

学校编码: 10384

分类号____密级____

学 号: 23220130154296

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

DWDM 系统中光纤布拉格光栅滤波器与拉曼放大器的智能优化研究

Research on Intelligent Optimization of Fiber Bragg Grating Filter and Raman Fiber Amplifier in DWDM System

陈 静

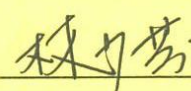
指导教师姓名: 刘 瞰 东 教 授

专 业 名 称: 系 统 工 程

论文提交日期: 2016 年 5 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: 

评 阅 人: _____

2016 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为()课题(组)的研究成果，获得()课题(组)经费或实验室的资助，在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。)

声明人(签名): 陈静

2016年 5 月 18 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）： 陈静

2016年5月18日

摘要

随着网络化大数据时代的到来,互联网应用和数据通讯业务的日益剧增,对通信网络的传输容量、速率和带宽提出了更高的要求。为了适应光纤通信系统对高速、大容量、超长距离的传输要求,密集波分复用(DWDM)技术成为一种能够有效挖掘和扩充光纤网络带宽资源并被广泛应用的技术方案。DWDM系统中新型器件的研究和开发进一步推动了光纤传输系统性能的提升。多信道光滤波技术和全波长光放大技术是DWDM突破网络容量瓶颈的两项最核心的技术支撑。其中,多信道光纤布拉格光栅(FBG)滤波器凭借其灵活的波长选择和优良的窄带传输特性在波长复用解复用和增加系统容量中发挥重要作用;多泵浦拉曼光纤放大器特有的分布式全波长放大,可有效降低非线性效应和噪声,在实现宽带放大和延伸光传输距离方面具备巨大的优势。本文主要关注这两种关键光纤器件在设计层面存在的优化问题。从智能优化角度,将FBG滤波器和拉曼放大器的逆向工程设计问题转化为优化问题,运用智能计算的理论方法和技术手段,提出解决方案提升器件性能。主要研究工作如下。

(一) 多信道FBG滤波器的优化研究

FBG凭借其尺寸小、成本低、插入损耗低、系统兼容性好等优点可以构成有良好的波长选择特性和波长精度的多信道滤波器。但是随着信道数的递增,其设计和制备工艺都会变得更加复杂和困难。针对这方面的研究,本文进行了以下工作。

(1) 针对多信道FBG滤波器设计过程中存在折射率调制峰值容易超过物理可实现范围的问题,详细剖析了造成折射率调制峰值过高的原因,提出了群延迟变量的多信道反射光谱的滤波器模型,结合离散层析法对折射率调制分布进行调整和降低。在此基础上建立了以最小化折射率调制峰值和色散误差为目标的优化模型,将FBG参数重构问题转化为群延迟变量寻优问题。本文采用了差分进化算法对模型进行求解,通过实验分别给出不同信道数不同光栅长度的FBG滤波器的设计方案,证明了该方法的有效性。

(2) 针对FBG的折射率调制峰值和色散指标之间的优化矛盾瓶颈,以Pareto多目标优化理论为指导,建立了一种更为合理有效的多信道FBG滤波器的多目

标模型，提出一种将多目标进化遗传算法（NSGA-II）和逼近理想解排序法（TOPSIS）相结合的求解思路。采用 NSGA-II 求解出一系列 Pareto 最优解，再利用 TOPSIS 做进一步最优解的决策。设计结果表明了该方法能够合理地处理折射率调制峰值和色散之间的权衡，具有一定的参考价值。

（二）多泵浦拉曼放大器的优化研究

拉曼光纤放大器（RFA）在光纤通信系统中不仅要满足大带宽、高功率等特性，还要考虑的一个关键问题就是其增益谱的平坦化。多泵浦技术是实现 RFA 增益平坦度控制的一种有效途径。但是，如何高效地选取最优的泵浦波长功率配置成为多泵浦 RFA 设计的难点。针对这方面的研究，本文进行了以下工作。

（1）为了解决多泵浦 RFA 在数学模型计算中的效率问题，本文提出了一种基于机器学习技术的解决思路。将拉曼耦合方程的非线性求解过程等价于以泵浦波长和泵浦功率作为输入、增益作为输出的多输入多输出回归问题。离线训练阶段，利用机器学习算法完成样本训练和建立 RFA 回归模型；在线优化阶段，将回归模型融入进化算法的优化过程，完成泵浦参数的优化配置。本文分别采用了最小二乘支持回归机（LSSVR）和极限学习机（ELM）算法进行模型构建。实验从模型精度验证、RFA 增益分析和不同算法的性能对比等方面验证了该方法的高效性。

（2）为了平衡多泵浦 RFA 设计中不同性能需求，本文提出了同时以最大化拉曼开关增益和最小化增益波动为优化目标的多目标模型。在上述基于机器学习的 RFA 模型的基础上，利用改进的强度 Pareto 进化算法（SPEA2）获取 Pareto 前沿，并从 Pareto 解集中选取出合适的解，最终给出详细的 RFA 设计方案。

