

·光电器件与材料·

改进模拟退火算法在 FBG 传感网络中的应用

杨广学, 王景波

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:通过分析传统模拟退火(Simulated Annealing)算法的原理和存在的不足,提出了一种改进的模拟退火算法.改进的算法增加了记忆当前最好状态的功能以避免遗失当前最优解,并设置双阈值使得在尽量保持最优性的前提下减少计算量.根据光纤光栅传感网络谱形状复用技术和模拟退火算法的特征,设计了高效的计算能量增量的方法,加快了算法的运行速度.仿真和实验结果表明,改进的算法比传统的模拟退火算法在解决光谱形状复用技术问题上具有更快的收敛速度,解的质量也有很大程度的提高.

关键词:模拟退火;光纤布喇格光栅(FBG);光谱形状复用

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)06-0036-05

Applications of Improved Simulated Annealing Algorithm in FBG Sensor Network

YANG Guang-xue, WANG Jing-bo

(College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: By analyzing the principles and shortcomings of traditional simulated annealing algorithm, an improved simulated annealing algorithm was proposed. To avoid missing current optimal solution, the new algorithm memorizes current best solution, and it also sets up dual-threshold to reduce the amount of calculation while maintaining optimality. After taking serious insights into spectral shape multiplexing and Simulated Annealing, an efficient energy increment calculation method was designed to speed up calculation. The results of simulation and experimental verify that the new algorithm converges faster and better than the traditional simulated annealing algorithm in solving the spectral shape multiplexing technique.

Key words: simulated annealing; Fiber Bragg Grating(FBG); spectral shape multiplexing

光纤布喇格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器的一个突出优点就是可以进行复用^[1-2],组成光纤光栅传感网络.常见的复用方法包括波分复用、时分复用和光谱形状复用.其中波分复用和时分复用是通过测量光纤光栅的峰值波长来得到所需要的传感信息.这两种测量方法要求光纤光栅阵列中的各个光栅的光谱不互相重叠.光谱形状复用是通过光谱形状的信息分辨各个光纤光栅的传感信息,与峰值波长无关,因此传感网络中各光栅的光谱允许重叠;另外各个光栅之间不再留隔离带,这就解决了

串扰问题,达到了节省带宽的目的^[3].可以有多种方法实现光谱形状复用的解调:分布搜索法,遗传算法,自组织神经网络法,模拟退火算法^[4].

模拟退火算法^[5]起源于统计物理学中对固体退火过程的模拟,基本思想是从某个选定的初始解开始在邻域内搜索,引入适当的随机因素,采用接收准则接收新解,用退火温度控制着求解过程向最小值方向优化.在迭代过程中不仅接收使目标函数值变好的点,而且还能够以一定的概率接收使目标函数值变差的点,接收概率随着温度的下降逐渐减小,

收稿日期:2010-11-13

作者简介:杨广学(1956-),男,吉林省德惠县人,教授,研究方向为光纤通信与光纤传感技术.

由于在整个解的邻域范围内取值的随机性,可使算法跳出局部最优解而获得全局最优解,有利于提高求得全局最优解的可靠性。

虽然模拟退火算法存在有限度地接收劣解、可以跳出局部最优解、原理简单、使用灵活、适合求解出优化问题的全局最优或近似全局最优解等优点,但它明显地存在以下缺点:

- (1) 求解时间太长。
- (2) 温度 T 的初值和减小步长较难确定。
- (3) 搜索过程中由于执行概率接收环节而遗失当前遇到的最优解。

针对光谱形状复用技术的特性和传统模拟退火算法的局限性,为了缩短收敛时间及不遗失中间最优解的状态,提出改进的模拟退火算法。

1 光谱形状复用原理

光谱形状复用法是基于光谱形状不变原理,即当作用于光纤光栅上的应变均匀时,光纤光栅仅仅发生了波长漂移,而其光谱形状保持不变。光谱形状复用原理以3个FBG组成的传感网络来说明,如图1所示。

