

文章编号: 1001-3806(2013)01-0036-04

## 光纤光栅解调系统的寻峰算法研究

张天地 贺锋涛\* 周 强 贾琼瑶 李雪峰

(西安邮电大学 电子工程学院 光电子技术系 西安 710061)

**摘要:** 为了提高光纤光栅波长解调系统的反射谱寻优精度,利用遗传算法的未成熟收敛性进行了研究。阐明了遗传算法提高解调精度的原理,以可调谐 F-P 腔的光纤光栅解调系统为基础,验证了算法的可行性和可靠性。使用 MATLAB 对 F-P 腔滤波光纤光栅解调系统的反射光谱进行寻峰,得到传感光纤光栅的中心波长。分析了算法中初始种群数量、遗传代数、变异率对寻优结果影响,并得到一组最佳遗传算法参量。算法精度达到 3pm 数量级,50 次重复计算数据标准差小于 0.5pm。结果表明,该算法稳定高效、实用性强,可以显著减小噪声对光纤光栅传感系统的影响,提高解调精度。

**关键词:** 传感器技术; 光纤布喇格光栅解调; F-P 腔滤波器; 遗传算法

**中图分类号:** TN253; TP212.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.009

### Research of peak-detection algorithm in a fiber grating demodulation system

ZHANG Tian-di, HE Feng-tao, ZHOU Qiang, JIA Qiong-yao, LI Xue-feng

(Department of Photo-Electric Technology, School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** In order to improve the precision of peak-detection of a fiber Bragg grating demodulation system, it was studied based on the premature convergence characteristics of the genetic algorithm. It was expounded how the genetic algorithm can improve the accuracy of fiber Bragg grating demodulation. Taking a fiber Bragg grating demodulation system based on fiber Fabry-Perot (F-P) wavelength filter as example, the feasibility and reliability of the algorithm were testified. The peak reflected spectrum of the fiber Fabry-Perot filter fiber Bragg grating demodulation system was detected with MATLAB and its central wavelength was obtained. The effect of initial population number, genetic algebra, mutation rate on the peak detection of the algorithm was analyzed and a set of optimal parameters were obtained. The precision was equal or less than 3pm, standard deviation was less than 0.5pm for 50 repetition computations. The results show that the algorithm is stable, effective, and practical, can significantly reduce the noise of a fiber grating sensor system, improve the precision of demodulation.

**Key words:** sensor technique; fiber Bragg grating demodulation; F-P wavelength filter; genetic algorithm

### 引 言

光纤光栅传感器具有灵敏度高、不受光路光强波动干扰<sup>[1-4]</sup>、不受电磁波干扰、易于实现分布式传感等优点,已成为传感器应用领域的研究热点。光纤光栅传感器应用的主要难题是波长解调。研究者提出了如边缘滤波解调法、F-P 滤波法、干涉解调法、三角型滤波器法等各种新的解调方法<sup>[5-7]</sup>。在这些解调方法中, F-P 腔滤波法因其精确度高,易于构成全光纤网络,被

广泛应用于波长解调。

在实际应用中,由于噪声的干扰,会出现光纤光栅反射光谱峰值波长不与 Bragg 波长重合的情况,这时除了使用各种滤波器去除噪声以提高精度外,算法也是提高精度的重要手段<sup>[8-9]</sup>。光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感解调系统的 6 种常用寻峰算法包括:一般多项式拟合法、多项式-高斯公式拟合法和高斯公式非线性曲线拟合法等<sup>[10]</sup>。这些算法对噪声的要求较高,要求噪声幅值在信号幅值的 0.1 倍以下,否则将产生较大的误差。遗传算法作为一种全局搜索算法,其随机搜索特性对提高解调精度具有很大改善,即使在噪声较大的情况下,仍能保持较高的精度(3pm)。

为了解决适应度函数给实际解调带来的不便,使用十进制编码对染色体的基因座编码,使数据处理的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60878060)

作者简介:张天地(1987-),男,硕士研究生,现主要从事光电传感检测的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hefengtao@xyyou.edu.cn

收稿日期:2012-04-23;收到修改稿日期:2012-05-21

效率大大提高。遗传算法的优越性主要表现在: 首先, 它在搜索过程中容易收敛于全局最优, 即使在所定义的适应函数是不连续、非规则或有噪声的情况下; 其次, 遗传算法非常适用于大规模并行计算。

