼放大器的国内工程应用的序幕; 2005 年下半年, 烽火通信开通了国内第一个 3.2T 系统工程“上海到杭州 $80\times 40\text{Gbit/s}$ DWDM 工程”, 其中关键技术之一是分布式拉曼放大技术。可以预见的是随着通信业务量的不断增长, 3G 新业务的逐渐展开, 超大容量的商用 DWDM 系统必将实现大规模应用, 而拉曼光纤放大器作为超大容量 DWDM 系统中关键技术之一, 也将越来越显示出其重要性。图 1-1 给出了烽火科技国内首个 3.2T 系统工程中拉曼放大器使用后对信号功率的改善情况, 可以看出, 拉曼放大器在光纤传输末端对光信噪比的提高是显著的。

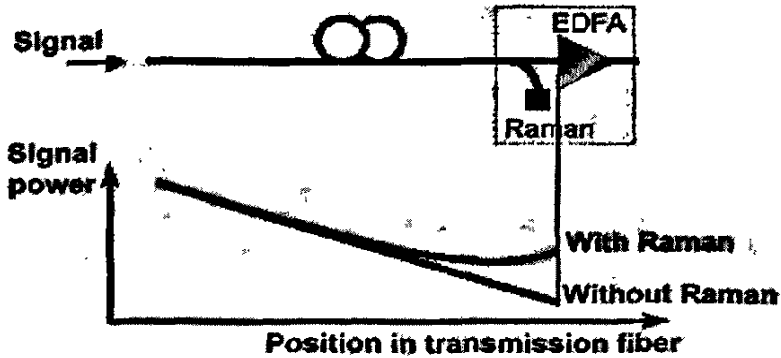


图 1-1 分布式拉曼光纤放大器在实际系统中的应用

Fig. 1-1 The project's application of distributed FRA

1.2 国内外光纤拉曼放大器泵浦配置研究相关介绍

放大器的增益平坦是 WDM 系统设计中十分重要的一项参数。增益平坦度对光信噪比 (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR) 有很大的影响, 特别是对于较长的干线链路影响更严重。放大器增益不一致不仅限制 OSNR, 还会导致 WDM 信道功率不一致, 强信道功率可能持续增长, 以致达到非线性阈值, 限制系统性能的提升, 更可能导致 WDM 信道解复用器的输出端的串话。所以在放大器设计时必须保证良好的增益平坦度。FRA 本身的增益曲线很不平坦, 实现增益平坦的 FRA 主要有两大类方法, 一是通过使用增益均衡器件即增益平坦滤波器 (Gain Flatten Filter, GFF) 来实现, 一是通过使用合理的泵浦配置设计, 使用多波长泵浦达到更宽和更平坦的增益。后一种方法由于功率损耗少的优点日益成为人们研究的一个热点, 具有非常重要的现实意义。

宽带拉曼放大器的泵浦配置主要涉及到泵浦方式, 泵浦波的数目, 泵浦波的波长和泵浦功率的选择问题。

泵浦方式主要有三种: 正向泵浦, 反向泵浦, 双向泵浦, 其中反向泵浦由于具有其他两种泵浦方式所没有的优点如泵浦噪声对 WDM 信道影响较小, 信号光的偏振不敏感等优点而被广泛应用。Ericsson 光网络实验室的 Berntson 等人的研究结果^[5]证实了这一点。

对于泵浦波的数目选择, 往往泵浦波的数目越多, FRA 的优化配置越困难,

当然也更容易得到更宽和更平坦的增益曲线。应用 BP 神经网络的研究方法表明^[19]：在增益平坦度确定的情况下，不同的增益带宽处，泵浦光数目存在下限值。

目前的研究热点放在对于给定一定数目的泵浦波数目，如何寻找有效的方法来找到最好的泵浦波长和泵浦功率，这是当前宽带 FRA 优化设计中的核心问题所在。FRA 泵浦波长和泵浦功率的优化主要有两种方法，一是凭借经验，通过模拟计算的结果手动调节泵浦波长和功率，这种方法比较耗费时间。二是通过利用各种优化算法，设计出一种有效的实用算法来寻找最好的泵浦配置，以达到增益谱平坦的目的。

国内外关于泵浦配置的优化算法很多，除了三大传统的优化算法：BP 神经网络算法，遗传算法 (Genetic Algorithms, GA)，模拟退火算法 (Simulate Anneal Arithmetic, SAA)，还有诸如筛选法，基于对多波长泵浦拉曼放大器的功率耦合方程做了大量简化后提出的算法等，都取得了不错的效果。Minhui Yan 等人应用模拟退火算法得到的优化结果为^[4]50 nm 增益带宽、平均增益 30 dB，增益波动为 2.6 dB；应用遗传算法也得到了在 80 nm 带宽内增益波动为 0.4 dB 的结果^[6]等。但 SAA 算法得到的增益平坦度不够好；筛选法用的是简化模型精确度有些欠缺；BP 神经网络算法对增益平坦度提升有限；遗传算法的实现比较复杂。目前理论上得到的最好结果是 Victor E P 在 83 nm 的增益带宽内增益波动为 0.05 dB^[1]，Natio.T 等人应用 5 个泵浦源得到了增益带宽达 136.6 nm，平均增益为 10.5 dB，增益波动为 2 dB 的结果^[7]。无论在增益平坦度还是增益带宽，平均增益方面都还有很多的提升空间，特别是光纤的巨大的带宽资源远远没有得到充分利用。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是 1995 年由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士等人提出的一种新颖的优化算法^[8]。同遗传算法一样，粒子群算法也是一种基于群体智能的，其相对于遗传算法的优势在于既简单实用又同样具有深刻的智能背景，既适合科学研究又适用于工程应用。PSO 同样可以应用于 FRA 的泵浦配置研究，可以预见，无论在扩展 FRA 的增益带宽方面还是在减小 FRA 的增益波动方面，PSO 都可以发挥其作用。本文采用 PSO 优化算法优化多波长泵浦拉曼光纤放大器的泵浦波长和泵浦功率，并且依据拉曼放大器自身的特点做了改进，得到了较好的优化结果。

1.3 论文组织结构

本文研究内容主要有三点，1) 应用 Runge-Kutta 反复迭代的方法求解多波长反向泵浦宽带 FRA 的功率耦合方程，研究如何改进运算速度以及求解精度，为下一步采用优化算法打下基础；2) 应用 PSO 及其改进算法，优化宽带拉曼放大器的泵浦波长和泵浦功率，使得 FRA 的增益带宽、增益平坦度达到比较好的结果；3) 考虑超宽带 FRA 的优化设计中的几个要素，在此基础上给出超宽带 FRA 的一种设计方案。

具体来说论文共分四章；

第 1 章 绪论。主要是介绍光纤拉曼放大器的背景知识以及国内外研究现状；

第 2 章 宽带光纤拉曼放大器的基础理论。主要介绍光纤拉曼放大器的基本理论，包括工作原理，基本结构，增益特性等；

第 3 章 宽带光纤拉曼放大器泵浦配置的优化设计。主要是进行宽带光纤拉曼放大器的泵浦配置的优化设计。本章首先给出宽带光纤拉曼放大器的数学模型，其次应用 Runge-Kutta 反复迭代的方法求解放大器的功率耦合方程，最后应用 PSO 算法及其改进算法优化放大器的泵浦波长和泵浦功率，得到了较好的优化结果；

第 4 章 超宽带光纤拉曼放大器的优化设计。主要探讨了超宽带拉曼放大器的优化设计问题，在讨论影响拉曼放大器增益平坦性的几个参数以及放大器噪声特性及其抑制方法的基础上，最后给出一种应用光纤拉曼放大器实现超宽带放大的一种设计方案。

最后是结论以及展望、致谢、参考文献、缩略词和攻读硕士学位期间发表的论文等。

第 2 章 宽带光纤拉曼放大器的基础理论

光纤拉曼放大器是利用受激拉曼散射 (Stimulated Raman scattering, SRS) 原理, 以光纤作为增益介质实现放大的全光放大器。本章介绍宽带光纤拉曼放大器的理路基础知识, 主要包括其工作原理、基本结构、增益特性等相关的放大器基本理论。

2.1 光纤拉曼放大器的工作原理

光纤拉曼放大器是利用 SRS 原理, 以光纤作为增益介质实现而实现的全光放大器^[9,10]。它主要是利用光纤中的受激拉曼散射效应实现能量从较高频率的泵浦光到较低频率的信号光的转换, 从而达到光放大的目的。当一束频率为 ω_p 的泵浦光入射到光介质上时, 散射光中含有与入射光频率的差仅仅取决于光介质分子特性振动频率的两种不同频率的光: 散射光 ω_s 和散射光 ω_a , 其中, $\omega_s < \omega_p$, $\omega_a > \omega_p$, 并且 $\omega_p - \omega_s = \omega_a - \omega_p$, 这种现象叫做拉曼散射。频率为 ω_p 和 ω_s 的散射光分别叫做 Stokes 波和反 Stokes 波。若入射是普通光束则发生普通拉曼散射, 这时反射光都是很微弱的非相干光, 可以向各个方向传播。当用强激光照射某些介质时, 由拉曼效应产生的散射光具有受激发射的性质, 因此称为受激拉曼散射。图 2-1 给出了受激拉曼散射的原理图, 泵浦光 ω_p 射入后, 产生了一个频率稍低的 Stokes 光 ω_s , 剩余能量以光学声子的形式被介质吸收。

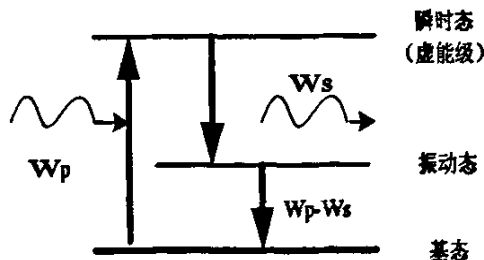


图 2-1 受激拉曼散射原理

Fig. 2-1 The principle of SRS

这是介质在强激光光场作用下产生的一种三阶非线性效应，光纤拉曼放大器就是利用受激拉曼散射而研制的一种光通信器件。也就是说，泵浦光频率为 ω_p ，产生的 Stokes 波频率为 ω_s ，当信号光的频率落在以 ω_s 为中心的增益谱线范围内时，信号光就可以得到放大。

在早期单模光纤的 SRS 试验中，Stolen 等人测得了石英光纤中的拉曼增益系数 g_R ，它一般与光纤纤芯的成分有关，对不同的掺杂 g_R 有很大的差别^[11]。图 2-2 给出的是熔融石英光纤的拉曼增益系数谱，其中泵浦波长为 $1\mu\text{m}$ 时， g_R 与频移的关系曲线。对不同的泵浦波长 λ_p ， g_R 与 λ_p 成反比。从图 2-2 可以看到，光纤中的拉曼增益谱有个很显著的特征： g_R 有很宽的频率范围，达到 40THz，并且在 13.2THz (440cm^{-1}) 附近有个较宽的主峰，这些特性是由于石英玻璃的非晶特性所决定的。在诸如熔石英这类的非晶材料中，分子的振动频率展宽成频带，这些频带交叠并且产生连续态。结果，与大多数介质材料在特定频率上产生拉曼增益的情况相反，石英光纤中拉曼增益可以在一段很宽的频率范围内连续产生，也正是由于这个原因，光纤可以用作宽带放大器。

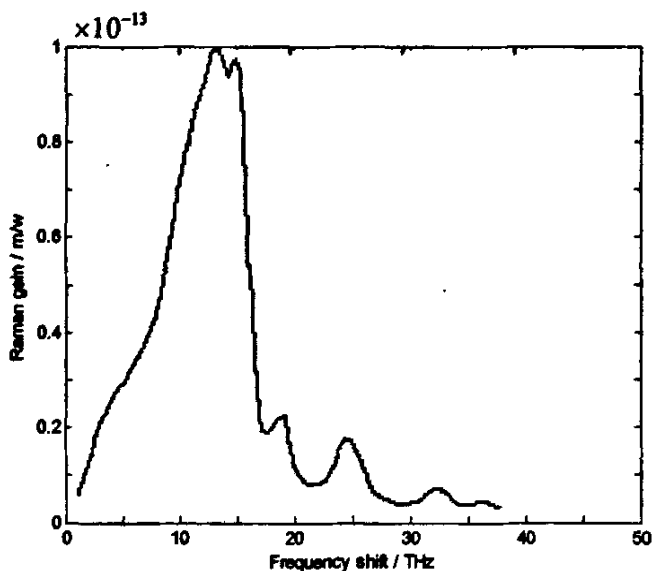


图 2-2 拉曼增益系数 g_R 与频移的关系

Fig. 2-2. Raman gain coefficient g_R of SMF at different frequency shift

人们已经对 SRS 进行了广泛的研究，在光纤中考虑泵浦波和 Stokes 波之间的相互作用，在稳态和连续波的情况下，Stokes 光强 I_s 和泵浦光强 I_p 的耦合过程遵循以下两个耦合方程：

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s \quad (2-1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{v_p}{v_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p \quad (2-2)$$

式中, v_p 、 v_s 分别是泵浦光和 Stokes 光的频率; α_p 、 α_s 分别式泵浦频率和 Stokes 频率在光纤上的损耗系数。

2.2 光纤拉曼放大器的基本结构

光纤拉曼放大器按照结构分可以分为分布式光纤拉曼放大器和分立式光纤拉曼放大器两种^[12]。

分布式光纤拉曼放大器直接用线路光纤作为放大器的增益介质, 所用的拉曼增益光纤比较长, 一般几十千米长, 泵浦源的泵浦功率可以降低到几百毫瓦, 并且常常和 EDFA 接合在一块使用。目前, 主要利用 DFRA 的低噪声, 低非线性特性等优点, 已经广泛应用于实验长途骨干 DWDM 光传输网络中, 并且已经开始实用化, 商用化, 并将逐步大规模商用。图 2-3 给出了分布式拉曼光纤放大器的示意图。

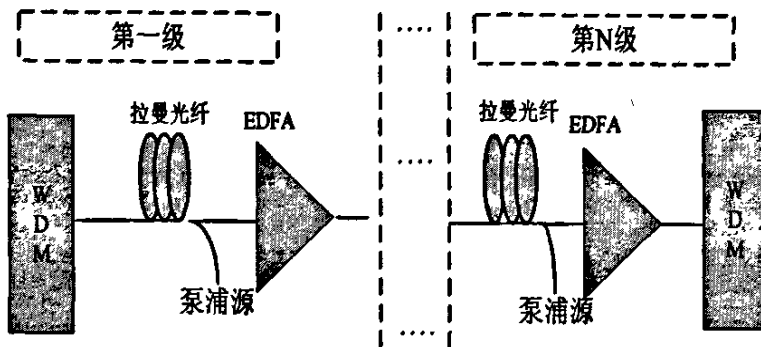


图 2-3 分布式光纤拉曼放大器的示意图

Fig. 2-3 The sketch map of distributed FRA

分立式光纤拉曼放大器一般采用增益系数较高的特种光纤 (如色散补偿光纤 DCF) 制成, 增益光纤长度比较短通常在十几千米以内, 泵浦功率要求比较

高，一般可以达到几瓦甚至更高，作为独立元件对信号光进行集总式放大，因此主要用来放大掺铒光纤放大器（EDFA）无法实现的波段的放大。图 2-4 给出了分立式拉曼光纤放大器的示意图。

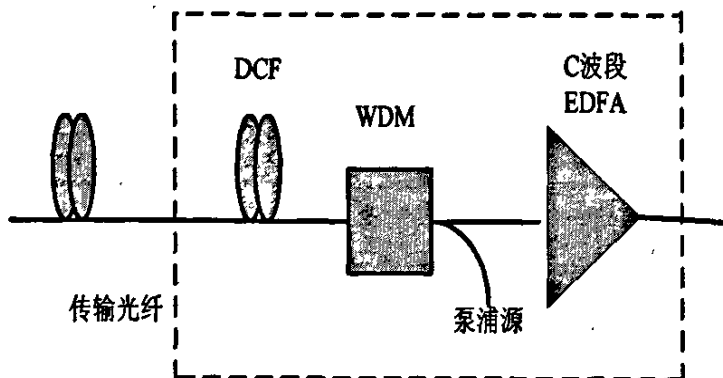


图 2-4 分立式光纤拉曼放大器的示意图

Fig. 2-4 The sketch map of discrete FRA

与分立式 FRA 相比，分布式 FRA 既能减少输入端高功率带来的光纤非线性效应，又避免了输出信号功率过小导致的 OSNR 的恶化，延长了传输距离，使得光信号在光纤中更加均匀的分布，已成为长距离光纤通信系统中的关键器件。本文以下讨论的都是分布式拉曼光纤放大器。