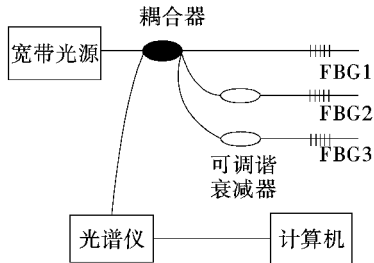


图1 光谱形状复用系统实验装置图

FBG1、FBG2和FBG3在没有受到应变时的反射光谱分别为 $f_1(\lambda)$ 、 $f_2(\lambda)$ 和 $f_3(\lambda)$,称这3个光谱为分立光谱。当光栅受到应变时,根据光栅光谱形状不变原理, $f_1(\lambda)$ 、 $f_2(\lambda)$ 和 $f_3(\lambda)$ 仅仅发生了波长漂移,那么光谱仪测量到的光谱可以写成3个分立光谱的总和

$$R(\lambda) = f_1(\lambda - \lambda_{B1}) + f_2(\lambda - \lambda_{B2}) + f_3(\lambda - \lambda_{B3}) + N(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ_{B1} 、 λ_{B2} 和 λ_{B3} 分别是在受到应变时3个光纤光栅的峰值波长。称 $R(\lambda)$ 为原始光谱。利用分立光谱 $f_1(\lambda)$ 、 $f_2(\lambda)$ 和 $f_3(\lambda)$ 构造出如下的重构光谱

$$Rv(\lambda, x) = f_1(\lambda - x_1) + f_2(\lambda - x_2) + f_3(\lambda - x_3) \quad (2)$$

则原始光谱和重构光谱之间的差可以表示为

$$f(x) = \sum_{i=0}^N (R(\lambda_i) - Rv(\lambda_i, x))^2 \quad (3)$$

可以看出,如果 $f_1(\lambda)$ 、 $f_2(\lambda)$ 和 $f_3(\lambda)$ 不同,当 $x_1 = \lambda_{B1}$ 、 $x_2 = \lambda_{B2}$ 、 $x_3 = \lambda_{B3}$ 时, $f(x)$ 取最小值,因此可以通过求式 $f(x)$ 最小值的方法来得到FBG1、FBG2和FBG3的峰值波长。

结合光谱形状复用技术的特点,用改进的模拟退火算法,应该可以使 $f(x)$ 快速、优质的收敛至最小值,从而获得峰值波长 x_1 、 x_2 和 x_3 。

2 改进的模拟退火算法

模拟退火算法包括三函数两准则,即状态产生函数、状态接收函数、温度更新函数;内循环终止准则和外循环终止准则^[6],以上环节的设计将决定模拟退火算法的优化性能。算法在局部极小解处有机会跳出并最终趋于全局最优的根本原因是算法通过概率判断以接收新状态,即当初温充分高、降温足够慢、每一温度下抽样足够长、温度趋于零时,算法最终以概率1收敛到全局最优解。但由于全局收敛条件难以实现,并且概率接收使得当前状态可能比搜索轨迹中的某些中间状态要差。从而实际算法往往最终得到近似最优解,甚至可能比中间经历的最优解差,而且搜索效率较差。为了提高模拟退火算法的搜索效率及不遗失中间最优解的状态,对传统的模拟退火算法进行改进^[7]。改进的做法是:在算法搜索过程中记住中间最优解,即时更新,增加了这种记忆能力的模拟退火算法已成为一种智能化的算法;设计一个新的温度更新函数:如果在某一温度下状态被接收的次数较多,这时温度降低的幅度应该大一些,否则温度降低的幅度较小,这样可以保证在温度更新时有一定的自适应性;设置双阈值使得在尽量保持最优性的前提下减少计算量。这里目标函数是 $f(x)$, $x = (x_1, x_2, x_3)$ 是一个三维输入矢量,它的每一个分量满足 $x_i \in [A_i, B_i]$ ($i = 1, \dots, 3$)。改进的模拟退火算法的具体步骤如下:

第一步:随机在输入矢量空间选择一个起始点 x ,并令 $x^{\text{best}} = x$, $f(x^{\text{best}}) = f(x)$ 。然后初始化如下参数:

(1) 选择一个退火率控制参数 c ,步长参数 h ;将退火时间参数 k_a 、 k_{gt} 设为0,其中 $i = 1, \dots, 3$;这两个参数将分别用于控制接收温度 $T_A(k_a)$ 和生成

温度 $T_{Gi}(k_{gi})$;

(2)令接收温度 $T_A(k_a)$ 等于 $f(x)$, 由于现在 $k_a=0$, 此条件等价于 $T_A(0)=f(x)$. 接收温度 $T_A(k_a)$ 将用于下面的接收函数中;

(3)令生成温度 $T_{Gi}(k_{gi})$ 等于 1, 由于现在 $k_{gi}=0$, 此条件等价于 $T_{Gi}(0)=1, i=1, \dots, 3$. 生成温度 $T_{Gi}(k_{gi})$ 将用于后面的生成函数中.