### 1 F-P 滤波解调法原理

基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 解调系统主要由宽带光源和可调谐 F-P 腔组成。宽带光源发出的光经耦合器到达 FBG, FBG 的反射光经耦合器进入可调谐 F-P 滤波器。传感光纤光栅的反射谱  $R_0(\lambda)$ , 可近似取高斯分布, 即:

$$R_0(\lambda) = I_0 R_s \exp \left[ - \frac{4 \ln 2 \cdot (\lambda - \lambda_1)^2}{\Delta \lambda_1^2} \right] \quad (1)$$

式中  $R_s$  为传感光纤光栅的峰值反射率,  $\lambda$  为光波长,  $\lambda_1$  为中心波长,  $\Delta \lambda_1$  为半峰全宽,  $I_0$  为入射光的光强。

当光束垂直入射时, 忽略光线在腔内反射时的附加位移, 其透射率  $T$  可表示为:

$$T = \frac{(1 - R_m)^2}{(1 - R_m)^2 + 4R_m \sin^2 \left( \frac{2\pi n l}{\lambda} \right)} \quad (2)$$

式中  $R_m$  为腔镜反射率,  $l$  为腔长,  $n$  为折射率。

当由光源发出的光经过传感光栅的反射光与 F-P 腔后, 入射到光电检测器的光谱为二者的积分, 即:

$$P_d = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} R_s(\lambda) T(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中  $P_d$  可以表示成  $\lambda$  为自变量的函数, 当调谐至  $\lambda = \lambda_s$  时, 为此函数的最大值。

### 2 遗传算法寻优

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种以自然选择和遗传理论为基础<sup>[11-14]</sup> 模拟生物进化过程中, 适者生存规则和染色体随机信息交换机制的全局寻优搜索算法。特别适合于处理传统优化算法解决不好的复杂和非线性问题。遗传算法其基本流程是模拟由二进制数串表示的染色体集合, 即种群的进化过程, 进化方向由适应度函数决定, 适应度小的个体在选择函数中淘汰, 适应度高的个体进化到子代, 最后收敛于最佳个体。

遗传算法的基本流程和基本步骤如图 1 所示: (1) 自变量编码, 将反射谱数据按十进制编码; (2) 初始群体生成; (3) 适应度评价, 按反射谱的幅值定义适应度; (4) 确定遗传策略, 包括初始种群大小、杂交概率、变异概率等; (5) 按照遗传策略产生子代串; (6) 迭代  $n$  次后按某一指标输出最佳个体; 解码, 输出峰值对应的波长。

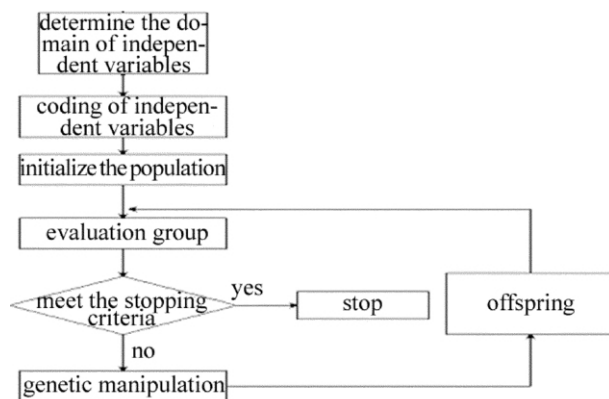


Fig. 1 Genetic algorithm process

#### 2.1 遗传算法的编码

由问题空间到遗传算法编码空间的映射称作编码, 就是解的算法表示, 反之称之为译码。编码问题是遗传算法应用于实际问题的首要问题, 编码的好坏直接影响遗传操作的运行。传统的编码方法是二进制编码, 二进制的位数由所要求的精度决定, 二进制编码的主要缺点是汉明悬崖 (Hamming cliff, HC), 即某些相邻整数的二进制代码间有很大的汉明距离, 使得遗传算法的交叉和变异都难以跨越。

在诸多编码方式中, 实值编码具有精度高, 便于大空间搜索的优点。因此, 结合 F-P 腔解调系统的实际光谱数据形式, 以每一个采样点为一个基因座, 按次序对基因座进行十进制实值编码。