综上所述，本课题属于交叉学科应用基础研究，涉及信息学、光学等多学科领域，主要围绕 DWDM 系统的滤波器和放大器技术进行了探讨和分析，采用智能计算的理论方法和技术手段为光器件的优化提出新的解决思路和设计方案，进一步推进智能光器件的创新，促进光网络向宽带化、智能化、综合化发展。

关键词：光纤布拉格光栅；拉曼光纤放大器；进化计算；机器学习；多目标优化

Abstract

With the coming of the big data era, the demands for the optical communication network with large capacity, high speed, and wide bandwidth have increased dramatically. The dense wavelength division multiplexing (DWDM) technology can effectively utilize the huge bandwidth resource to meet the bandwidth requirement and has been widely applied. The advanced devices in DWDM system will further promote the performance of the optical transmission system. The multichannel fiber Bragg grating (FBG) filters are useful for DWDM system owing to their flexible multi-wavelength selection. The Raman fiber amplifiers (RFAs) exhibit various merits such as low noise, flexible amplification bandwidth and high gain, and become promising devices to expand DWDM system bandwidth. In the thesis, the optimization issues in the synthesis of the FBG filters and RFAs are addressed by utilizing the intelligent computation methods. The detailed work is described as follows.

1. Optimization of multichannel fiber Bragg grating filter design

FBG featuring a multichannel spectral response has its advantageous characteristics of small size, low cost, low insertion loss, and good compatibility. However, when channel count increases, the design and fabrication of a multichannel FBG filter is a challenging task. The following work is carried on in this study.

(1) An optimization method based on evolutionary algorithm for multichannel FBG filter synthesis is proposed. The approach synthesizes the grating by introducing the group delay parameter and transforming the inverse problem into an optimization problem. Differential evolution (DE), a powerful evolutionary algorithm, is employed to search the appropriate group delay parameters. The results show that the method reduces maximum index modulation and meanwhile optimize the dispersion profile in FBG channel.

(2) A Pareto-based multiobjective optimization technique for multichannel FBG filters synthesis is proposed. The goal is to optimize the maximum index modulation and to optimize the dispersion of the FBG. A two-stage method is proposed. NSGA-II algorithm is used to obtain the Pareto front and then the TOPSIS approach is employed to select an appropriate solution. The design results show that the approach can get a good balance of the two objectives and improve the performance.

2. Optimization of multi-pump gain-flattened Raman fiber amplifiers design

The gain spectrum flattening is a key problem in the design of RFA. Multiple pumping technique is commonly used as an effective solution. The shape of the Raman gain spectrum largely depends on the different pump wavelength and pump power level combinations. Hence, finding the ideal and optimized pump configuration that can generate the flat gain spectrum with low gain ripple and expand the bandwidth is necessary. The main work is completed as follows.

(1) An efficient method to design the multi-pump Raman fiber amplifier is proposed based on machine learning technique. A multi-input multi-output RFA model is introduced to replace the complicated solving process of the nonlinear coupled Raman amplification equation. The proposed approach contains two phases: offline training phase and online optimization phase. During the offline phase, the RFA model is trained. During the online phase, the well-trained RFA model is incorporated into the evolutionary algorithm to find the optimal pump configuration. Two promising machine learning method, least squares support vector regression (LSSVR) and extreme learning machine (ELM) is employed to establish the RFA model. The design results demonstrate that the proposed method greatly shortens the computation time and enhances the efficiency of the pump parameter optimization for RFA design.

(2) Multi-objective Raman amplifier design is presented to balance the conflicting requirements of the on-off gain and ripple specifications. This study attempts to find the optimal pump configuration. Based on the machine learning RFA model, the strength Pareto evolutionary algorithm (SPEA2) is applied to obtain the Pareto front. The appropriate solution is selected from the Pareto solutions to provide

the pump parameters. The design examples show that the method is capable of determining high-quality solutions for multipump RFA design.

The study belongs to the applied basic research within the interdisciplinary fields involving informatics and optics. Based on the intelligent computation technique, the thesis resolves the optimization problems of the multichannel FBG filters and the multipump RFAs design. The proposed novel ideas and effective methods enhance the intelligence of the optical devices. The trend of the optical communication network will be more broadband, intelligent, and comprehensive.

Keywords: fiber Bragg grating; Raman fiber amplifier; evolutionary computation; machine learning; multiobjective optimization.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 多信道光纤布拉格光栅滤波器的研究现状.....	3
1.2.2 多泵浦拉曼光纤放大器的研究现状.....	6
1.3 本文的主要内容	10
1.4 本文的创新之处	11
1.5 本文的章节安排	12
第二章 光纤布拉格光栅滤波器基础理论	14
2.1 光纤布拉格光栅滤波原理	14
2.1.1 基础理论模型及滤波原理.....	14
2.1.2 多信道光谱特性分析.....	16
2.2 光纤布拉格光栅传输理论基础	18
2.3 光纤布拉格光栅重构理论基础	20
2.4 本章小结	22
第三章 基于差分进化的多信道 FBG 滤波器的优化设计.....	23
3.1 多信道 FBG 滤波器重构问题分析	23
3.2 多信道 FBG 滤波器的优化建模	25
3.2.1 引入群延迟变量.....	25
3.2.2 建立优化模型.....	27
3.3 差分进化算法	30
3.4 实验结果	32
3.5 本章小结	38