光纤拉曼放大器主要由泵浦源和放大器两部分组成。放大器主要由拉曼光纤和其他一些元件组成。

先说泵浦源。对泵浦源的要求是要有较高的输出功率，稳定的输出波长，可高的工作特性以及对偏振相关增益的抑制，最重要的是要有合适的输出波长。如放大 1300nm 窗口需要 1240nm 的泵浦波长，放大 C 波段，L 波段分别需要 1450nm 、 1480nm 的泵浦波长。对于宽带、超宽带光放大器，需要多个泵浦波的组合，目前已经有几种成熟的技术提供合适波长的高功率泵浦：一种是复用半导体激光器，另外一种为层叠式拉曼激光器。

复用半导体激光器光源用 WDM 合波器耦合在一起输出，以产生较大的输出功率和较宽的增益带宽，并且抑制受激布里渊散射^[10] (Stimulated Brillouin Scattering, SBS)。为使泵浦稳定高效，泵浦激光器应该具有窄且稳定的光谱。

层叠式拉曼激光器式是目前应用较广泛的技术，相比于复用式泵浦源，它具有功率利用率高，输出功率高，结构简单易于实现，增益高等优点。所谓层

叠式就是利用已有的较低波长激光器逐级泵浦下一级 Stokes 波直至获得合适波长的高功率 Stokes 输出。

再看泵浦方式。泵浦方式有三种：正向泵浦、反向泵浦、双向泵浦三种。正向泵浦是一种信号光和泵浦光以同一方式从光线输入端注入的结构，也称前向泵浦；反向泵浦是一种信号光和泵浦光以相反的方向注入光纤的结构，也称后向泵浦；双向泵浦是正向和反向同时泵浦的一种结构。图 2-5 给出了一个较完整的采用反向泵浦 FRA 的简图。

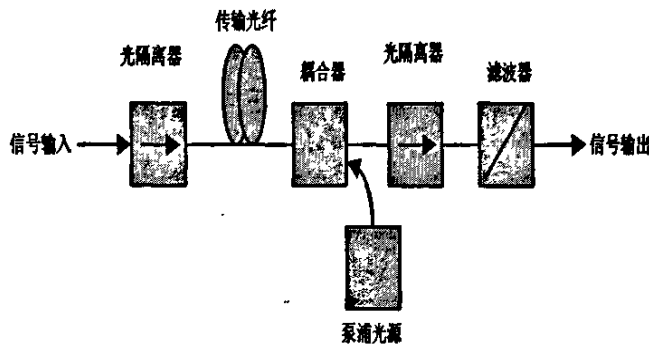


图 2-5 反向泵浦光纤拉曼放大器的结构详图

Fig. 2-5 The particular configuration of FRA with backward pump

由于拉曼受激散射的荧光寿命非常短，拉曼增益对泵浦功率的响应是瞬时的，因此泵浦功率的脉动将引起增益的变化，从而对信号来说是一种串扰，或者说是一种噪声。如果采用正向泵浦，泵浦噪声将严重的影响 WDM 信道。如果采用反向泵浦，这种串扰就会大大减小，因为拉曼泵浦功率的波动在整个光纤长度上被光信号的传播时间平均掉了^[13-15]。另外，采用反向泵浦的拉曼放大器的偏振态相关增益小，在实际应用中最为广泛。

对于拉曼光纤，它是拉曼放大器的增益介质，拉曼增益系数取决于光纤本身的性质，当然也随泵浦波长变化。在泵浦功率一定的情况下，减小光纤的损耗和有效面积，提高拉曼增益系数，有助于提高拉曼放大器的增益，此外在光纤中掺杂也是提高光纤拉曼增益系数的很有效的方法。例如在石英光纤中掺入不同浓度的 Ge 元素，可以将增益提高数倍；色散补偿光纤（DCF）由于其纤径小，其增益系数比普通的单模光纤高好几倍。

此外 FRA 还有多种无源器件，主要有泵浦光/信号光波长耦合器、隔离器、

合波器等。

2.3 光纤拉曼放大器的增益特性

光纤拉曼放大器的增益特性我们主要是指增益饱和特性和增益带宽特性，下面将分别说明。

2.3.1 增益饱和特性

先看增益饱和特性。在拉曼放大过程中，信号光通过 SRS 增益从泵浦光得到能量而被放大同时又被光纤吸收而衰减；而泵浦光通过 SRS 过程将能量转移给信号光，而衰减同时亦被光纤吸收而衰减，这两种过程同时存在。拉曼放大器的增益一般从两个方面考虑，大多数情况下，在传输光纤中输入泵浦光在拉曼放大器抵消光纤损耗的情况下，以泵浦光有无引起输出信号功率的变化来定义增益，这种增益叫做开/关增益。增益同样可以定义为输出信号功率与信号功率之比，称为净增益。因此两种增益的关系是：开/关增益 (dB) = 净增益 (dB) + 光纤损耗 (dB)。

如前面所说，在连续波情况下，对方程 (2-1)、(2-2) 稍做改动，泵浦光和斯托克斯波的相互作用可用下列耦合方程来描述^[23]：

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_R}{a_p} P_p P_s - \alpha_s P_s \quad (2-3)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{g_R}{a_s} P_p P_s - \alpha_p P_p \quad (2-4)$$

式中， ν_p 、 ν_s 分别是泵浦光和 Stokes 光的频率； a_p 、 a_s 分别为泵浦光和信号光的横截面； P_p 、 P_s 分别为泵浦光和信号光的光功率； α_p 、 α_s 分别式泵浦频率和 Stokes 频率在光纤上的损耗系数； g_R 为光纤拉曼增益系数。

为了简化分析，仅考虑连续波泵浦时的增益特性。首先考察小信号放大特性，这时可忽略式 (2-4) 中右边泵浦消耗一项，近似认为泵浦功率传输过程中仅受光纤损耗而指数衰减。因此 FRA 的小信号增益 (开/关增益) 可以写成：

$$G_A = \frac{I_s(L)}{I_s(0)\exp(-\alpha_s L)} = \exp(g_R P_0 L_{eff} / A_{eff}) \quad (2-5)$$

当输入信号功率增大, 泵浦功率转移给信号而产生的消耗不可忽略时, 泵浦功率在传输过程中不断衰减, 信号光的放大速率受到限制, 放大过程就出现了饱和现象。假定 $\alpha_p = \alpha_s$, 则可以推出饱和增益的近似表达式为:

$$G_s = \frac{1 + \eta_q}{\eta_q + G_A \exp[-(1 + \eta_q)]} \quad (2-6)$$

式中 η_q 为量子效率:

$$\eta_q = \frac{\nu_p p_s(0)}{\nu_s p_p(0)} \quad (2-7)$$

当 $\eta_q G_A \approx 1$ 时, 增益降为原来的一半 (3 dB), 此时信号功率接近输入泵浦功率。所以泵浦功率 $p_p(0)$ 实际上能代表饱和输出功率。

2.3.2 增益带宽特性

拉曼放大器很突出的一个优点就是它的任意波段宽带放大特性。理论上只要有相应的泵浦光波就可以对任意信号光放大, 这是因为熔融硅光纤属于非晶玻璃, 其分子振动能级融合在一起形成能带, 因而可以在较宽频差范围内通过激拉曼散射实现信号光的放大。拉曼增益参数峰值带宽在 $350-500 \text{ cm}^{-1}$ 之间, 折算成频率约有 5THz 带宽; 更为关键的是只要能找到合适的与信号光具有 Stokes 频差的泵浦光就能对任意信号光进行放大, 采用多个波长的泵浦组合就可以构成带宽超过 100nm 的宽带放大器^[16,48]。

在拉曼放大增益均衡技术方面, 长周期光纤光栅是一种比较理想的宽带宽的增益均衡器件。根据 OFC2000 的报道, 目前已经有成功利用长周期光纤光栅做增益均衡器件实现了 70nm 带宽内增益起伏不超过 1.27 dB 的宽带拉曼光纤放大器的试验。

采用多泵浦时对泵浦之间的相互作用也必须进行考虑, 适当安排泵浦功率

和波长间隔是宽带拉曼光纤放大器的重要技术要求之一。

2.4 小结

基于上述的几点特性，目前关于拉曼放大器应用于宽带放大的报道很多，总结起来主要有三种情况：一是拉曼放大器独立使用，采用多波长泵浦，形成宽带放大；二是拉曼放大器和 EDFA 构混合放大器，再加上增益均衡器平坦增以获得高增益的宽带放大；三是用拉曼放大器制成有源无损器件或动态均衡件。本文主要讨论的是拉曼放大器的第一种应用，采用多波长泵浦，研究如通过合理的泵浦配置，进行宽带甚至超宽带放大。

第 3 章 宽带光纤拉曼放大器泵浦配置的优化设计

为了充分利用拉曼放大器的带宽优势,采用多波长反向泵浦方式实现宽带甚至超宽带拉曼放大是一种很好的方法。它的优点是设计灵活,通过适当地调整泵浦光的波长和功率,就可得到某一带宽内平坦的拉曼增益,而且不需要任何增益均衡器件;同时,因为采用多个泵浦光源一起泵浦,降低了对单个泵浦光源的功率要求,因此它可以说是一种适应于未来密集波分复用系统(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)的较为理想的超宽带光放大技术。实现这种拉曼放大器的关键技术之一在于设计优化算法,以找到满足给定带宽和平坦度要求的泵浦光配置。

本文之所以采用反向泵浦而非正向泵浦,主要是正向泵浦带来的信号光和泵浦光的串扰较大,噪声性能较差,反向泵浦可抑制泵浦诱发的高频偏振和强度噪声,对于普通单模光纤和色散位移光纤,反向泵浦带的串扰带宽要比正向泵浦低 4 个量级^[17]。

在多波长泵浦的拉曼放大器中,由于存在泵浦光之间以及信号光之间的能量耦合,使得用来描述受激拉曼散射效应的能量耦合方程是一个高度非线性的 N (信号光与泵浦光的总个数) 维一阶非线性微分方程组。因此,通常的优化算法难以实现上述泵浦光优化过程,或者实现起来效率很低。本章节介绍了一种较为有效的泵浦光优化算法,算法包括两部分:即 Runge-Kutta 反复迭代算法和改进的粒子群优化算法。文中对算法的具体设计过程做了详细叙述,该算法可以自动完成泵浦光优化过程,不需要任何的人为调整。数值仿真结果表明:在仅仅应用 6 个泵浦光波的情况下,该算法可以得到增益带宽 100 nm (1510-1610 nm),增益起伏为 0.6 dB 的优化结果^[18]。

对拉曼放大器耦合方程组的数值求解是进行上述优化过程的前提,因为只有求解了拉曼放大器的功率耦合方程组,我们才可以知道某一组泵浦光泵浦时的信号光增益起伏情况,而优化算法要做的是找到一组特定的泵浦光配置,使得增益波动小于一给定值。

3.1 多波长泵浦光纤拉曼放大器的数学模型

本节主要是引入多泵浦、多信道的光纤拉曼放大器的数学模型，并且讨论了模型中涉及的几个重要参数。

3.1.1 多波长泵浦光纤拉曼放大器的数学模型

多泵浦、多信道的光纤拉曼放大器的数学模型仿真是比较复杂的，它涉及泵浦光到信号光、泵浦光之间、信号光之间的拉曼增益过程，还包括放大器自发辐射（ASE）噪声、热噪声，以及后向瑞利散射的放大过程。更精确的模型还考虑了受激布里渊散射、高阶斯托克斯波和反斯托克斯波的产生等非线性效应。一般情况下，后述的几种影响可以忽略，多泵浦光纤拉曼放大器的功率耦合方程可表示为^[19]：

$$\begin{aligned}
 \frac{dP^{\pm}(z, \nu)}{dz} = & \mp \alpha(\nu) P^{\pm}(z, \nu) \pm \gamma(\nu) P^{\mp}(z, \nu) \pm P^{\pm}(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{K_{eff} A_{eff}(\xi)} [P^{\pm}(z, \xi) + P^{\mp}(z, \xi)] \\
 & \pm h\nu \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{eff}(\xi)} [P^{\pm}(z, \xi) + P^{\mp}(z, \xi)] \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(\xi - \nu)/(kT)] - 1} \right\} \Delta\nu \\
 & \mp P^{\pm}(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{\nu}{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{eff}(\nu) K_{eff}} [P^{\pm}(z, \xi) + P^{\mp}(z, \xi)] \\
 & \mp 2h\nu P^{\pm}(z, \nu) \sum_{\xi} \frac{g_R(\nu - \xi)}{A_{eff}} \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(\nu - \xi)/(kT)] - 1} \right\} \Delta\nu
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

式中， ν 、 ξ 分别代表信道及泵浦的频率， $P^{\pm}(z, \nu)$ 代表正反向不同频率的功率， α 代表光纤对信号的损耗系数， γ 代表后向瑞利散射系数， $g_R(\nu - \xi)$ 代表短波长到长波长的拉曼增益系数， K_{eff} 是泵浦光和信号光之间的偏振因子， A_{eff} 为拉曼光纤的有效面积， h 、 k 、 T 分别为 Planck 常量、Boltzman 常量和光纤的绝对温度， $\Delta\nu$ 代表等效自发辐射带宽。由于 FRA 的宽带增益谱和很宽的泵浦波长范围，为尽量减小模拟误差，应将式 (3-1) 式中每个参量都与频率建立关系，这样计算误差比较小。

在这个方程里，等号右侧共包含六项，第一项为光纤损耗，第二项描述瑞

利后向散射的影响，第三项为短波长信道提供的拉曼增益，第四项描述了自发拉曼散射噪声和自发热噪声的产生，最后两项考虑了长波长信道以及放大自发辐射的拉曼消耗。

3.1.2 多波长泵浦光纤拉曼放大器数学模型中参数的讨论

在多泵浦 FRA 的设计过程中，有几个参数对 FRA 数学模型的影响比较重要，下面着重讨论。

首先是光纤衰减系数。当光信号在光纤中传播时，其功率随着距离的增加以指数形式衰减。如果在起始处 ($z=0$) 处的信号光功率为 $P(0)$ ，则在光纤中经过距离 z 的传播后，其功率值 $P(z)$ 为：

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha_p z} \quad (3-2)$$

其中，泵浦光的衰减系数 α_p 为：

$$\alpha_p = \frac{1}{z} \ln \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right] \quad (3-3)$$

其单位为 km^{-1} 。为了简便起见，在计算光纤中的信号衰减时，衰减系数的单位一般使用分贝每千米 (dB/km)，使用这种单位的衰减系数用 α 来表示，则可以得到以下的关系式：

$$\alpha (dB/km) = \frac{10}{z} \log \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right] = 4.343 \alpha_p (km^{-1}) \quad (3-4)$$

光信号在光纤中传输时，由于吸收、散射和波导缺陷等机理产生功率损耗，从而引起衰减。吸收是由于光纤中的纯 SiO_2 材料引起的内部吸收和杂质引起的外部吸收。散射主要是由瑞利散射引起的。瑞利散射是由于在光纤制造过程中材料密度的不均匀性产生的，它将导致折射率的起伏，使光向各个方向散射。瑞利散射损耗与波长成 $1/\lambda^4$ 的关系，因而其主要作用在短波长区。由于这种损耗对光纤来说是其本身固有的，因而它确定了光纤损耗的最终极限。美国朗讯公司首先推出的这种新型单模光纤，它是采用一种新的生产制造技术，基本消除了 OH^{-1} 离子 $1383 nm$ 附近处的“水吸收峰”，使光纤损耗完全由玻璃的本征损

耗决定, 在 1280~1625 nm 的全部波长范围内都可以用于光通信, 现在包括阿尔卡特、长飞、法尔胜等国内外众多厂家都推出了自己的全波光纤。

光纤的衰减系数是影响光纤拉曼放大器设计的重要参数, 同一光纤对不同波长信号的衰减系数是不同的, 所以衰减系数的差异在拉曼放大器的数学建模过程中是不能忽略的。本文在行拉曼放大器的数值仿真时, 考虑了不同波长的光信号的对应不同的衰减系数。

再看拉曼增益系数。如前一章所述, 拉曼增益系数用可以用 $g_R(\Omega)$ 表示, 其中, Ω 表示泵浦波和斯托克斯波的频率差。 $g_R(\Omega)$ 是描述受激拉曼散射的最重要的量, 与三阶非线性极化率的虚部有关。前面已经提到, 它的大小与掺杂成分和掺杂浓度有关。在第二章中, 图 2-2 给出了熔石英的拉曼增益谱, 以频移为横坐标, 峰值在 13.2THz 左右。