#### 2.2 遗传算法对噪声的修正

在 F-P 腔滤波的光纤光栅波长解调系统中, 噪声可分为光噪声和电噪声两类, 其中光路噪声主要来源于光路连接处的固有反射和宽带光源的噪声, 如图 2 所示, 图中纵坐标为光功率, 单位是 nW, 横坐标表示波长变化, 单位是 nm。光噪声虽然不会直接扰动传感光栅的布喇格波长, 但是在波长解调时, 一般是寻找反射谱峰值处对应的波长, 光谱仪即是采用此种方法, 当反射谱峰值对应的波长不是传感光栅布喇格波长时, 输出的结果也会有误差。如图 2 所示, 此反射谱峰值

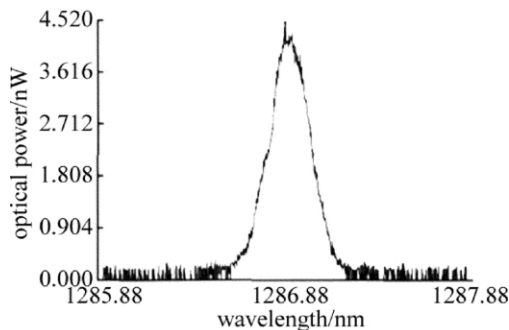


Fig. 2 FBG reflection spectrum with noise

并不与布喇格波长对应,这种由光路噪声引起的误差一般会达到10 $\mu\text{m}$ 数量级。

在遗传算法作为一种全局搜索算法,交叉、变异操作是搜索能力的核心<sup>[15-17]</sup>。交叉运算的作用是产生新个体,它决定了遗传算法的全局搜索能力。变异运算作为产生新个体的辅助运算,它决定了遗传算法的局部搜索能力,当变异率较小时,局部搜索空间小,算法收敛会很快;变异率较大时则相反,收敛较慢。

遗传算法的未成熟收敛性(也称早熟)是指当算法终止时,收敛在最大(最小)解的附近,而不能收敛于最大(小)值的现象,利用遗传算法的这个独特优点,可以选取合适的变异率,控制算法不收敛于反射谱的最大峰值,而是收敛于最大值附近的中心波长处,将 $n$ 次计算的结果取平均值,作为反射谱最终寻优结果。

### 3 算法分析

使用MATLAB对如图2所示解调系统的反射光谱进行处理,将光谱数据带入遗传算法进行分析,遗传算法程序使用谢菲尔德大学遗传算法工具包编程。

传感光栅中心波长为1551.25nm。在本算法中,决定算法收敛区间的参量包括初始种群个数、遗传代数、代沟率等,这些参量同时决定了算法搜索空间、收敛速度,进而决定了光谱寻优的精度。

#### 3.1 初始种群个数 $n$ 的分析

取进化代数maxgen值为500,代沟率0.9,重组率0.7,实值种群变异率0.4,取不同的 $n$ 值,计算10次运行的平均值和标准差,运行结果见表1。

Table 1 Analysis of the initial population

initial population	$\lambda_s$ /nm	$\lambda_s$ standard deviation/nm
100	1551.2443	0.0113
50	1551.2406	0.0356
40	1551.1525	0.2796
30	1551.2253	0.0931

由结果可知,当初始种群小于50时,运行结果偏差较大,初始种群应在100以上。

#### 3.2 遗传代数maxgen分析

初始种群为100,代沟率0.9,重组率0.7,变异率0.4,每组参量运行10次后取平均值,结果见表2。

Table 2 Genetic analysis of algebra

algebra	$\lambda_s$ /nm	$\lambda_s$ standard deviation/nm
50	1551.2734	0.0723
100	1551.2471	0.0125
200	1550.2021	0.3483
300	1551.2408	0.4437
400	1551.2494	0.3414

### 3.2 变异率分析

决定局部搜索能力的是变异率,当算法收敛较慢时,可以改变变异率加快收敛,同时提高精度。初始种群100,遗传代数500,代沟率0.9,重组率0.7,每组参量运行10次后取平均值,结果见表3。