第二步:利用下式,根据原有的点产生一个新的点

$$x_i^{\text{new}} = x_i^{\text{best}} + q_i(B_i - A_i) \quad i=1, \dots, 3 \quad (4)$$

其中, $q_i = \text{sgn}(u_i - 0.5) \cdot T_{Gi}(k_{gi}) \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{T_{Gi}(k_{gi})}\right)^{|2u_i - 1|} - 1 \right]$, 并且 $u_i \in [0, 1]$, 如果新产生的点 x^{new} 不在输入矢量空间中, 则丢弃这个点, 重复上面过程, 直至新产生的点 x^{new} 位于输入矢量空间中为止.

第三步:新产生的点将以一定的概率被接收, 这个接收概率通过下面的接受函数计算而得

$$P_{\text{accept}} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta E}{T_A(k_a)}\right)} \quad (5)$$

式中, $\Delta E = f(x^{\text{new}}) - f(x^{\text{best}})$, 表示新产生的点和原来点之间的能量差. 当一个在 $[0, 1]$ 之间产生的随机数小于 P_{accept} 时, 接收 x^{new} ; 反之, 不接收 x^{new} .

第四步:若 $x^{\text{new}} < x^{\text{best}}$, 则 $x^{\text{best}} = x^{\text{new}}$.

第五步:每当算法接收了 N_{accept} 个点后, 将进行重退火操作. 首先计算出每一个分量的灵敏度

$$S_i = \left| \frac{f(x^{\text{best}} + (hx^{\text{best}} \cdot e_i)) - f(x^{\text{best}})}{hx^{\text{best}} \cdot e_i} \right| \quad i=1, \dots, 3 \quad (6)$$

式中, e_i 是一个三维的向量, 它的第 i 个分量等于 1, 其余分量为 0. 设所有的 $S_i (i=1, \dots, 3)$ 中最大的等于 S_{max} , 则每一个生成温度 $T_{Gi}(k_{gi})$ 和退火时间参数 k_{gi} 将按照下面的公式重置

$$T_{Gi}(k_{gi}) = \frac{S_{\text{max}}}{S_i} T_{Gi}(k_{gi}) \quad i=1, \dots, 3$$

$$k_{gi} = \left\{ \frac{1}{c} \ln \left[\frac{T_{Gi}(0)}{T_{Gi}(k_{gi})} \right] \right\}^3 \quad (7)$$

类似地, $T_A(0)$ 重置为根据上一个接收的点计算而得的目标函数的值, $T_A(k_a)$ 重置为 $f(x^{\text{best}})$, 并且退火时间参数 k_a 重置为

$$k_a = \left\{ \frac{1}{c} \ln \left[\frac{T_A(0)}{T_A(k_a)} \right] \right\}^3 \quad (8)$$

第六步:每当算法产生了 N_{gene} 个点后, 将进行

退火操作

$$\begin{cases} k_{gi} = k_{gi} + 1 \\ T_{Gi}(k_{gi}) = T_{Gi}(0) \exp(-c \cdot k_g^{1/3}) \end{cases} \quad i=1, \dots, 3 \quad (9)$$

$$\begin{cases} k_a = k_a + 1 \\ T_A(k_a) = T_A(0) \exp(-c \cdot k_a^{1/3}) \end{cases}$$

否则, 回到第二步.

第七步:如果整个算法一共接收了 $N_{\text{total-accept}}$ 个点, 或者一共产生了 $N_{\text{total-gene}}$ 个点, 算法将终止; 以 x^{best} 为最终解输出, 算法结束. 否则, 回到第二步.

3 数值仿真

首先利用数值仿真来研究图 1 所示的 3 个 FBG 传感器组成的传感系统. 设 3 个光栅的反射谱均为高斯型, 为了模拟实际的测量环境, 在光栅反射谱上加入了由计算机产生的白噪声, 如图 2 所示.

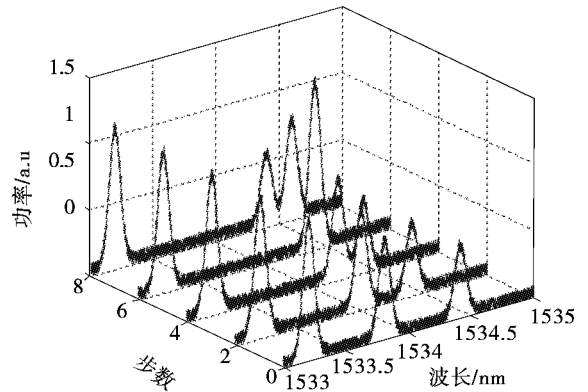


图 2 不同中心波长下的光谱

FBG1、FBG2 和 FBG3 的初始峰值波长分别为 1 533.2 nm、1 533.8 nm 和 1 534.4 nm, 仿真过程中, FBG1 和 FBG3 的峰值波长保持不变, FBG2 的中心波长是每步增加 0.2 nm, 选取的模拟退火算法参数是 $c=4.6, h=0.01, N_{\text{accept}}=60, N_{\text{gene}}=240, N_{\text{total-accept}}=600$, 和 $N_{\text{total-gene}}=3\ 600$. 每一步的数值仿真分别采用 2 种算法进行 20 次, 仿真结果如下.