在实际系统中, 通常综合考虑拉曼增益系数 g_R 和光纤有效面积 A_{eff} 的作用。可以测量出与不同波长相关的拉曼增益率 g_R/A_{eff} :

$$g_R/A_{eff} = \frac{\ln G_A}{P_0 L_{eff}} \quad (3-5)$$

其中, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$, G_A 是拉曼放大器增益, P_0 是拉曼放大器输入端的泵浦功率, L_{eff} 是拉曼放大器的长度, α_p 是泵浦波的衰减系数。

3.2 多波长泵浦 FRA 数学模型即功率耦合方程的求解

为了克服泵浦波引起的信号串扰, 在实际应用中, 拉曼放大器大都采用反向泵浦的结构以减小波动的影响。反向泵浦的拉曼放大器的特性可以由包含多泵浦、多信道、放大器自发辐射、后向瑞利散射传输演化以及相互作用的拉曼功率耦合方程 (3-1) 来描述。这是一个两点多边值的常微分方程组, 采用传统积分法求解需要耗费大量的计算时间。为此, 人们提出了多种实用的算法, 比如平均功率分析算法、打靶法等等。这些算法大多数是通过简化功率耦合方程, 计算精度不高, 并且收敛性能不够好。本文期望找到一种既能保证较高的精度, 全面考虑光纤拉曼放大器的各个设计因素, 又能较快收敛, 达到较高的计算精度的算法。

本小节中，我们基于经典的 Runge-Kutta 算法，应用反复迭代控制精度的方法求解拉曼放大器的功率耦合方程。求解中全面考虑了方程中的各个因素，并且可以控制计算精度，能较快的收敛，达到了较好的效果，这种算法适于求解拉曼放大器耦合方程的两点多边值问题。

3.2.1 已有数值求解方法

反向泵浦拉曼功率耦合方程的求解是一个双边值问题。已有算法主要有平均功率分析算法、打靶法等等，下面分别介绍。

先看平均功率分析算法^[6]。由于拉曼放大器所使用的光纤长度较长，以及多个泵浦形成的较宽的带宽，采用直接积分拉曼放大器功率耦合方程的方法需要耗费大量的计算时间来达到较好的精度，甚至是不可能完成的。在半导体放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) 和 EDFA 的性能仿真中，使用平均功率法可以避免数值积分，把这种思想应用到拉曼放大器的数值仿真中，同样可以很好的提高计算效率。平均功率分析算法就是基于这样的考虑。

我们使用光纤拉曼放大器简化的功率耦合传输方程：

$$\frac{dP^{\pm}(z, \nu)}{dz} = \pm C(z, \nu)P^{\pm}(z, \nu) \quad (3-6)$$

平均功率法的基本思想是：将放大器的光纤长度分成级联的 N 小段，在每一小段上认为各个频率的信号或泵浦的增益与距离 z 无关。因此，在每一小段上放大后的输出功率为：

$$P_{out}^{\pm} = P_{in}^{\pm} G(z, \nu) \quad (3-7)$$

其中增益系数定义为： $G(z, \nu) = \exp[C(z, \nu)\Delta z]$ 。这样，利用平均功率分析求出每段上正反向的输出功率，并且使得在各小段上乃至整个传输光纤上的边界条件和收敛条件都满足，就可以得到方程组的近似解，而且能够保证足够的精度。由于复杂的数值积分被每一段简单的迭代计算所代替，所以计算速度大大提高。当然分段越多，可以达到的计算精度越高，但同时计算的时间开销也越大，

再来看打靶法^[20]，在该方法中，我们任意选择一个端点开始计算，为了论

述的方便,我们从 $z=0$ 开始计算,在 $z=0$ 时已知的 $P^+(z,i)$,其初始值就取已知值,对于在 $z=0$ 处未知的 $P^-(z,i)$,我们可以随机猜测一个值 $P'^-(z,i)$,然后,我们用Runge-Kutta法积分该微分方程,一直到达 $z=L$ 。当然,一般来说,我们得到的 $P^-(L,i)$ 和我们已知的 $P^-(L,i)$ 会有差别。这样,该微分方程就被转化为多维方程求根问题:如何调节随机选择的参数,使得 $P^-(L,i)$ 和我们已知的 $P^-(L,i)$ 之间的差为0。在起点 $z=0$ 处,我们指定 N 个 $P^+(z,i)$ 值,但只有 N_1 个是已知的。因此,有 $N_2=N-N_1$ 个是未知的,需要我们随机选择。我们随机选择的未知参数可以看作一个 N_2 维的矢量 V 。给定一个矢量 V ,我们积分该微分方程,这样 $P^-(L,i)$ 和我们已知的 $P^-(L,i)$ 之间的差就构成了另外一个 N_2 维的矢量 F 。这样,我们所要作的工作就是寻找一个矢量 V ,使得矢量 F 的所有分量等于零。可以用全局收敛牛顿法求解这个方程。

全局收敛牛顿法的步骤如下:

首先求解 N_2 个线性方程组: $J\delta V = -F$,然后将解出的修正值回代入方程 $V^{new} = V^{old} + \delta V$,其中 J 是雅克比矩阵,由下式确定: $J_{ij} = \partial F_i / \partial V_j$ 。

当然这些偏微分不能用解析方法计算,因此每个偏微分需要单独积分 N 个常微分方程,然后按照下式计算:

$$\frac{\partial F_i}{\partial V_j} \approx \frac{F_i(V_0 \dots V_j + \Delta V_j \dots) - F_i(V_0 \dots V_j \dots)}{\Delta V_j} \quad (3-8)$$

最后再将修正后的 V^{new} 带入 $V^{new} = V^{old} + \delta V$ 式,重复上述计算过程,直到满足收敛条件。打靶法的一个周期需要积分 N 个耦合的常微分方程 N_2+1 次。一次是为了计算当前的偏差值,另外 N_2 次是为了计算偏微分,开始新一次的循环又需要积分 N_2+1 次。打靶法计算过程相当繁杂。

3.2.2 反复迭代 Runge-Kutta 算法

反复迭代Runge-Kutta算法全面求解光纤拉曼放大器传输方程的方法的优点是求解中不作任何假设近似,综合考虑了泵浦、信号、噪声在传输过程中的相互作用。该方法推导过程简单,计算速度较快,能达到较高的精度要求,且有助于深入理解光纤拉曼放大器中各种效应在传输过程中的相互影响^[21]。采用此

方法成功地在 100 nm 带宽上求得信号增益, 取得了较好的效果, 同时给出了泵浦功率在光纤传输线上的分布, 进而可以给出各个波长上的噪声指数。

为了能应用这种方法, 首先将方程 (3-1) 改写成:

$$\frac{dp^{\pm}(z, \nu_i)}{dz} = F[z, \nu_i, p^{\pm}(z, \nu_i)] \quad (3-9)$$

式中 $F[z, \nu_i, p^{\pm}(z, \nu_i)]$ 就是方程 (3-1) 的右边部分, 把传输光纤分成很多段, 假设每一段的长度为 Δz , 则利用 Runge-Kutta 迭代思想可以得到下面的公式:

$$p^{\pm}(z \pm \Delta z, \nu_i) = p^{\pm}(z, \nu_i) \pm (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta z / 6 \quad (3-10)$$

其中:

$$k_1 = F[z_0, \nu_i, p^{\pm}(z_0, \nu_i)] \quad (3-11)$$

$$k_2 = F[z_0 \pm \Delta z / 2, \nu_i, p^{\pm}(z_0, \nu_i) \pm k_1 \Delta z / 2] \quad (3-12)$$

$$k_3 = F[z_0 \pm \Delta z / 2, \nu_i, p^{\pm}(z_0, \nu_i) \pm k_2 \Delta z / 2] \quad (3-13)$$

$$k_4 = F[z_0 \pm \Delta z, \nu_i, p^{\pm}(z_0, \nu_i) \pm k_3 \Delta z] \quad (3-14)$$

这里考虑的是只有反向泵浦的情况。在计算泵浦功率分布时, 从泵浦输入端出发以泵浦的初始输入值作为初始迭代值, 以 Δz 为步长一步一步反方向迭代计算出各个位置的泵浦功率值; 同样计算信号功率沿光纤分布时也是从信号输入端开始, 以信号的初始功率值作为初始迭代值一步一步迭代下去。迭代过程中计算某个点的功率值就以其上一点的功率值作为初始值 $p^{\pm}(z_0, \nu_i)$ 。 Δz 值的选取一般不能取得太大, 否则精度不高, 但也不能取得太小, 那样会消耗很多计算时间, 影响速度。在每一小段 Δz 内, 假设各个信道的衰减是一个常数, 并采用广义衰减系数:

$$\alpha(z_0, \nu_i) = \frac{F[z_0, \nu_i, p^{\pm}(z_0, \nu_i)]}{p(z_0, \nu_i)} \quad (3-15)$$

这样在求 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的值时, 需要代入的其他信道在 $(z_0 \pm \Delta z)$ 的功率值, 可以从其初始值出发乘以 $\exp[\pm \alpha(z_0, \nu_i)\Delta z]$ 就可以了。

反向泵浦的拉曼方程属于边值问题, 比较常用的方法有打靶法, 但是它对初始值的选择值依赖比较大, 初始值选得合适收敛较快, 反之收敛较慢甚至不收敛。本文采用下面的迭代步骤: 先计算泵浦光沿着光纤反向传输不考虑信号

造成的衰减, 泵浦光在传输过程中只受到光纤的衰减, 记录下泵浦光沿光纤的分布。接下来计算信号的正向传输, 这时候光纤中已经有了泵浦功率的分布, 因此光在传输过程中不仅会受到光纤造成的衰减而且还会受到泵浦光产生的增益而放大。利用前面记录下来的泵浦光的功率分布求出信号光沿着光纤的功率分布。接着继续计算泵浦光的反向传输, 这时候光纤中已经有了信号光的分布, 所以要考虑信号对泵浦造成的衰减, 这样得到了又一个泵浦沿着光纤的功率分布。把两次的结果作一次加权平均, 继续计算信号时用该加权平均的泵浦分布代入计算, 这样反复迭代直到精度达到要求为止。这个称作“权重因子”的参数代表每一步计算中的“残余”作用在总的记录功率中所占的比重。如果这个参数设得太大了, 将会增加迭代的次数; 而设得太小了又会出现不收敛或者达不到精度的要求。可取经验值 $1/6$ 时, 一般经过7次以内迭代就能够达到精度为 10^{-4} 的结果。下图是具体给出了一个实例, 计算中光纤损耗系数如图3-1所示, 瑞利散射系数如图3-2所示。

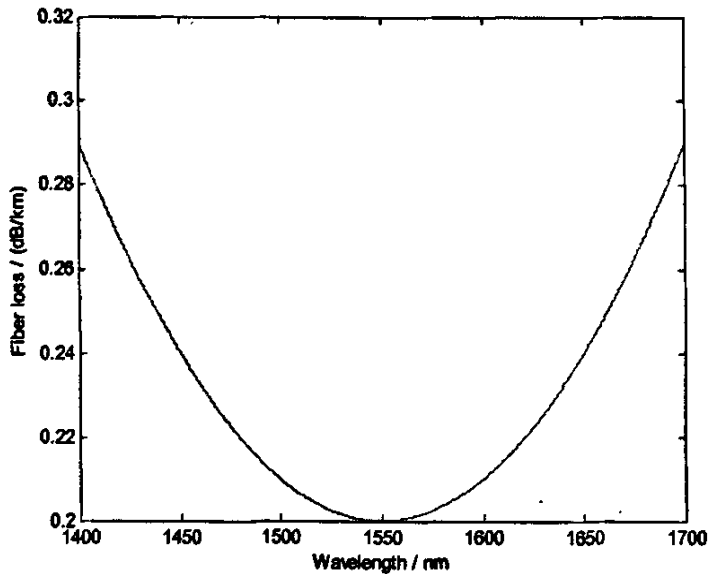


图 3-1 拉曼光纤的损耗系数

Fig.3-1 Raman fiber's attenuation coefficient

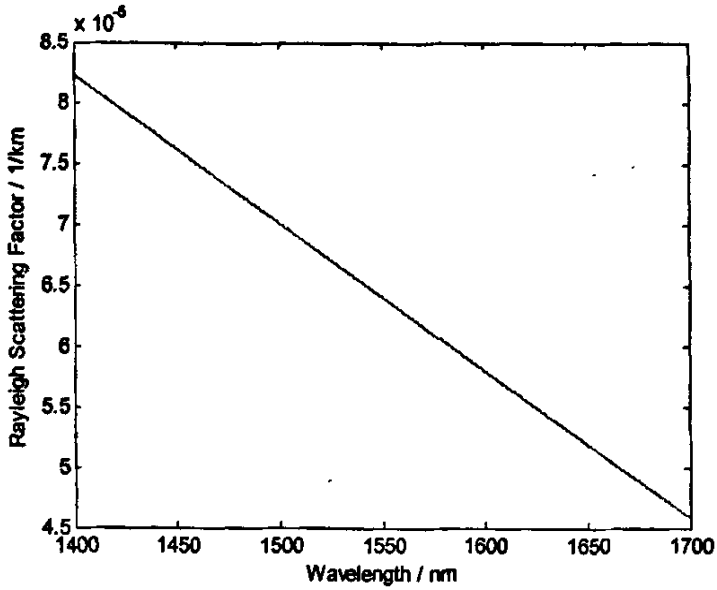


图 3-2 光纤瑞利散射系数

Fig.3-2 The graph of Rayleigh scattering factor

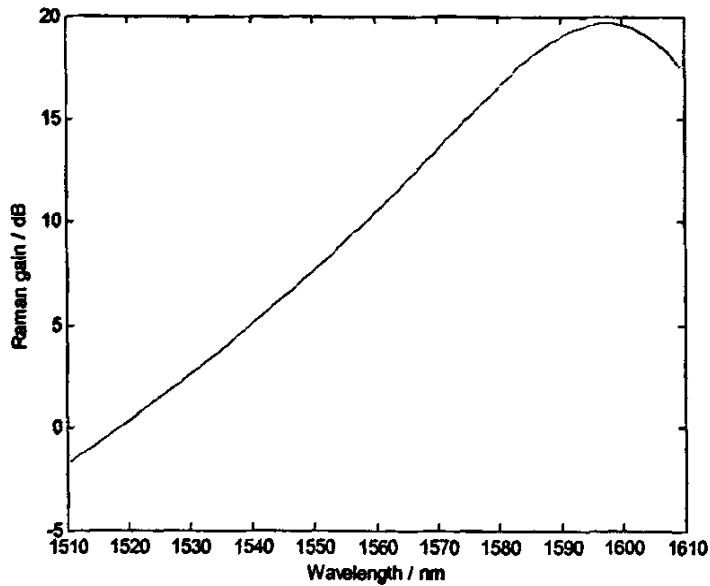


图 3-3 Runge-Kutta 算法得到的拉曼增益谱

Fig.3-3 Raman gain spectra by Runge-Kutta arithmetic

对于应用6个泵浦波反向泵浦拉曼光纤放大器，设置100个信号波，增益带宽为100 nm，信号波间隔1 nm，泵浦波长分别为1405 nm、1425 nm、1445 nm、

1465 nm、1485 nm、1505 nm，泵浦功率设置为500mw。图3-3给出了其计算得到的增益谱，图3-4给出了泵浦功率的光纤演变情况。这种计算方法收敛速度很快，在数秒内就能得到数值结果。由图3-3可以看出没有优化过的拉曼增益谱很不平坦，而由图3-4可以看出，越短波长的泵浦光功率消耗越快。