第四章 基于 NSGA-II 的多信道 FBG 滤波器多目标设计	39
4.1 Pareto 多目标优化理论	39
4.2 多信道 FBG 滤波器的多目标建模	41
4.3 多目标优化算法	42
4.3.1 多目标进化计算	42
4.3.2 NSGA-II 算法	43
4.4 多目标决策算法	45
4.5 实验结果	47
4.6 本章小结	52
第五章 拉曼光纤放大器原理与数值求解	54
5.1 拉曼光纤放大器的工作原理	54
5.1.1 受激拉曼散射效应	54
5.1.2 拉曼光纤放大器基本结构	55
5.2 多泵浦实现拉曼光纤放大器的增益平坦化	58
5.2.1 RFA 的增益特性	58
5.2.2 RFA 的增益平坦化	60
5.3 多泵浦拉曼光纤放大器的数学模型和计算	61
5.3.1 多泵浦 RFA 的数学模型	61
5.3.2 拉曼耦合方程的数值求解	63
5.4 本章小结	65
第六章 基于回归模型的多泵浦拉曼光纤放大器的优化设计	66
6.1 多泵浦 RFA 回归原理与优化模型	66
6.2 多泵浦 RFA 最小二乘支持回归模型	68
6.2.1 LSSVR 算法	68
6.2.2 实验结果	72
6.3 改进的回归模型及多泵浦 RFA 优化	76
6.3.1 LSSVR 的局限性	76
6.3.2 极限学习机	77

6.3.3 实验结果.....	79
6.4 本章小结	84
第七章 基于 SPEA2 的多泵浦拉曼光纤放大器的多目标设计	85
7.1 多泵浦 RFA 的多目标建模	85
7.2 SPEA2 算法	87
7.3 实验结果	89
7.4 本章小结	92
第八章 总结与展望	93
8.1 总结	93
8.2 展望	94
附录.....	95
[参考文献].....	96
在学期间发表及完成的论文	109
致谢语.....	111

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance of the study	1
1.2 The research status	3
1.2.1 Multichannel of fiber Bragg grating filter	3
1.2.2 Multipump Raman fiber amplifier	6
1.3 Main contents of this thesis	10
1.4 The innovation of this thesis	11
1.5 The structure of this thesis	12
Chapter 2 Theories and Methods of Fiber Bragg Grating Filter	14
2.1 Filtering principle of FBG	14
2.1.1 Basic theoretical model of FBG.....	14
2.1.2 Multichannel spectral characteristics analysis	16
2.2 Transmission theory of FBG	18
2.3 Reconstruction theory of FBG	20
2.4 Brief summary	22
Chapter 3 Optimal Design of Multichannel FBG Filter Based on Differential Evolution	23
3.1 Problem description and analysis	23
3.2 Optimization modeling	25
3.2.1 Group delay parameter.....	25
3.2.2 Optimal model	27
3.3 Differential evolution	30

3.4 Experiments and results	32
3.5 Brief summary	38
Chapter 4 Multiobjective Optimization of Multichannel FBG Filter	
Based on NSGA-II	39
4.1 Pareto theory	39
4.2 Multiobjective design.....	41
4.3 Multiobjective optimization method	42
4.3.1 Multiobjective evolutionary algorithm	42
4.3.2 NSGA-II algorithm	43
4.4 Multiobjective decision-making algorithm.....	45
4.5 Experiments and results	47
4.6 Brief summary	52
Chapter 5 Theories and Methods of Raman Fiber Amplifier	54
5.1 Amplification principle of RFA.....	54
5.1.1 Stimulated Raman scattering	54
5.1.2 Basic structure of RFA.....	55
5.2 Multipump gain-flattened RFA	58
5.2.1 Gain characteristic	58
5.2.2 Gain flattening technique.....	60
5.3 Mathematical model and calculation for RFA	61
5.3.1 Mathematical model.....	61
5.3.2 Numerical methods	63
5.4 Brief summary.....	65
Chapter 6 Optimal Design of Multipump Raman Fiber Amplifier	
Based on Regression Model	66
6.1 Regression principle and optimal model.....	66
6.2 Least squares support vector regression model	68
6.2.1 LSSVR algorithm.....	68

6.2.2 Experiments and results	72
6.3 Improved regression model and RFA optimization	76
6.3.1 Limitation of LSSVR.....	76
6.3.2 Extreme learning machine	77
6.3.3 Experiments and results	79
6.4 Brief summary.....	84
Chapter 7 Multiobjective Optimization of Multipump Raman Fiber Amplifier Based on SPEA2	85
7.1 Multiobjective optimization model.....	85
7.2 SPEA2 algorithm	87
7.3 Experiments and results	89
7.4 Brief summary.....	92
Chapter 8 Conclusions and Future Works	93
8.1 Conclusions.....	93
8.2 Future works	94
Supplements.....	95
[References]	96
Published and finished papers during the study period	109
Acknowledgements	111

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.