仿真结果表明, 在适当的参数设置下, 即使光栅的光谱已经发生了部分或者完全重叠, 光谱形状复用法仍然能够实现解调. 由表 1 和表 2 可以看出, 改进的模拟退火算法平均收敛时间大约只有传统算法的 1/5, 峰值波长的均方差值更小, 即改进的模拟退火算法得到的解稳定性优于传统模拟退火算法; 随着问题规模的增大, 基于改进的模拟退火算法在时

间消耗和稳定性的优势就更加明显.因此改进的模拟退火算法可以使光谱形状复用的目标函数 $f(x)$ 具有更快的收敛速度和更优的峰值波长值.

表 1 峰值波长及收敛时间比较

Step		FBG1/(nm)	FBG2/(nm)	FBG3/(nm)	TIME/(s)
1	SA	1 533.205	1 533.802	1 534.402	120.650
	ISA	1 533.201	1 533.799	1 534.397	24.934 1
2	SA	1 533.193	1 534.002	1 534.401	131.718
	ISA	1 533.200	1 534.000	1 534.400	28.343 7
3	SA	1 533.204	1 534.219	1 534.401	135.650
	ISA	1 533.201	1 534.198	1 534.401	30.930 2
4	SA	1 533.194	1 534.397	1 534.406	128.740
	ISA	1 533.200	1 534.401	1 534.399	27.748 1
5	SA	1 533.198	1 534.594	1 534.401	142.061
	ISA	1 533.200	1 534.599	1 534.397	30.412 2

表 2 波长探测误差比较

Step		σ	σ	σ
1	SA	32.6	16.8	24.8
	ISA	1.63	3.46	1.96
2	SA	14.9	23.3	29.4
	ISA	1.54	2.36	2.07
3	SA	31.6	25.4	21.3
	ISA	3.35	4.02	3.58
4	SA	22.7	16.1	22.1
	ISA	1.69	2.47	2.55
5	SA	19.5	17.4	20.5
	ISA	1.82	1.24	2.78

4 实验结果

实验装置如图 1 所示. FBG2 峰值反射光强由可调谐衰减器调整至 FBG1 的 7/10 左右, FBG3 峰值反射光强由可调谐衰减器调整至 FBG1 的 1/2 左右. 在实验之前, 首先利用光谱仪记录下每个光纤光栅的分立光谱(反射谱), 这些分立光谱将用于按照式(2)构造重构光谱. 实验中, 首先分别在 FBG1 和 FBG3 上任意加一个固定应变, 同时, 在 FBG2 上施加应变, 使得 FBG2 的峰值波长在 1 533 nm 附近. 然后, 以每次 45 $\mu\epsilon$ (精度约 3 $\mu\epsilon$) 的步长逐步增加 FBG2 上的应变. 在每一步都分别使用 2 种算法来计算 3 个光纤光栅的峰值波长. 计算结果如图 3 所示.

实验中, FBG2 的应变范围是 100 ~ 550 $\mu\epsilon$, 在整个 450 $\mu\epsilon$ 范围内, 用传统模拟退火算法解调时, FBG1、FBG2 和 FBG3 的解调结果线性拟合之间的标准方差分别是 15.86 pm、28.51 pm 和 23.36 pm, 对应的应变分别是 13.22 $\mu\epsilon$ 、23.76 $\mu\epsilon$ 和 19.47 $\mu\epsilon$.

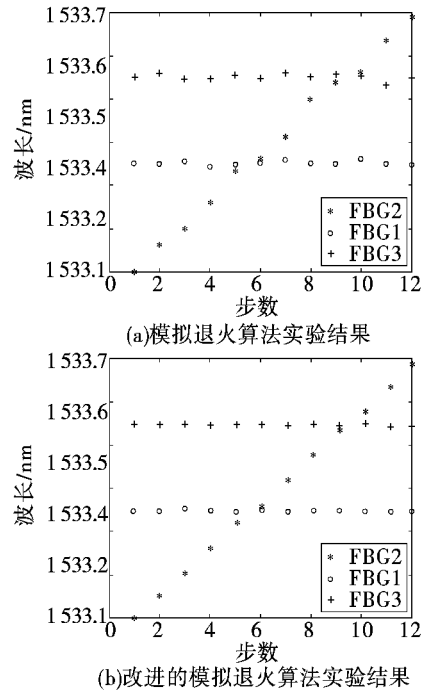


图 3 两种算法的实验结果

用改进的模拟退火算法解调时, FBG1、FBG2 和 FBG3 的解调结果线性拟合之间的标准方差分别是 1.59 pm、3.24 pm 和 1.85 pm, 对应的应变分别是 1.32 $\mu\epsilon$ 、2.70 $\mu\epsilon$ 和 1.54 $\mu\epsilon$.