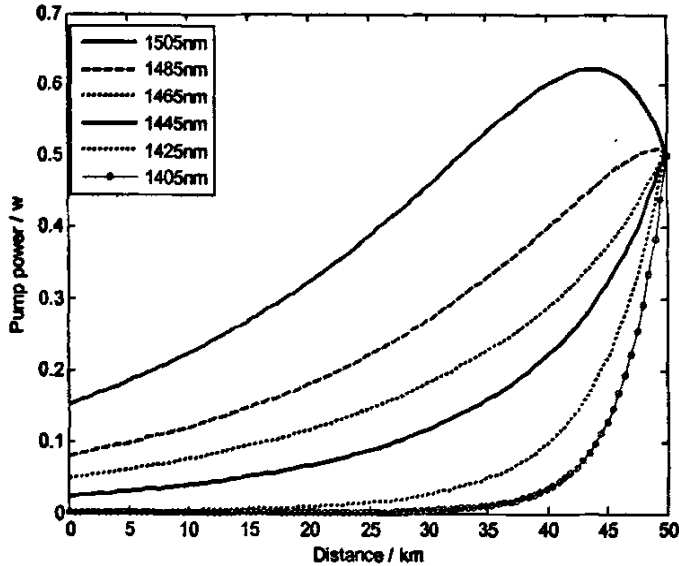


图 3-4 Runge-Kutta 算法求得的泵浦功率演变图

Fig.3-4 The pump power's evolution by Runge-Kutta arithmetic

3.3 宽带多波长反向泵浦 FRA 泵浦波长和泵浦功率的优化

多波长反向泵浦方式是实现宽带拉曼放大的一种好方法，其优点是设计灵活，通过调整泵浦光的波长和功率，可以得到某一带宽内较为平坦的拉曼增益，无需任何增益均衡器件；而且，由于采用多个泵浦源，降低了对单个泵浦源的功率要求。实现这种拉曼放大器的关键在于设计优化算法，即如何更好的配置各种参量特别是泵浦功率和泵浦波长，从而得到高增益宽带的平坦增益曲线。从理论上来说，正确选择足够多的泵浦光的波长和功率可以获得任意形状的拉曼增益曲线，但是，由于泵浦光与泵浦光、信号光与信号光之间的受激拉曼散射使得整个系统具有高度的非线性，设计高增益宽带的平坦增益谱是比较困难的。图3-5给出了当采用相同泵浦功率泵浦时候的拉曼增益谱，可以看出，它

的增益波动是比较大的。

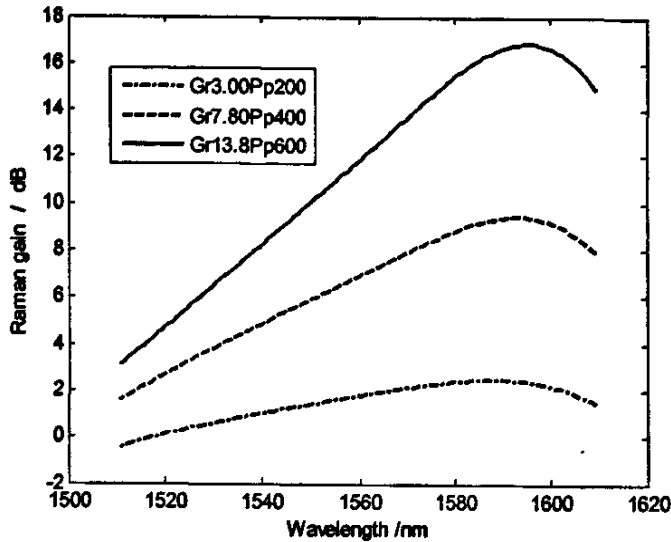


图 3-5 泵浦光功率相等时的增益谱

Fig. 3-5 FRA's gain spectrum when inputting pumped power equally
(Gr-Gain ripple / dB; Pp-Pumped power / mw)

目前优化配置FRA泵浦配置的方法主要有二种：第一是凭借经验，根据计算模拟得到的结果，手动调整泵浦波长和功率等参数；第二是先用各种优化算法（包括模拟退火算法和遗传算法等）优化泵浦波长和泵浦功率，得到最优结果。本章介绍了一种基于粒子群优化算法的拉曼放大器优化，在改进算法的基础上，得到了增益带宽100 nm、增益波动0.56 dB的优化结果。优化结果证明了算法的有效性。

3.3.1 已有优化算法

目前应用在拉曼光纤放大器优化设计方面的优化算法主要有传统三大优化算法中既是模拟退火算法、遗传算法、神经网络等，此外还有依据多泵浦拉曼增益谱的特点和不同泵浦波长对增益斜率的不同影响提出的优化算法^[6]等。下面我们主要对模拟退火算法和遗传算法做简要介绍。

首先看模拟退火算法 (SAA) ^[22]。我们知道，在金属热加工工艺中，退火

是将金属材料加热到某一高温状态，然后让其慢慢冷却下来的一个金属热处理过程。从统计学的观点看，随着温度的降低，物质的能量将逐渐趋于一个较低的状态，并最终到达某种平衡。

模拟退火算法就是基于金属退火的机理而建立起来的一种全局最优化方法，它把退火过程中分子的移动同优化设计参数的变化联系起来，把退火过程中温度的变化同优化迭代过程中步长联系起来，可以想到：在优化过程中，如果让迭代步长缓慢变化，并且设计参数也能以某种概率随机移动（就像分子的无规则热运动一样），那么，我们就有可能获得一个最小的目标函数值，即达到一个全局最优化值，这就是模拟退火算法的基本出发点。算法的构成要素主要有：

- (1) 搜索空间 Ω ，也称状态空间，它是所有可能解的全集。
- (2) 能量函数 $E(x)$ ，既是优化计算的目标函数，其最小点就是所求问题的最优解。
- (3) 状态转移规则 P ，它是指从一个状态 x_{old} （一可能解）向另一个状态 x_{new} （另一可能解）的转移概率，它与当前的温度参数 T 有关。
- (4) 冷却进度 $T(t)$ ，冷却进度是指从某一高温状态 T_0 向低温状态冷却时的降温管理表。

目标函数 f 就相当于系统的能量函数。在算法的每一部随机产生一个新的候选解，如果这个新解使目标函数 f 的值变小，那么它可以被接受。否则要以指数概率的形式来决定它是否被接受，总的来说，接受新的解的概率 p 为：

$$p = \begin{cases} \exp(-\Delta f / T), & \Delta f > 0 \\ 1, & \Delta f \leq 0 \end{cases} \quad (3-16)$$

其中 Δf 是由随机扰动引起的目标函数的变化， T 是温度。为了求解目标函数的最优解，归结出整个优化过程如下：

- 1) 令 $t=0, T=T_0$ ， T_0 为初始温度，随机选择合理的初值 $x^{(0)}$ 。
- 2) 由 $x^{(t)}$ 的随机扰动产生一个新的候选解 $x^{(t+1)}$ 。
- 3) 计算 $\Delta f = f[x^{(t+1)}] - f[x^{(t)}]$ 。
- 4) 如果 $\Delta f < 0$ ，接受新解；否则给出一个服从均匀分布 0 到 1 之间的随机数 r ，如果 $\exp(-\Delta f) > r$ ，则接受新解。

5) $i=i+1$, 如果 $i < L$, 返回到 2), 此处 L 为循环迭代总次数。

6) 令 $t=0$, 根据温度方案减小 T 。

7) 如果不满足终止条件, 返回到第 2) 步, 否则终止输出解。

再看遗传算法 (GA) [23]。遗传算法的内涵哲理是启迪于自然生物从低级、简单, 到高级、复杂, 乃至人类这样一个漫长而绝妙的进化过程, 借鉴于达尔文的物竞天演、优胜劣汰、适者生存的遗传选择和自然淘汰的生物进化机理, 其本质是一种求解问题的高效并行全局搜索方法。它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 并自适应的控制搜索过程以求得最优解。它是由美国 Michigan 大学的 J.Holland 教授于 1975 年首先提出的。

由于遗传算法是自然遗传学和计算机科学相互结合渗透的产物, 因此借用了许多自然进化的基础用语。

1) 群体 (population) 和个体 (individuals)

2) 群体规模 (population size)

3) 适应度函数 (fitness function)

4) 编码 (coding)、解码 (decoding) 操作

5) 选择 (selection)、交叉 (crossover) 和变异 (mutation) 操作

这 3 个算子是遗传算法的三个主要操作算子, 即遗传操作 (genetic operation), 是遗传算法的特点。

遗传算法的两大主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息相互交换, 它实际上是模拟由个体组成的群体的整体学习过程, 其中每个个体表示给定问题搜索空间中的一个解点。搜索过程不依赖于梯度信息。遗传算法从任意初始化的群体出发, 通过随机选择 (使群体中的优秀个体有更多的机会传给下一代)、交叉 (体现了自然界中群体内个体之间的信息交换) 和变异 (在群体中引入新的变种确保群体中信息的多样性) 等遗传操作, 使群体一代一代地进化到搜索空间中越来越好的区域, 直至抵达最优解点。

3.3.2 粒子群优化算法优化设计宽带 FRA 的泵浦配置

当前, 通过模拟生物群体的行为来解决计算问题已经成为新的研究热点, 形成了以群体智能 (Swarm Intelligence, SI) 为核心的理论体系, 并已在一些实

际应用领域取得突破性进展。通过对生物群体的观察和研究发现,生物群体内个体间的合作与竞争等复杂性行为产生的群体智能往往能对某些特定的问题提供高效的解决方法。例如,动物行为学家曾仔细观察过蚂蚁的觅食行为,发现不管初始时同一蚁巢的蚂蚁从蚁巢到食物的觅食路径是如何的随机,随着觅食的蚂蚁往返次数的增加,蚁群总能找到最短的觅食路径。著名的粒子群算法正是受蚁群觅食行为的启发而产生的。实践证明,粒子群算法在组合优化、车间作业调度、网络路由选择等领域已经取得成功的应用。Kennedy和Eberhart教授提出了粒子群优化算法最初的设想是仿真简单的社会系统,研究并解释复杂的社会行为,后来发现粒子群优化算法可以用于复杂优化问题的求解。

下面简单介绍下粒子群算法的基本求解思路。如上面所说,同样可以拿鸟群觅食为例。PSO求解优化问题时,问题的解对应于搜索空间中一只鸟的位置,称这些鸟为“粒子”(particle)或“主体”(agent)。每个粒子都有自己的位置和速度(决定飞行的方向和距离),还有一个由被优化函数决定的适应度值。各个粒子记忆、追随当前的最优粒子,在解空间中搜索。每次迭代的过程不是完全随机的,如果找到较好解,将会以此为依据来寻找下一个解^[24,25,45]。

令PSO初始化为一群随机粒子(随机解),在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:第一个就是粒子本身所找到的最好解,叫做个体极值点(用 $pBest$ 表示其位置),全局版PSO中的另一个极值点是整个种群目前找到的最好解称为全局极值点(用 $gBest$ 表示其位置),而局部版PSO不用整个种群而是用其中一部分作为粒子的邻居,所有邻居中的最好解就是局部极值点(用 $lBest$ 表示其位置)。在找到这两个最好解后,粒子根据如下的式和式来更新自己的速度和位置。粒子 i 的信息可以用 D 维向量表示,位置表示为: $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$, 速度表示为: $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$, 其它向量类似表示。则速度和位置更新方程为:

$$V_{id}^{k+1} = w * V_{id}^k + c1 * rand() * (pBest_{id}^k - X_{id}^k) + c2 * rand() * (gBest_d^k - X_{id}^k) \quad (3-17)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (3-18)$$

V_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中 d 维的速度; $C1$ 、 $C2$ 是学习因子(或称加速系数),分别调节向全局最好粒子和个体最好粒子方向飞行的最大步长,若太小,则粒子可能远离目标区域,若太大则会导致突然向目标区域飞去,或飞过目标区域。合适的 $C1$ 、 $C2$ 可以加快收敛且不易陷入局部最优,通常 $C1 = C2 = 2$; $rand()$ 是

$[0, 1]$ 之间的随机数; X_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的当前位置; $pBest_{id}^k$ 是粒子 i 在第 d 维的个体极值点的位置 (即坐标); $gBest_d^k$ 是整个种群在第 d 维的全局极值点的位置。为防止粒子远离搜索空间, 粒子的每一维速度 v_d 都会被钳制在 $[-v_{d,max}, v_{d,max}]$ 之间, $v_{d,max}$ 太大, 粒子将飞离最好解, 太小将会陷入局部最优。假设将搜索空间的第 d 维定义为区间 $[-x_{d,max}, x_{d,max}]$, 则通常 $v_{d,max} = kx_{d,max}, 0.1 \leq k \leq 1$, 每一维都用相同的设置方法。基本 PSO 的流程可以描述为:

1) 初始化。初始搜索点的位置 x_i^0 及其速度 v_i^0 通常是在允许的范围内随机产生的, 每个粒子的 $pBest$ 坐标设置为其当前位置, 且计算出其相应的个体极值 (即个体极值点的适应度值), 而全局极值 (即全局极值点的适应度值) 就是个体极值中最好的, 记录该最好粒子序号, 并将 $gBest$ 设置为该最好粒子的当前位置。

2) 评价每一个粒子。计算粒子的适应度值, 如果好于该粒子当前的个体极值, 则将 $pBest$ 设置为该粒子的位置, 且更新个体极值。如果所有粒子的个体极值中最好的好于当前的全局极值, 则将 $gBest$ 设置为该粒子的位置, 记录该粒子的序号, 且更新全局极值。

3) 粒子的更新。用式 (3-17) 和式 (3-18) 对每一个粒子的速度和位置进行更新。

4) 检验是否符合结束条件。如果当前的迭代次数达到了预先设定的最大次数 (或达到最小错误要求), 则停止迭代, 输出最优解, 否则转到 2)。

从上面可以看出 PSO 的一些特点:

1) 基本 PSO 算法最初是处理连续优化问题的。

2) 类似于遗传算法, PSO 也是多点搜索。

3) 式 (3-20) 的第一项对应多样化 (diversification) 的特点, 第二项、第三项对应于搜索过程的集中化 (intensification) 特点, 因此这个方法在多样化和集中化之间建立均衡。图 3-6 给出了例子群优化算法的流程图。

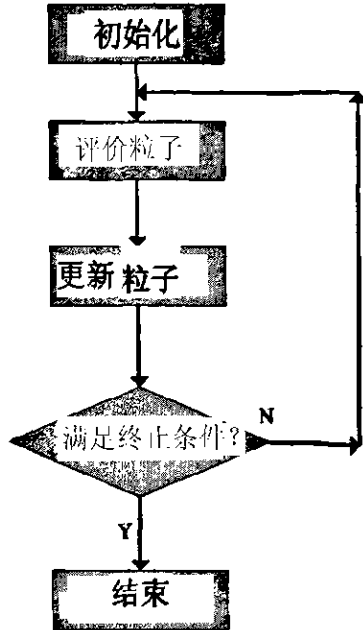


图 3-6 PSO 算法的流程图

Fig.3-6 The flow chart of PSO

本文在具体实施中，PSO 首先随机初始化一群粒子，种群大小 $popsiz$ 为 80，粒子维数 $dimsize$ 为 12，包括 6 个泵浦激光二极管的波长及其对应泵浦功率共 12 个变量，每个粒子就是解空间的一个潜在解。每次迭代粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己，一个是个极值 $pBest$ ；另一个是全局极值 $gBest$ ，然后按照下面的公式更新自己的速度和位置：

$$V = w * V + c1 * rand() * (pBest - Present) + c2 * rand() * (gBest - Present) \quad (3-19)$$

$$Present = Present + V \quad (3-20)$$

其中， V 是粒子速度， $Present$ 是粒子当前位置，同上面 $rand()$ 是区间 $[0, 1]$ 间一个随机数， $c1$ 和 $c2$ 为学习因子都取 2， w 是加权系数，此处采用惯性加权因子，即 w 在最大加权系数 w_{max} 为 0.5 和最小加权系数 w_{min} 为 0.2 之间线性减小，并且每一维粒子的速度和位置都被限定在一定的取值范围。粒子通过不断学习更新，最终飞到解空间中的最优位置，搜索过程结束，此处最大循环数 $iter\ max$ 为 201，步长 $step$ 为 4。表格 3-1 是 PSO 算法参数设置，表格 3-2 是算法中每个粒子的最大速度和位置设置。

表 3-1 PSO 算法优化参数

Tab.3-1 Parameters of PSO Optimization

参数名称	参数数值
粒子群大小 popsize	50
粒子的维数 dimsize	12
最大循环数目 itermax	201
学习因子 c1	2
学习因子 c2	2
最大权重因子 wmax	0.5
最小权重因子 wmin	0.2
循环步长 step	4

表 3-2 PSO 中每个粒子的位置和速度限制

Tab.3-2 Boundaries of the particle's location and velocity of PSO

dimindex	velocity	location
1	(-300,300)	(100,900)
2	(-300,300)	(100,900)
3	(-300,300)	(100,900)
4	(-300,300)	(100,900)
5	(-300,300)	(100,900)
6	(-300,300)	(100,900)
7	(-10,10)	(1486,1505)
8	(-10,10)	(1466,1485)
9	(-10,10)	(1446,1465)
10	(-10,10)	(1426,1445)
11	(-5,5)	(1416,1425)
12	(-5,5)	(1405,1415)