Table 3 Mutation rate analysis

mutation rate	$\lambda_s$ /nm	$\lambda_s$ standard deviation/nm
0.4	1551.2911	0.1739
0.38	1551.2530	0.0930
0.36	1550.2519	0.0106
0.34	1551.2511	0.0015
0.32	1551.2631	0.0136

由算法分析的结果可以看出,最优化的参量应该是:初始种群100,遗传代数500,代沟率0.9,重组率0.7,变异率0.34。使用此参量对如图1所示的系统进行寻优,精度达到3 $\mu\text{m}$ ,标准差小于0.5 $\mu\text{m}$ 。

### 4 结论

将十进制编码的遗传算法应用于光纤光栅波长解调系统,阐明了遗传算法对光纤光栅反射谱寻优的理论基础,在此基础上进行了模拟仿真实验。结合光纤光栅反射谱特点对遗传算法的主要参量进行分析,最佳参量的算法精度达到3 $\mu\text{m}$ ,50次重复计算得数据标准差小于0.5 $\mu\text{m}$ 。

#### 参 考 文 献

- [1] CHEN Sh Zh, LÜ J Sh, WANG X Y, *et al.* Study on ocean temperature and depth measurement system based on fiber Bragg grating[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 581-583( in Chinese) .
- [2] QIAO X G, DING F, JIA Zh A, *et al.* Research on a demodulation technology based on edge of linear filters of ASE light source [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 2009 20(9): 42-45( in Chinese) .
- [3] LIAO C R, WANG Y, WANG D N, *et al.* Fiber inline Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2010 22(2): 1686-1688.
- [4] JAUREGUI C, QUINTELA A, LOPEZ-HIGUERA J M. Interrogation unit for fiber grating sensors that uses a slanted fiber grating [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 676-678.
- [5] JIANG M Sh, MENG L, SUI Q M, *et al.* A novel double-edged filter wavelength interrogation technology for FBGs [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 2011 22(3): 31-34( in Chinese) .
- [6] SONG J F, SHAO L Y, ZHANG A P, *et al.* A new FBG based dynamic-strain interrogation system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 2007, 18(8): 40-42( in Chinese) .
- [7] JIANG M Sh, FENG D J, SUI Q M. Sensitivity tunable FBG strain interrogation system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, 20(2): 32-34( in Chinese) .
- [8] FU J W, XIAO L Zh, ZHANG Y Zh, *et al.* Methods for improving fiber Bragg grating wavelength measurement precision [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(2): 127-130( in Chinese) .
- [9] CHEN X Q, LI M. Study of transmission characters of two kinds of

- new double ridge waveguide[J]. Journal of Xidian University ,2007 , 34( 3) : 486-499( in Chinese) .
- [10] YING X Y , XU T F. Improvement of measurement precision of fiber Bragg grating wavelength by means of Gaussian fitting [J]. Laser Technology 2009 ,33( 3) : 323-325( in Chinese) .
- [11] SHAO J , HUA W Sh , ZHOU Zh L , *et al.* Application study on neural network and genetic algorithm in the interpretation of correlation peak [J]. Laser Technology ,2009 ,33( 4) : 422-425( in Chinese) .
- [12] XIN Y L. Multimodal function optimization based on genetic algorithm [J]. Modern Electronics Technique ,2011 ,34( 16) : 76-77( in Chinese) .
- [13] QUI P Y , HUANG Z T , JIANG W L , *et al.* Improved blind-spreading sequence estimation algorithm for direct sequence spread spectrum signals [J]. IET Signal Process ,2008 ,2( 2) : 139-146.
- [14] ZHANG Q F ZHOU A M , JIN Y Ch. RM-MEDA: a regularity model-based multiobjective estimation of distribution algorithm [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2008 ,12( 1) : 41-63.
- [15] LIN Y , SU X Y. Genetic programming theory and its application [J]. Microcomputer Information ,2010 ,26( 27) : 123-125( in Chinese) .
- [16] YANG Y , FU L D. Population degeneracy analysis and suppressing algorithm for GA based on spanning tree code [J]. Computer Engineering and Applications 2011 ,47( 25) : 65-68( in Chinese) .
- [17] CHEN Y W. An improved selection operator of genetic algorithm based on niches [J]. Computer & Digital Engineering ,2009 ,37( 6) : 27-30( in Chinese) .

版权所有 © 《激光技术》编辑部