PSO 没有杂交和变异因子，搜索过程是跟随当前最优解的过程，这是一种单向信息流动机制，虽然大多数情况下能快速收敛到最优解，但对于复杂问题，PSO 容易陷入局部最优解，优化结果精度较低。本例应用基本 PSO 算法优化结

果为：增益带宽 100 nm ，增益波动达到 1.53 dB ，表格 3-3 给出了优化泵浦配置结果，其增益谱曲线如图 3-8 所示：

表 3-3 PSO 算法优化结果

Tab.3-3 Results of PSO Optimization

泵浦波	1	2	3	4	5	6
泵浦波长	1505 nm	1485 nm	1465 nm	1445 nm	1425 nm	1410 nm
泵浦功率	276.4 mW	154 mW	250 mW	325 mW	400 mW	475 mW

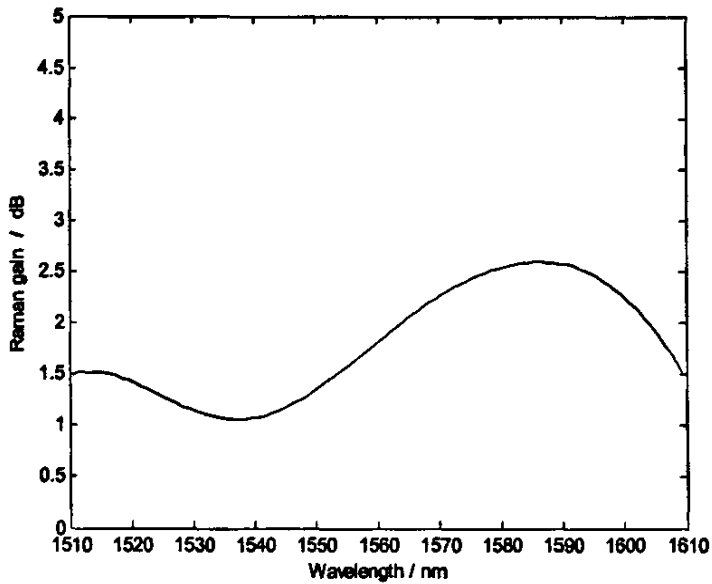


图 3-8 基本粒子群优化算法的结果

Fig. 3-8 Optimized results of basic PSO

3.3.3 粒子群改进算法优化泵浦配置结果

应用基本 PSO 算法得到的增益平坦度显然不是一个让人满意的结果，实际工程中要求增益平坦度要控制在 1 dB 以内，此处尝试依据泵浦光功率在光纤传输中的演化规律对算法进行改进，以得到更高的优化精度。仿真结果表明，由于泵浦光之间存在强烈的受激拉曼散射效应，短波长泵浦光向长波长泵浦光存在明显的功率转移，短波长泵浦光功率衰减更快。如图 3-9 所示：

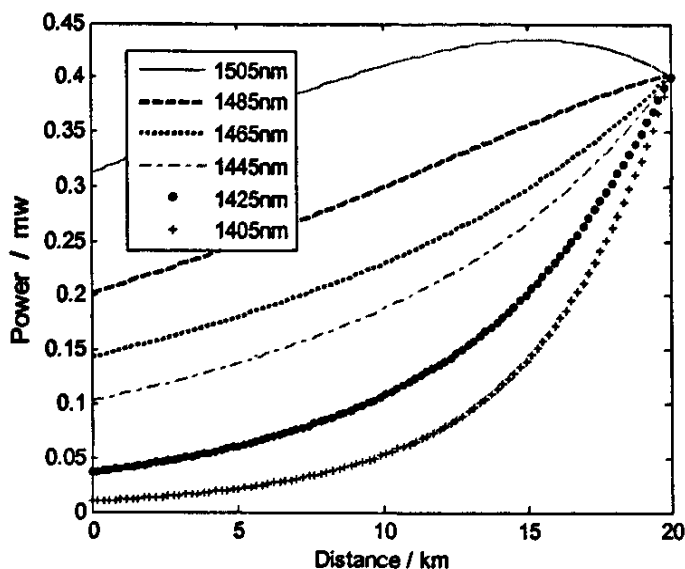


图 3-9 泵浦光能量演化曲线

Fig. 3-9 Pumped power evolutions in the distributed Raman fiber amplifier

依据这一规律，试想若预先设置使短泵浦光功率比长泵浦光功率高，就可以补偿短泵浦光由于功率转移造成的“功率损失”，从而可以得到更加平坦的增益谱，这实际上是一种功率预补偿技术。根据这一设想对算法进行改进，作者提出了“功率阶”（*powerstep*）的概念^[18]，所谓“功率阶”就是恰好能补偿短波长泵浦光由于功率转移而损失的那部分功率的功率值。具体实施是在算法中设置短波长泵浦光的最小功率比其临近的长波长泵浦光的最小功率高出一个功率阶，这样算法就更容易收敛到全局最优解，优化仿真结果证明了这种改进的有效性，在大多数情况下算法能更好地收敛到全局最优解。对于本例，优化分析发现，当“功率阶”设置为 50 mw 时，其增益平坦度达到 0.56 dB 。表格 3-4 给出了改进算法得到的优化泵浦配置结果，表格 3-5 是改进算法的设置参数，表格 3-6 是算法中每个粒子的速度和位置设置，图 3-10 是得到的增益谱曲线。

表 3-4 PSO 改进算法优化结果

Tab.3-4 Results of improved PSO Optimization

泵浦波	1	2	3	4	5	6
泵浦波长	1505 nm	1485 nm	1465 nm	1445 nm	1425 nm	1408.8 nm
泵浦功率	216.6 mw	150 mw	200 mw	250 mw	300 mw	350 mw

表 3-5 PSO 改进算法优化参数

Tab.3-5 Parameters of improved PSO Optimization

参数名称	参数数值
粒子群大小 popsize	80
粒子的维数 dimsize	12
最大循环数目 iternax	201
学习因子 c1	2
学习因子 c2	2
最大权重因子 wmax	0.6
最小权重因子 wmin	0.2
循环步长 step	2

表 3-6 改进算法中 PSO 中每个粒子的位置和速度限制

Tab.3-6 Boundaries of the particle's location and velocity of improved PSO

dimindex	velocity	location
1	(-300,300)	(100,900)
2	(-300,300)	(100,900)
3	(-300,300)	(100,900)
4	(-300,300)	(100,900)
5	(-300,300)	(100,900)
6	(-300,300)	(100,900)
7	(-10,10)	(1486,1505)
8	(-10,10)	(1466,1485)
9	(-10,10)	(1446,1465)
10	(-10,10)	(1426,1445)
11	(-5,5)	(1416,1425)
12	(-5,5)	(1405,1415)

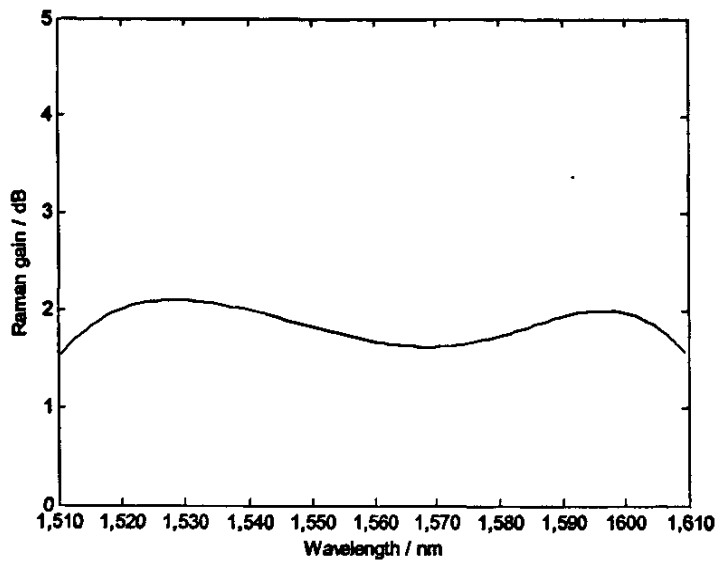


图 3-10 改进优化结果得到的拉曼增益曲线

Fig.3-10 The Raman gain spectrum by improved optimization results

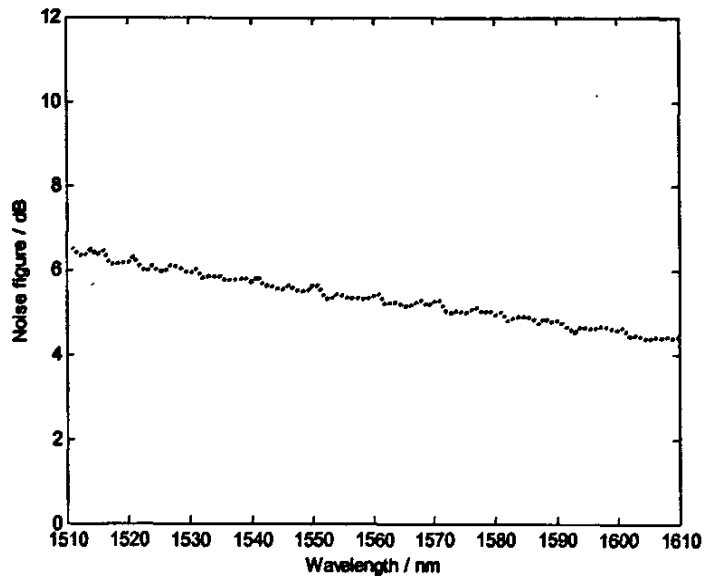


图 3-11 拉曼放大器的噪声指数

Fig.3-11 Raman amplifier's noise figure

与 PSO 改进前得到的优化结果相比增益平坦度提高近 1 dB ，其增益谱曲线明显平坦了。可见引入功率阶概念并且把它应用到算法中对提高算法的搜索性

能是有效的。在增益谱平坦的同时，放大器的噪声指数也比较小，最小的噪声指数小于 4.5 dB ，最大噪声指数也小于 7 dB ，见图 3-11 所示。表 3-7 把本算法得到的优化结果同参考文献[22]、[6]、[26]作了简单比较：

表 3-7 四种优化方法的比较

Tab.3-7 Differences between four optimization methods

比较项目	文献(22)算法	文献(6)算法	文献(26)算法	PSO 算法
优化参数	泵浦波长和功率	泵浦功率	泵浦功率	泵浦波长和功率
泵浦光数目	4 个	10 个	10 个	6 个
优化精度	$<2.6\text{ dB}$	$<0.5\text{ dB}$	$<0.5\text{ dB}$	$<0.6\text{ dB}$
增益带宽	50nm	80nm	70nm	100nm
需人工参与	不需要	不需要	需要	不需要

3.4 小结

本章利用 PSO 算法对多波长反向泵浦 FRA 的泵浦波长和泵浦功率同时进行了优化并且依据泵浦光功率在光纤传输中的演化规律改进了算法，最终在无须人为参与调节的条件下，仅仅用 6 个泵浦波，就得到了增益带宽 100 nm 、增益波动低于 0.6 dB 的结果。优化结果表明，设置了功率阶的 PSO 改进算法对于解决多泵浦 FRA 的优化设计问题是有效的，这为下一步设计 DWDM 系统中增益带宽更宽、增益谱更加平坦的超宽带 FRA 提供了一种可行的方法。

第 4 章 超宽带光纤拉曼放大器的优化设计

我们知道,增益带宽愈大,可以容纳的信道数目就愈多。人们从来没有停止过对超宽带光放大器(带宽超过 100 nm)的追求。而事实上,新型光纤以及大功率光纤激光器的出现并且实用化使得研制超宽带光纤放大器有了物理方面的基础;而随着互联网的发展,3G业务的开展,数据业务将很快超过话音业务,用户对带宽的需求越来越强烈,国家骨干网、城域网和接入网正在以空前的速度发展。能充分发挥全波光纤维巨大带宽优势的光放大器将在光纤通信系统和网络特别是城域光网中获得广泛应用,而唯一能独立全波段放大的光纤拉曼放大器将具有广阔的市场前景^[27~31]。本节在介绍几种已有超宽带光放大器的方案的基础上,给出了一种基于粒子群优化算法的超宽带光纤拉曼放大器的设计方案。

4.1 研究超宽带光纤放大器的背景和意义

新型光纤特别是全波光纤维(All-Wave Fiber)研制成功以及长波长泵浦大功率激光器的研制成功是实现超宽带光纤放大器的重要物理基础之一。全波光纤维也称低水峰光纤(Low Water Peak Fiber, LWPF)或零水峰光纤(Zero Water Peak Fiber, ZWPF),是目前最先进的城域网用非色散位移光纤,它在结构上和普通标准单模光纤无异,朗讯公司于1998首先研制成功。它采用一种新的生产制造技术,尽可能地消除 OH^{-1} 离子 1383 nm 附近处的“水吸收峰”,使光纤损耗完全由玻璃的本征损耗决定,在 $1280\text{ nm}-1625\text{ nm}$ 的全部波长范围内都可以用于光通信。

相比于传统的单模光纤,全波光纤维的出现使得多种光通信业务有了更大的灵活性^[32]。由于有很宽的带宽可供通信之用,我们就可将全波光纤维的波带划分成不同通信业务段而分别使用。可以预见,未来中城市城域网的建设,将会大量采用这种全波光纤维。人类追求高速、宽带通信网络的欲望是永无止境的,在目前带宽需求成指数增长的情况下,全波光纤维正越来越受到业界的关注,它的诸多优点已被通信业界广泛接受:

- 1) 可用波长范围增加 100 nm ,使光纤可以从 1260 nm 到 1625 nm 的完整传

输波段，全部可用波长范围从大约 200 nm 增加到 300 nm ，可复用的波长数大大增加。

2) 由于上述波长范围内，光纤的色散仅为 1550 nm 波长区的一半，因而，容易实现高比特率长距离传输。

3) 可以分配不同的业务给最适合这种业务的波长传输，改进网络管理。例如可以在 1310 nm 波长区传输模拟图像信号，在 $1350\sim 1450\text{ nm}$ 波长区传输高速信号（高达 10 Gbps ），在 1450 nm 以上波长区传输其他信号。

4) 可用波长范围大大扩展后，允许使用波长间隔较宽、波长精度和稳定性要求较低的光源、合波器、分波器和其它元件，使元器件特别是无源器件的成本大幅度下降，这就降低了整个系统的成本。例如，通过增加波长间隔，网络可以使用较便宜的无制冷直接调制激光器，避免了昂贵的外调制激光器；对于薄膜滤波器而言，波长间隔从 100 GHz 增加到 200 GHz 后，滤波器成本可以降低 50% ，波长间隔进一步增加到 400 GHz 滤波器成本降低 70% 左右。

5) 这为研制超宽带光纤放大器提供了物理基础。可以说，正是由于全波光纤的出现，才使得研制超宽带光放大器有了现实意义。

超宽带光纤拉曼放大器在实际应用中最关键的是获得合适波长的高功率泵浦源，特别是长波长功率泵浦激光器的出现。由于对应拉曼增益峰值的泵浦光与信号光频移约为 100 nm ，超宽带 FRA 的增益带宽很宽（ 100 nm 以上），故需要的多种波长的泵浦激光器。

目前可实用的拉曼泵浦源主要有两种：一种是复用半导体泵浦激光器，即用 WDM 合波器将几个较低功率的半导体激光器耦合起来以获得较高功率的输出；另一种是级联式拉曼激光器，即利用已有的但波长较短的泵浦源通过类似谐振腔的结构产生具有合适波长的高阶斯托克斯波作为泵浦输出。

高速、宽带的交互式网络是未来网络的必然要求，在目前带宽需求成指数增长的情况下，全波光纤正越来越受到各界的关注，它的诸多优点已被广泛接受，大有逐渐取代常规的标准单模光纤的趋势。相信这种经济实用，功能独特，高度灵活的新型光纤将会在未来的全光网络中扮演越来越重要的角色。对应的，研制能发挥全波光纤巨大带宽优势的超宽带光放大器具有同样重要的意义。

4.2 已有超宽带光放大器的设计方案

二十世纪九十年代掺铒光纤放大器和低损耗传输光纤的研制成功以及波分复用技术的广泛应用极大地增加了光纤通信传输的信息容量并延长了光纤通信的传输距离,从而使光纤通信得到飞速的发展。专家预计长距离光纤通信的容量今后将以大约每两年翻一番的速度增长,为满足这种日益增长需求,基于光波分复用技术提供尽可能宽的宽带放大的光纤传输系统成为目前研究的重要课题。但是传统的EDFA存在如下不足^[33-35]:一是增益带宽较窄;二是能量上转换使铒离子掺杂浓度受到限制;三是采用单包层掺铒光纤对泵浦源的激光模式要求较高,耦合效率低。这些都使得EDFA无法满足未来更加密集的波分复用系统的发展需求。因此研制超宽带、高效率光纤放大器变得很重要。目前超宽带放大器主要有三种方案:一是通过扩展传统EDFA实现超宽带放大;二是基于包层泵浦技术的双包层 Er^{+3}/Yb^{+3} 共掺光纤放大器;三是采用传统EDFA与光纤拉曼放大器级联构成的混合光纤放大器。下面将简单介绍一下这几种方案^[36,39]。

先看第一种方案。这种方法主要是通过控制掺铒光纤(EDF)的长度,使铒离子的粒子数分布反转稳定在较低的程度,这样可实现L波段光放大。使用高掺杂、低损耗的EDF,可以减少所用光纤的长度,降低吸收损耗和后向放大自发辐射能量的积累,做成的增益移位EDFA(GS-EDFA)性能不错。此外还可以做成多波段级连宽带光纤放大器。并且随着GS-EDFA技术的不断成熟和完善,利用其实现L+C、甚至是S+L+C波段超宽带放大成为可能。这种方案需要将放大器分段,然后分别放大。

再看第二种方案。传统的EDFA采用的增益光纤是普通的单包层掺铒光纤不能满足未来光纤通信的要求。双包层泵浦 Er^{+3}/Yb^{+3} 共掺光纤放大器是采用 Er^{+3}/Yb^{+3} 共掺双包层光纤作为增益介质,通过采用包层泵浦技术,打破了光纤放大器泵浦和耦合效率低的瓶颈。纤芯中加入镱离子,不但有效地抑制了高浓度铒离子之间的能量上转换过程,提高了能量转换效率,而且使铒镱共掺光纤的吸收谱变得相当宽阔(800-1100 nm),还降低了对泵浦光模式的要求,是一种真正的高功率、高转换效率光纤放大器。这种放大器的性能受掺杂离子浓度以及掺杂精度影响很大。

第三种方案是采用EDFA+FRA的混和放大方式实现超宽带放大。由于传统

的EDFA技术相当成熟，主要用它放大C波段，而对于它不易放大的L波段等波段，采用光纤拉曼放大的方式。我们知道，目前分布式光纤拉曼放大器进展很快，国外很多长距离、超大容量的密集波分复用光通讯系统（DWDM）所使用的光放大器大多是分布式光纤拉曼放大器，这不仅可以充分利用光纤资源，降低成本，而且可以降低增益介质中的光密度，以便减少由于非线性效应产生的四波混频、信道间串扰所引起的系统性能劣化。但拉曼放大器的增益较低（实际线路中使用时不超过 16 dB ），而EDFA虽然噪声指数上不如拉曼放大器，但小信号增益可以超过 30 dB ，因此将拉曼放大器与EDFA结合起来的混合放大器是一种理想的应用形式。实际应用中，国内烽火通信的 $80\times 40\text{ Gbit/s}$ DWDM平台也是应用的EDFA和FRA混和式放大技术。

本文尝试仅仅采用拉曼放大技术实现超宽带放大。

4.3 宽带 FRA 设计中影响增益平坦性几个参数的讨论

超宽带 FRA 优化设计中有很多重要的参数，本节主要讨论了泵浦功率大小、初始信号功率以及拉曼增益谱的半值全宽等几个重要参数，这些参数对 FRA 增益平坦度有十分重要的影响，是 FRA 优化设计中不可忽视的参数。本节仿真中使用反向多波长的泵浦配置设计。

4.3.1 泵浦功率大小对增益平坦性的影响

众所周知，光纤拉曼放大器在实际应用中最关键的是获得合适波长的高功率泵浦源，这就是拉曼放大器的高功率泵浦特性。拉曼放大器要求泵浦源有较大的输出功率，一般应在 200 mw 以上，以获得足够高的增益。显然，泵浦功率的越高，得到的 FRA 增益越大，但泵浦激光器的输出功率也不是越大越好，一方面，大功率激光器使用成本高并且使用寿命短，另外一方面激光器输出功率越大，引起的光纤非线性效应越严重，放大器输出增益波动也越大，对 OSNR 的损害越恶劣。图 4-1 给出了泵浦功率、信号在光纤中传输距离、以及放大器最大增益波动的仿真图。

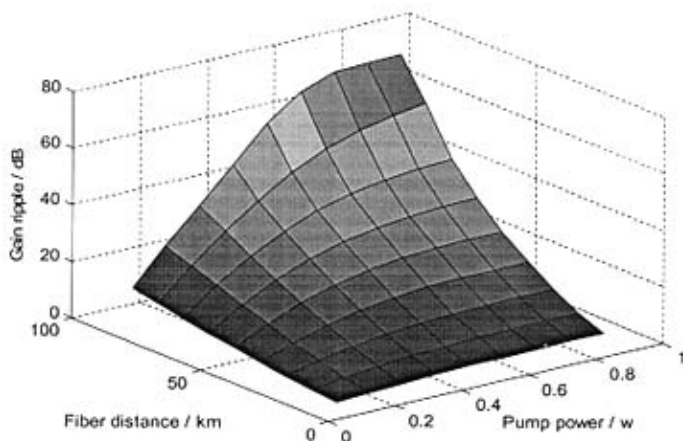


图 4-1 泵浦功率、传输距离与 FRA 增益波动关系图

Fig. 4-1 Gain ripple dependence on distance and pump power

从图中可以看出，在信号传输开始的开始阶段，泵浦功率的变化对拉曼放大器的增益平坦度几乎没有影响。但随着传输距离的增加，泵浦功率越大，拉曼增益谱越不平坦，特别是在光纤传输超过 100 km 后，随着泵浦功率的增加，放大器的增益平坦度急剧恶化，甚至到了难以接受的地步。所以宽带 FRA 优化设计中不能盲目追求高泵浦功率以及高增益。

从图 4-1 同样可以看到，在较小的泵浦功率下，随着信号在光纤中传输距离的增加，拉曼增益波动恶化并不明显；但是随着泵浦功率的增加，拉曼放大器的增益波动情况迅速恶化。顾在 FRA 优化设计中采用较小的泵浦功率对放大器的增益平坦有利，但对于获得高增益不利。

4.3.2 拉曼增益谱半值全宽对增益平坦性的影响

我们知道，对于熔融石英，在泵浦波长为 1 μm 激光泵浦下，可以获得高达 40 THz 拉曼增益谱，并且在 13 THz 附件有大约 5-6 THz 的高增益带宽，可以称之为拉曼增益谱的半值全宽，这是制造宽带光纤拉曼放大器的基础。一般说来，我们希望半值全宽越大越好，因为这样获得拉曼增益谱就越宽。图 4-2 给出了拉曼增益谱半值全宽、泵浦功率以及拉曼增益波动的关系图。

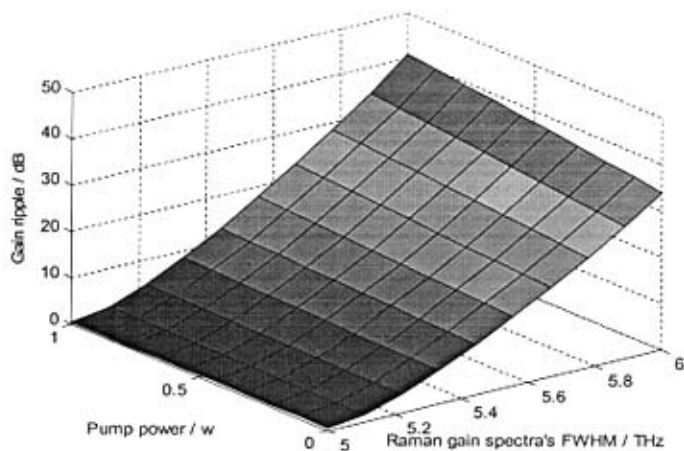


图 4-2 泵浦功率、拉曼增益谱的半值全宽与 FRA 增益波动关系图

Fig. 4-2 Gain ripple dependence on Raman gain spectra's FWHM and pump power

从图中可以看出，在相同泵浦功率下，拉曼放大器的增益波动随着拉曼增益谱的半值全宽的增加而增加；而对于给定的 FWHM，拉曼增益谱的增益波动对泵浦功率并不敏感。顾在实际的 FRA 设计中，较大的 FWHM 虽然容易获得更宽的增益带宽，但是其增益谱的平坦也更加困难。

4.3.3 信号发射功率对增益平坦性的影响

信号发射功率同样对 FRA 的增益平坦性能有直接影响。对于信号发射功率对 FRA 增益平坦度的研究目前笔者还未见到相关报道。本节从泵浦功率、信号光发射功率、FRA 增益波动三个方面的关系入手，尝试找到信号发射功率对增益平坦性的影响。图 4-3 给出了三者的关系图。

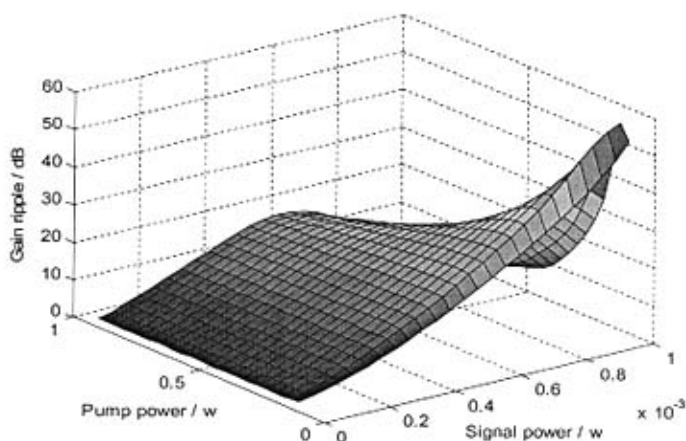


图 4-3 泵浦功率、信号发射功率与 FRA 增益波动关系图

Fig. 4-3 Gain ripple dependence on signal power and pump power

从图 4-3 可以看出, 在较小的信号发射功率下 (小于 $0.8 \times 10^{-3} \text{w}$), 增益波动对泵浦功率的增大并不敏感; 随着信号发射功率的增大, 增益波动随着泵浦功率的增大减小。从图中同样可以看到, 在较大的泵浦功率下 (大于 0.5w) 时, 增益波动随着信号发射功率的增大呈倒“U”形变化, 即在较大的泵浦功率下, 信号的发射功率存在一个对增益波动最敏感的值, 信号发射功率要尽量远离这个值。总的来说, 拉曼增益波动随信号发射功率的变化情况比较复杂, 需要进一步的实验研究。

4.3.4 小结

通过上面的几个参数的讨论可以看出, 在拉曼放大器的优化设计中, FRA 的增益谱带宽、增益大小、以及增益平坦度三者存在着互相制约的关系。这就需要在 FRA 优化设计中平衡三者的关系, 通盘考虑信号增益大小、增益谱宽度和增益平坦度三者的关系。

4.4 宽带光纤拉曼放大器的噪声性能分析

拉曼放大器可用于光纤通信系统中的功率放大、接收机前置放大及无源光

器件的损耗补偿等等。在优化设计中,放大器的噪声特性是一项重要指标。由于拉曼放大器的机理与 EDFA 完全不同,因此其噪声特性也不同于掺稀土元素的光放大器光纤拉曼放大器中主要有三种噪声^[40-42]:一是放大器自发辐射噪声(ASE 噪声),二是串话噪声,三是瑞利散射噪声。三者产生机制各不相同。

4.4.1 放大器自发辐射噪声(ASE 噪声)

ASE 噪声是由于自发拉曼散射效应经拉曼放大而产生的频带很宽的噪声。为简便起见,只考虑反向泵浦的情况(正向泵浦的情况与之类似)。

由于光纤拉曼放大是一种分布式放大,使用的光纤长达数十千米因而信号光在被放大的同时也会因传输损耗而衰减。为计算光纤拉曼放大器的噪声系数,可将分布式光纤拉曼放大器等效为一段有损耗而无增益的普通光纤级连一个有增益但无损耗的普通光放大器,从而可用该普通光放大器的噪声系数来等效光纤拉曼放大器的噪声系数。这样光纤拉曼放大器的 ASE 噪声系数可通过下式来计算:

$$NF_{ASE} = 10 \log \frac{1}{G} \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu B_0} + 1 \right) \quad (4-1)$$

其中 G 为拉曼放大的开关增益(倍数), B_0 为光滤波器带宽, P_{ASE} 为带宽 B_0 内 ASE 功率。其中 P_{ASE} 可以通过下式来计算:

$$P_{noise} = \frac{hc^2 B_0}{\lambda_s^3} \frac{g_R P_p(0)}{A_{eff}} \exp(-\alpha_s L) \int_0^L \exp(\alpha_s - \alpha_p) \zeta \cdot \exp\left\{ \frac{g_R P_p(0)}{\alpha_p A_{eff}} [\exp(-\alpha_p \zeta) - \exp(-\alpha_p L)] \right\} d\zeta \quad (4-2)$$

其中 L 是光纤长度, α_p 、 α_s 分别是泵浦光信号光损耗系数,代入数值利用计算机可得到 ASE 噪声功率与增益的关系曲线。研究表明^[33],当增益较小时,噪声功率迅速随增益增大而增加,当增益 20 dB 时,两者近似成线性关系,见图 4-4 所示。同时通过对不损耗情况下的计算可知,当仅考虑泵浦光与信号光时,发现噪声功率不随损耗变化,只与增益有关,光滤波器的带宽越窄,则光噪声的功率越小,从而信噪比越高。可见 ASE 噪声确实是由放大器放大的噪声。图 4-5 给出了拉曼放大器信噪比随着增益变化的曲线图。

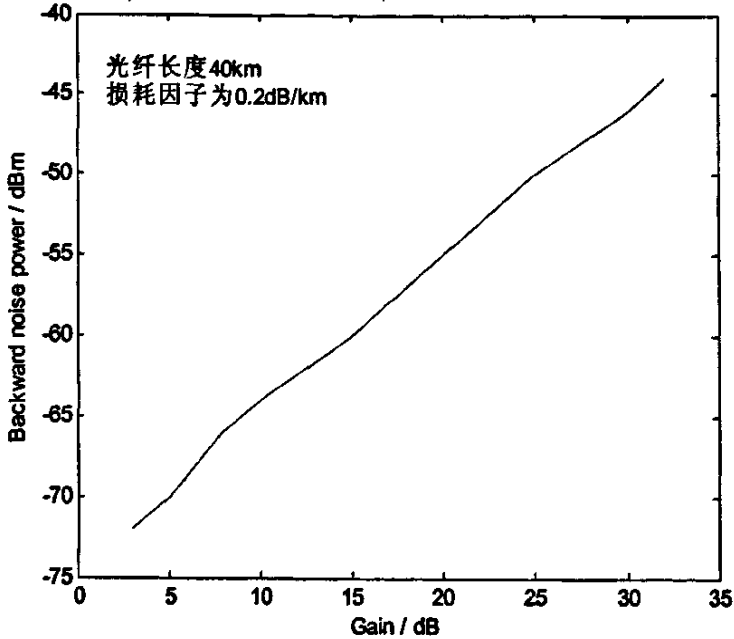


图 4-4 噪声功率与 FRA 增益的关系

Fig. 4-4 Noise power dependence on FRA's gain

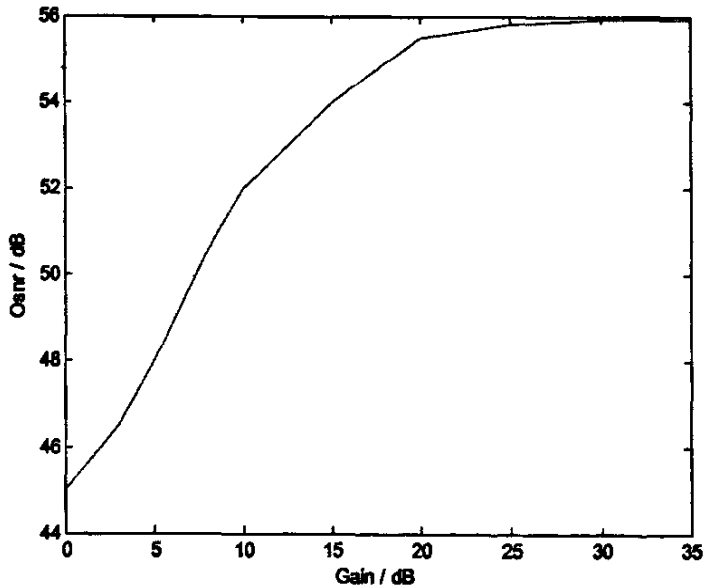


图 4-5 光信噪比与 FRA 增益的关系

Fig. 4-5 ONSR dependence on FRA's gain

由图4-5可知，开始时信噪比随着拉曼增益的增加而增大，当拉曼增益足够

大时(30 dB 以上),信噪比趋于一个定值。研究表明,当增益较大时,光噪声主要由拍频噪声,特别是信号自拍频噪声决定。因此对于一个性能优化的拉曼放大器, ASE 噪声主要表现为自发拍频噪声。最后应说明的是,以上计算没有考虑其它噪声的引入,实际情况下的信噪比在很高增益下反而会恶化。

4.4.2 串话噪声

再看串话噪声。拉曼放大器中的串话噪声分为两种:一种是由于泵浦光源的波动而造成的泵浦-信号串话;另一种是由于泵浦同时对多信道放大而导致的泵浦引入-信号间串话。泵浦引入-信号间串话主要是由于泵浦光对放大单一信道与放大多个信道的增益不同而造成的,具体表现为当两个相邻的信道同时传号时,信号的增益小于一个信道传号另一个信道空号时的增益。从总体上来看就表现为两信道间传、空号的相互影响,且信道数越多,串话影响越大。定义串话指标为 SIR (信号干扰比) = $10 \log[S(L)/I]$, $S(L)$ 为未受串扰的信号功率, I 为未受串扰的信号功率与受串扰的信号功率的差值。SIR 相当串话的信噪比。图 4-6 给出了 SIR 随拉曼增益(泵浦功率)和信号功率变化的曲线图。

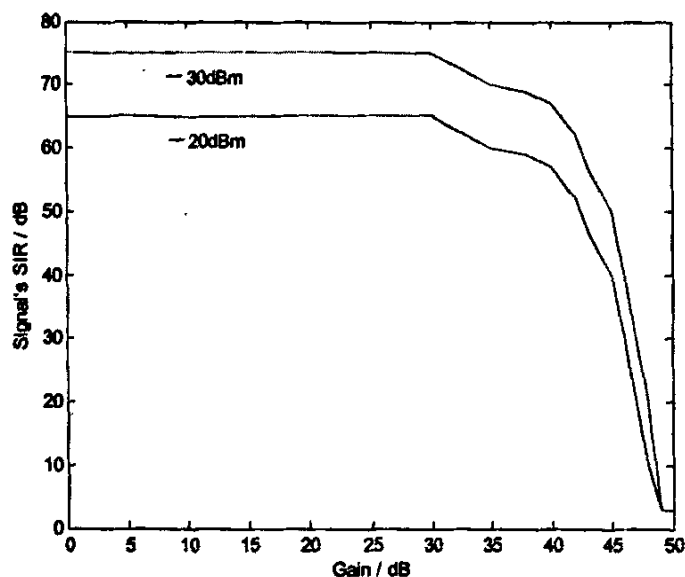


图 4-6 SIR 与 FRA 增益和信号功率的关系

Fig. 4-6 SIR dependence on FRA's gain and signal power

由图 4-6 可以看出,随着增益的增加, SIR 逐渐下降;当增益超过 20 dB 时, SIR 迅速恶化。而 SIR 越小,相应的信噪比越小。所以高的泵浦功率会导致串话噪声的恶化,引起误码率的上升,这在通信系统中是不允许的。并且由图可以看出,信号功率越大,串话越严重;泵浦功率越大,串话越严重。实验表明,采用反向泵浦比正向泵浦能获得更好的 SIR 性能,因此在实际应用中,应尽量采取反向泵浦,即使采用正向泵浦也不能用太高的泵浦功率。

4.4.3 瑞利散射噪声

最后看瑞利散射噪声。瑞利散射是由于光纤制造过程中,局部浓度微观起伏导致折射率在比波长小的尺度上发生随机变化而引起的。在有导波作用的光纤中,瑞利散射使一部分输入光变成后向传输的波。一方面,它引起功率消耗是 1550 nm 波段内光纤传输损耗的主要因素之一;另一方面,后向传输的波再经过一次散射变为前向传输,即双瑞利背向散射,双重瑞利背向散射由于传输方向与信号波相同两者会相干叠加,从而影响系统性能。

研究表明^[44,50,51]:泵浦功率越大,传输距离越长,瑞利散射的影响越大。对于放大器级联系统,放大器的个数越多,则瑞利散射的影响越小。因此为了抑制瑞利散射噪声的影响,可以采用多级放大的方式,避免泵浦功率过高和传输距离过长;另外还可以采用双向泵浦的方法降低瑞利散射。最近,提出了一种新的抑制瑞利散射的方法,即在传输光纤的中间某个位置加入一个均衡器,以破坏双瑞利散射的环路增益,取得了较好的效果。

4.4.4 小结

以上讨论可以看到, FRA 的增益和信噪比是两个互相矛盾的因素,增益越大,信号的输出功率也越大,但同时噪声功率也越大,最后的结果时信噪比的下降,故在实际应用中应该保证一定的信噪比的情况下提高增益。可以通过窄带滤波器降低 ASE 噪声的影响,采用反向泵浦降低串话噪声的影响,使用多级放大或者加入均衡器降低瑞利散射噪声的影响。

4.5 超宽带光纤拉曼放大器的优化设计

光纤拉曼放大器最重要优势就是可以放大任意光通信中的任意频带，拥有几百纳米的潜在放大带宽，是唯一的一种具备独立实现全波段放大的光放大器。正是基于这样的考虑，本节基于 MATLAB 仿真平台，通过多波长泵浦，优化设计了一种带宽超过 130 nm 超宽带光纤拉曼放大器，增益波段几乎涵盖整个 C 波段和 L 波段以及大部分 S 波段。

4.5.1 优化算法设计

设计放大器的增益带为 1472 nm 到 1607 nm 之间共 135 nm 的带宽，应用等间隔的 12 个泵浦波泵浦，泵浦波长分别为：1373 nm、1385 nm、1397 nm、1409 nm、1421 nm、1433 nm、1445 nm、1457 nm、1469 nm、1481 nm、1493 nm、1505 nm，泵浦间隔 12 nm，仅仅优化泵浦功率值。光纤长度为 40 km，拉曼增益谱采用类抛物线形近似，其增益系数 g_R / A_{eff} 与频移的关系图 4-7 所示，光纤损耗系数以及瑞利散射系数采用与上一章相同的参数设置。其中信号波发射功率设置为 -20 dBm，拉曼增益谱的半值全宽为 6 THz，最大泵浦功率设置为 300 mw。

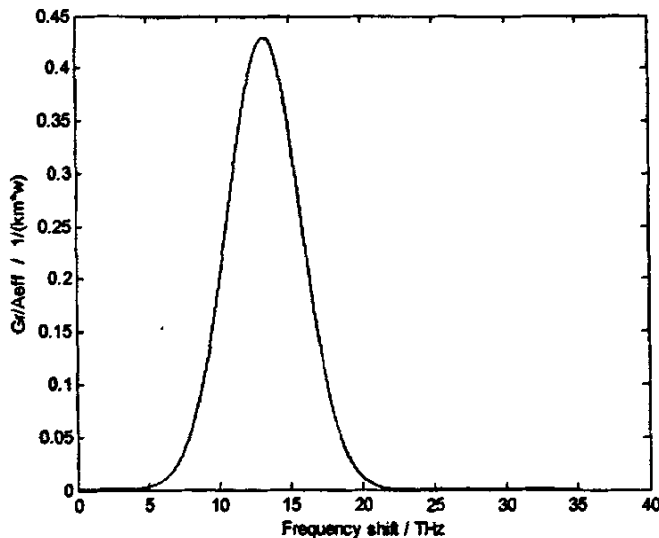


图 4-7 拉曼增益系数 g_R / A_{eff} 与频移的关系

Fig. 4-7 Raman gain coefficient g_R / A_{eff} of SMF at different frequency shift

具体算法设计中，首先是要求解超宽带拉曼放大器的功率耦合方程，仍然

采用基于Runge-Kutta算法反复迭代求解，计算精度为 10^{-4} 。优化算法采用改进的粒子群优化算法，粒子群优化算法的优化参数见表4-1，表格4-2给出了单个粒参数的设置。

表 4-1 PSO 优化算法优化参数

Tab.4-1 Parameters of PSO Optimization

参数名称	参数数值
粒子群大小 popsize	80
粒子的维数 dimsize	12
最大循环数目 itermax	201
学习因子 c1	2
学习因子 c2	2
最大权重因子 wmax	0.5
最小权重因子 wmin	0.1
循环步长 step	5

表 4-2 PSO 中每个粒子的位置和速度限制

Tab.4-2 Boundaries of the particle's location and velocity

dimindex	velocity	location
1	(-200,200)	(100,300)
2	(-200,200)	(100,300)
3	(-200,200)	(100,300)
4	(-200,200)	(100,300)
5	(-200,200)	(100,300)
6	(-200,200)	(100,300)
7	(-200,200)	(100,300)
8	(-200,200)	(100,300)
9	(-200,200)	(100,300)
10	(-200,200)	(100,300)
11	(-200,200)	(100,300)
12	(-200,200)	(100,300)

4.5.2 优化仿真结果

表格4-3给出了优化得到的结果，12个泵浦功率中最大泵浦功率为300mw，最小泵浦功率为100mw，泵浦总功率约为2345mw。图4-8给出了得到的拉曼增益谱曲线，图4-9，4-10分别给出了偶数号和奇数号泵浦光功率沿光线传输的演变图，图4-11给出了拉曼放大器的噪声指数图。

表 4-3 PSO 算法优化结果

Tab.4-3 Results of PSO Optimization

Pump index	wavelength	power
1	1373nm	217.98mw
2	1385nm	300mw
3	1397nm	300mw
4	1409nm	136.53mw
5	1421nm	123.29mw
6	1433nm	192.61mw
7	1445nm	225mw
8	1457nm	100.04mw
9	1469nm	175mw
10	1481nm	150mw
11	1493nm	125mw
12	1505nm	300mw

从图4-8可以看到，我们得到了在1472nm 到1607nm 之间约135nm 的平坦增益谱，此增益谱区间最大增益波动为1dB，几乎涵盖整个C波段和L波段以及大部分S波段，平均净增益约为2.5dB。这个结果是作者目前所知的国内各种优化算法得到的在满足最大增益波动要求下的最宽的拉曼平坦增益谱。可见，应用多波长泵浦光纤拉曼放大器可以得到很宽的并且增益平坦的增益谱，FRA完全有能力独立作为超宽带放大器的能力。

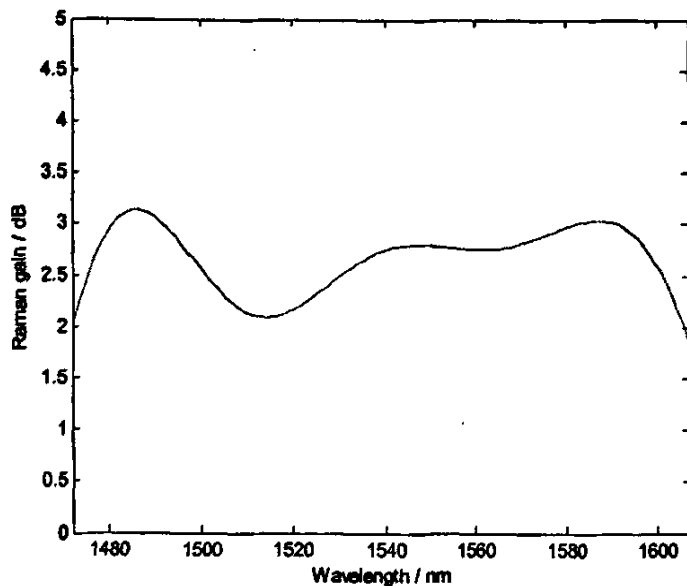


图 4-8 平坦增益谱为 135 nm 的超宽带 FRA

Fig. 4-8 An ultra-broadband FRA with flatness gain spectra of 135 nm

图 4-9, 4-10 分别给出了偶数号和奇数号泵浦波的光功率在传输光纤的演化图。容易看到, 由于泵浦波之间的 SRS 效应, 短波长泵浦光功率消耗更快。

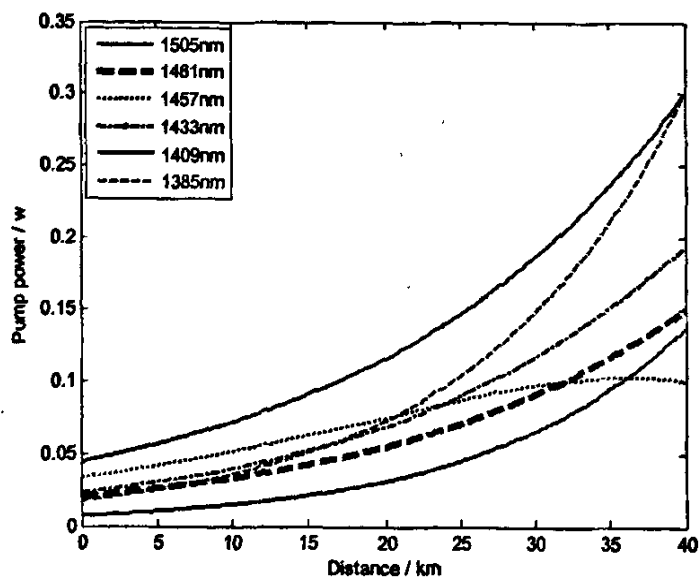


图 4-9 偶数号泵浦光功率演变图

Fig.4-9 Pump power's evolution of even pump waves

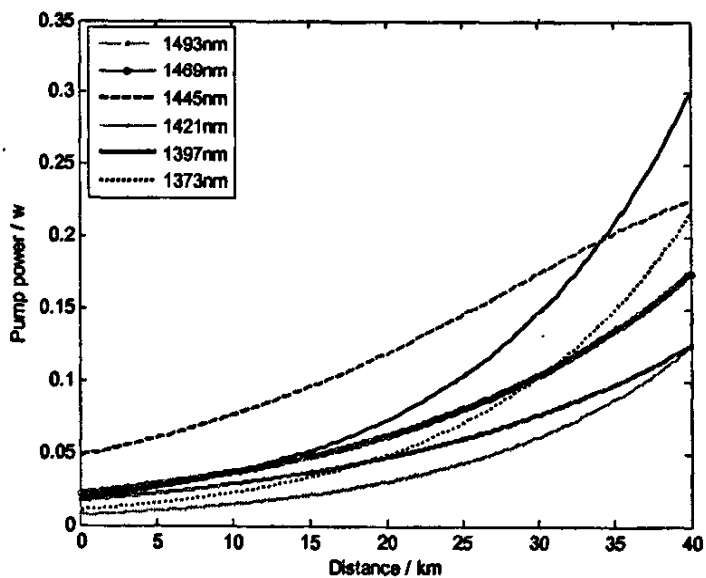


图 4-10 奇数号泵浦光功率演变图

Fig.4-10 Pump power's evolution of odd pump waves

由图4-11可知，由于泵浦光的串扰，越靠近泵浦波长的信道其噪声指数越大，并且放大器最小噪声指数可以小于4.5 dB，优于其它类型的放大器。

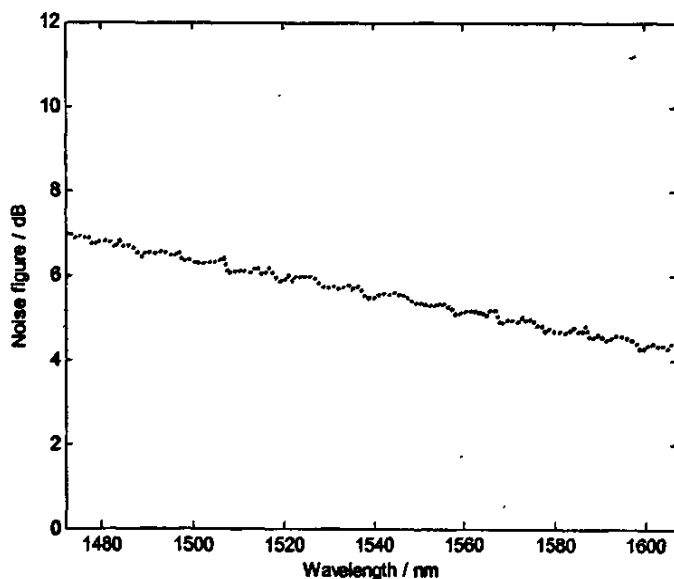


图 4-11 拉曼放大器的噪声指数

Fig.4-11 Raman amplifier's noise figure

4.6 小结

本章讨论了超宽带拉曼光纤放大器优化设计的若干问题。首先阐明了研制超宽带光纤拉曼放大器的重要意义,然后讨论了影响拉曼放大器增益平坦性的几个重要参数和拉曼放大器的噪声特性,在此基础上仿真设计了一种增益带宽达到 135 nm , 最大增益波动为 1 dB 的超宽带光纤拉曼放大器。从而在理论上验证了 FRA 是一种具备独立实现超宽带放大的光放大器,同时证明了粒子群算法可以有效的应用于超宽带光纤拉曼放大器的优化设计问题。这为下一步更深入的研究超宽带拉曼光纤放大器做了较好的理论指导。

但是同时算法存在优化精度不够高(增益波动小于 1 dB , 仍然有提升空间), 粒子容易陷入局部最优, 后期搜索能力不强的问题。如何解决粒子群算法在求解超宽带拉曼放大器泵浦波长和泵浦功率优化配置这类复杂问题中算法后期搜索能力不足的问题, 将是下一步值得研究的一个重要问题。

结 论

目前, FRA 是唯一一种光纤基的全波段放大器, 具有可实现超宽带放大、增益波段由泵浦波长决定、能够进行分布式放大、响应速度快、可降低非线性影响、噪声特性好等诸多优点。因而, 随着大容量、长距离 DWDM 传输系统的大量应用, FRA 的重要性日渐显露。

为获得更宽和更平坦的拉曼增益谱, 一般采用多波长泵浦, 并且需要优化设计 FRA 的泵浦配置, 本文对宽带光纤拉曼放大器的泵浦配置做了研究。在全面求解拉曼放大器功率耦合方程的基础上, 合理设置泵浦光数目, 并且引入粒子群算法优化泵浦光波长和泵浦功率, 并且对增益带宽超过 100nm 的超宽带乃至全波段 FRA 做了探索性的研究, 得到研究结果如下:

基于经典的 Runge-Kutta 算法反复迭代方法是求解多波长泵浦宽带 FRA 的功率耦合方程的一种好方法, 该方法求解过程中综合考虑了信号衰减、信号光、泵浦光以及各种噪声之间的各种相互作用, 对于应用 6 波长反向泵浦的 FRA, 计算精度设置为 10^{-4} , 计算时间可以控制在 20s 以内。相比于打靶法、平均功率分析算法等方法, 该方法求解精度更高, 并且收敛速度较快, 而且可以控制其计算精度, 非常适合应用在多波长泵浦 FRA 功率耦合方程的求解问题。

粒子群优化算法 (PSO) 可以用来优化反向多波长泵浦 FRA 的泵浦配置问题。该方法可以同时优化泵浦波长和泵浦功率, 并且依据泵浦光在光纤传输中的演变规律, 通过设置泵浦功率的“功率阶”, 对优化算法进行了改进, 较好的克服了 PSO 算法精度上的欠缺。在此基础上, 实际应用中仅仅用 6 个泵浦波, 得到了增益带宽 100nm , 最大增益波动小于 0.6dB 的拉曼平坦增益谱。相比于目前国内其它的同类型优化算法, 该算法无论是增益谱宽度还是增益平坦度都处于较优状态。

FRA 在放大器增益带宽方面的优势十分明显, 具备独立实现超宽带光放大的能力。首先讨论了在宽带 FRA 优化设计中影响其增益平坦度的几个重要参数, 仿真结果表明, 宽带 FRA 的增益带宽、增益大小以及增益平坦度三者存在制约关系, 设计中需要合理平衡三者关系; 接着讨论放大器噪声特性, 结果表明, FRA 的增益和信噪比是两个互相矛盾的因素, 需要在保证一定的信噪比的

情况下提高增益。最后具体仿真实施中，应用 12 个泵浦波优化设计得到了一个增益谱涵盖大部分 S 波段，几乎全部的 C 波段和 L 波段，平坦增益（最大增益波动在 1 dB 以内）带宽近 135 nm 的超宽带 FRA，从理论上证明了 FRA 具备超宽带放大能力，它必将成为未来超宽带光放大器的最重要选择之一。

本文仿真设计中尽管全面考虑了各种参数的影响，但由于多波长泵浦 FRA 各种信号光、泵浦光以及各种噪声之间的相互作用以及信号源、泵浦源本身的波动噪声影响十分复杂，并且还有实验条件方面的限制，故仿真设计结果有待于实验方面的进一步验证；此外，PSO 具体应用于超宽带 FRA 泵浦配置的优化设计这类复杂的优化问题中的算法后期的搜索能力以及收敛速度仍有进一步提高的空间，后续方面的研究可以从这两个方面着手。

致 谢

在论文即将完成之际，谨向所有关心和帮助我的老师、同学、亲人和朋友们表达我诚挚的谢意：

首先衷心感谢我的导师潘炜教授在我攻读硕士期间对我的悉心指导。潘老师一丝不苟的治学态度、认真求实和严谨治学的作风、诲人不倦的良师风范和勤奋务实的科研精神给我留下了深刻的印象。本文的工作，皆是在潘老师的指导下才得以顺利完成，从论文的选题、理论分析、写作等无不倾注了潘老师的心血。在近三年的研究生学习中，自己有不少地方做的不够好，但我相信在潘老师做事严谨的态度和做人正直的原则指引下，自己将逐步走向成熟。祝愿潘老师工作顺利，身体健康并且在以后的教学科研等方面取得更大的成就！

罗斌教授也给我提供了很多帮助和支持，特别是学习上，罗老师还给予了我极大的关心和鼓舞，在此向罗老师表示深深的谢意！祝愿罗老师工作顺利，健康幸福！

同样要感谢我的同学陈薇薇、丁莹、李海涛、刘凤洲、滕蕾、王伟、杨磊、张薇、周殊等光通信实验室所有的兄弟姐妹们以及电气学院的丁代勇、冯邦成、郑俊峰等好朋友，谢谢你们在学习上以及生活上给我的关心、帮助及鼓励，这些都将在以后的道路上鼓舞我一直向前。和你们在一起的欢乐时光令人难忘，我们的友情更值得珍惜，尺短情长，衷心祝愿大家无论在天南海北，都能心想事成，快乐每一天！

向远在千里之外的我的父亲母亲还有哥哥弟弟表达我最深的谢意！感谢你们一直以来对我各种支持与鼓励，这些都给了我战胜挫折和困难的无比勇气！

最后，在此向信息科学与技术学院、研究生院致谢！感谢审阅本论文的所有专家和将要参加我答辩的专家，你们的辛勤努力使得本文更加完善！也向所有支持与鼓励过我的老师、同学以及朋友们表示深深的谢意！

孟 超

2007-3-9 于交大眷诚斋 01425

参考文献

- [1] Victor E Perlin, Herbert G Wenful. On distributed Raman amplification for ultrabroad-band long-haul WDM systems [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 2002, 20(3): 409-416
- [2] Kyung Hee Seo, Jae Seung Lee. Signal transmission analysis of backward-pumped fiber Raman amplifiers [J]. IEEE PTL, 2002, 14(7): 932-934
- [3] Mohammed N Islam. Raman amplifiers for telecommunications [J]. IEEE J. Quantum Electron. 2002, 8(3): 548-559
- [4] Minhui Yan, Jianping Chen, Wenning Jiang, et al. Automatic Design Scheme for Optical-Fiber Raman Amplifiers Backward-Pumped With Multiple Laser Diode Pumps [J]. IEEE PTL, 2001, 13(9): 948-950
- [5] Berntson A, Popov S, Vanin E, et al. Polarisation dependence and gain tilt of Raman amplifiers for WDM systems [C]. OFC'2001: MI2
- [6] 王勇, 潘炜, 罗斌 等. 宽带 FRA 中多波长泵浦功率的自动优化方法[J]. J. of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2004, 15(5): 537-540
- [7] Naito T, Tanaka T, Torii K, et al. A broadband distributed Raman amplifier for bandwidths beyond 100 nm [C]. OFC 2002. Anaheim, California: IEEE, 2002, 116-117
- [8] Kennedy J, Eberhar R C. Particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1995 IEEE. International Conference on Neural Network [C]. Perth, Australia, 1995
- [9] G. P. Agrawal 著. 贾东方, 余震虹等译. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社. 2002
- [10] 钱士雄, 王恭明. 非线性光学—原理与进展 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001
- [11] Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides [J]. Appl Phys Lett, 1973, Vol.22, No.6:276-278

-
- [12] Bumki Min, Won Jae Lee, Namkyoo Park. Efficient Formulation of Raman Amplifier Propagation Equations with Average Power Analysis [J]. IEEE PTL, 2000, 12(11): 1486-1488
- [13] Shu Namiki, Yoshihiro Emori. Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by Wavelength-Division-multiplexed High-Power Laser Diodes [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2001, 7(1):3-15
- [14] Fludger C, Maroney A., Jolley N, et al. An analysis of the improvements in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibre [C]. OFC, 2000, 4:100-102
- [15] Emori Y, Tanaka K, Namiki S. 100nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wave-length-channel WDM laser diode unit [J]. Electron Lett, 1999, 35(16): 1355-1356
- [16] G. P. Agrawal. Fiber-optic Communication Systems [M], 3rd, Beijing:Tsinghua university press,2004
- [17] Chernikov S V, Taylor J R Platonov N S, et al. High-power,compact, high-efficiency, fiber laser source around 1.24 μm for pumping Raman amplifiers [C]. OFC, 1997, WQ4:345
- [18] 孟超, 潘炜, 罗斌, 等. 反向多波长泵浦宽带 FRA 泵浦配置的一种优化方法 [J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 329-331
- [19] Howard Kidorf, Karsten Rottwitt, Morten Nissov, et al. Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier [J]. IEEE PTL, 1999, 11(5): 530-532
- [20] 刘红林, 张在宣, 庄松林. 用打靶法求解双向泵浦的拉曼放大器传输方程 [J]. Opto-Electronic Engineering (光电工程), 2004, 31(12): 46-49
- [21] 常建华, 张明德, 孙小茵. 计算多波长泵浦光纤拉曼放大器传输方程的新方法 [J]. Chinese Journal of Lasers (中国激光), 2004, 31(5): 516-518
- [22] Minhui Yan, Jianping Chen, Wenning Jiang, et al. Automatic Design Scheme for Optical-Fiber Raman Amplifiers Backward-Pumped With Multiple Laser Diode Pumps [J]. IEEE PTL, 2001, 13(9): 948-950
- [23] Pengcheng Xiao, Qingji Zeng, Jun Huang and Jimin Liu .A New Optimal Algorithm for Multipump Sources of Distributed Fiber Raman Amplifier [J].
-

- IEEE PTL, 2003, 15(2): 206-209
- [24] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. Proceedings of the 1995 IEEE. International Conference on Neural Network [C], Perth, Australia, 1995
- [25] 姜海明, 谢康, 王亚非. 基于粒子群算法的拉曼光纤放大器的多抽运源优化 [J]. J. of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2004, 15(10): 1012-1014
- [26] 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]. Acta Optica Sinica (光学学报), 2003, 23(2): 193-196
- [27] Masuda H. Review of wideband hybrid amplifiers [C]. OFC, 2000, 1:2-4
- [28] Shingo K, Hiroji M, Ken-Ichi S. Wide-Bandwidth and Long-Distance WDM Transmission Using Highly Gain-Flattened Hybrid Amplifier [J]. IEEE Photon Technol. Lett., 1999, 11(7): 886-888
- [29] Iwatsuki K, Nishi S, Saruwatari, M, et al. 5 Gb/s optical soliton transmission experiment using Raman amplification for fiber-loss compensation [J]. IEEE Photon Technol Lett., 1990, 2(7): 507-509
- [30] Espindola R P, Bacher K L, Kojima K, et al. High power, low RIN, spectrally-broadened 14xx DFB pump for application in co-pumped Raman amplification [C]. EOFC, 2001, 6:36-37
- [31] Ania-Castanon J D, Kobtsev S M, Pustovskikh A A, et al. Simple design method for gain-flattened three-pump raman amplifiers[S]. IEEE LEOS, 2002, 2:500-501
- [32] Rouger C, Jolley N, et al. A new all-wave fiber for distributed Raman amplifiers using modern transmission fibre [C]. OFC, 2003, 4: 100-102
- [33] Subias J, Pelayo J, Heras C, et al. Measurement of the effective area of non-linear power transfer in single-mode fibers due to stimulated Raman scattering [J]. Optics Communication, 2000, Vol.176, No.1:387-392
- [34] Stolen R H, Clinton L, Jain R K. Development of stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers [J]. J Opt Soc Am B, 1984, 1(4): 652-657
- [35] Davey S T, Williams D L, Ainslie B J, et al. Optical gain spectrum of GeO₂-SiO₂ Raman fibre amplifiers [J]. IEE Proceedings Pt, 1989, 136(6):

301-306

- [36] Masda H, Kawai S, Wide-band and gain-flattened hybrid fiber amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Raman amplifier [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(7): 647-649
- [37] Kani J, Jinno M. Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fiber amplifier and fiber Raman amplifier [J]. Electron. Lett. 1999, 35(12): 1004-1006
- [38] Kyung Hee Seo, Jae Seung Lee. Signal transmission analysis of backward-pumped fiber Raman amplifiers [J]. IEEE PTL, 2002, 14(7): 932-934
- [39] Mohammed N. Islam. Raman amplifiers for telecommunications [J]. IEEE J. Quantum Electron. 2002, 8(3): 548-559
- [40] 童治, 魏怀, 简水生. 光纤拉曼放大器噪声特性的研究[J]. 光通信研究, 2001, Vol.105, No.3: 59-62
- [41] 童治, 魏淮, 简水生. 光纤喇曼放大器的特性及其在宽带通信中的应用[J]. 光学技术, 2001, 127(3): 196-199
- [42] Masuda H, Kawai S, Suzuki K, et al. Wide-band and low noise optical amplification using distributed Raman amplifiers and erbium-doped fiber amplifiers [C]. ECOC, 1998, 1: 51-52
- [43] 王智, 简水生. 多波长泵浦宽带拉曼放大器功率增益的 Lorentz 近似研究 [J]. J. of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2001, 12(8): 816-820
- [44] Guy M J, Chemikov S V, Taylor J R. Lossless transmission of 2 ps pulse over 45 km of strand fiber at 1.3 μm using distributed Raman amplification. Electron. Lett., 1999, 11(7): 886-888
- [45] Roger S.P. 软件工程-实践者的研究方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.10
- [46] 王勇, 潘炜, 罗斌等. FRA 中增益平坦与抽运光数目的数值模拟与优化 [J]. Opto-Electronic Engineering (光电工程), 2004, 31(12): 54-57
- [47] 何敬锁, 郭同文等. 用简化模型实现多波长抽运拉曼光线放大器的优化设计 [J]. Acta Optica Sinica (光学学报), 2003, 23(7): 819-823
-

-
- [48] Davey S T, Williams D L, Ainslie B J, et al. Optical gain spectrum of GeO₂-SiO₂ Raman fibre amplifiers [J]. IEE Proceedings Pt J, 1989, 136(6):301-306
- [49] 梅进杰, 刘德明, 黄德修. 宽带增益平坦光纤 Raman 放大器的研究进展 [J]. 半导体光电, 2001, Vol.22, No.5:304-307
- [50] Foley B, Dakss M L, Davies R W, et al. Gain saturation in fiber Raman amplifiers due to stimulated Brillouin scattering[J]. J Lightwave Technol, 1989, Vol.7, No.12: 2024-2032
- [51] Dianov E M, Grekov M V, Bufetov, et al. Highly efficient 1.3 μm Raman fiber amplifier . Electron. Lett., 1998, 34(7): 669~670
-

攻读硕士学位期间发表论文

攻读硕士学位期间发表论文

- [1] 孟超, 潘炜, 罗斌, 等. 反向多波长泵浦宽带 FRA 泵浦配置的一种优化方法 [J]. *激光与红外* (中文核心期刊, 统计源期刊), 2007, 37(4): 329~331
- [2] 刘凤洲, 潘炜, 罗斌, 孟超. WDM 光网络中一种备用路由下支持优先级的波长分配算法[J]. *光通信技术* (中文核心期刊, 统计源期刊), 2006.11.

参加的科研工作

- [1] 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室开放基金 (NO: KF2006)
 - [2] 教育部科学技术研究重点项目 (NO: 105148)
-