5 结 论

通过分析传统模拟退火算法原理和存在的不足, 提出了一个改进的模拟退火算法. 根据光谱形状复用问题和模拟退火算法的特征设计了记忆当前最好状态的功能以避免遗失当前最优解, 解调结果的线性拟合之间的标准方差小于 5 pm, 从而可以得到更稳定的峰值波长值; 设置双阈值使得在尽量保持最优性的前提下减少计算量, 运行时间减少到原来的 1/5. 通过对 3 个 FBG 传感系统进行数值仿真和实验研究, 仿真和实验结果均表明, 改进的模拟退火算法在时间性能上有较大的提高, 并且能得到更优的峰值波长值. 通过使用光谱形状复用法和改进的模拟退火算法, 可以大大增加传感系统中各个光纤光栅传感器的测量范围.

参考文献

[1] Gong J M, Chan C C, Jin W, et al. A novel wavelength detection technique for fiber bragg grating Sensors[J].

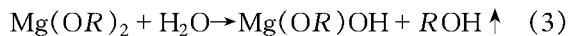
IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(5): 678 - 680.

- [2] Chan C C, Shi C Z, Gong J M, et al. Enhancement of the measurement range of FBG sensors in a WDM network using a minimum variance shift technique coupled with amplitude - wavelength dual coding [J]. Optics Communications, 2003, 215: 289 - 294.
- [3] 康守强, 巨红兵, 杨广学. 波分复用加光栅谱形状复用的 FBG 传感解调技术[J]. 光电子·激光, 2009, 20(4): 466 - 469.
- [4] Chen S, Istepanian R H, Luk B L, et al. Signal processing applications using adaptive simulated annealing[C]//

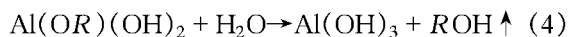
Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation(CEC 99), 1999, 2: 842 - 849.

- [5] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2006: 6 - 13.
- [6] QI Ji - Yang. Application of improved simulated annealing algorithm in facility layout design[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing, China, 2010, 7: 29 - 31.
- [7] Girdinio P, Nervi M, Rossi M. An improved simulated annealing algorithm for the channel allocation problem in cellular networks[C]//computing & informatics 2006, ICOCI'06 international conference, 2006: 1 - 7.

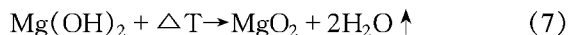
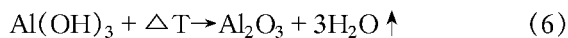
(上接第 35 页)



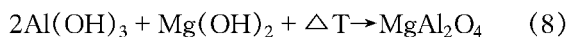
下式为形成凝胶状材料的化学反应



管式炉中加热阶段化学反应为



形成固体氧化镁铝的化学反应式为



根据化学反应方程式, 镀膜的方法为首先将镁铝尖晶石粉末加水, 制成凝胶, 将光纤如图 4 所示放置, 按箭头逐渐提拉, 包裹上凝胶后停留在空气中, 发生水解反应尖晶石凝胶凝固在光纤表面, 在充分反应后, 将包裹好凝胶的光纤放置于 1 000℃ 中的管式炉中加热 1 h 形成氧化镁铝包层。

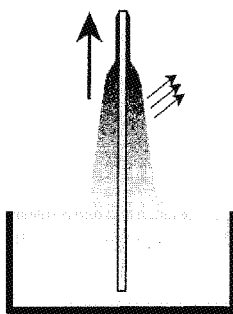


图 4 光纤镀膜凝胶吸附表面过程

3 结 论

文中提出了 2 种高温光纤传感器的表面镀膜技术, 分别适用于黑体腔温度传感器的头部镀层和光纤光栅传感器表面镀膜, 并且可以取得预期的效果, 用于高温光纤传感器的镀膜. 在制作过程中需要对镀膜的厚度和均匀进行控制, 是实现镀膜的一个难题.

参考文献

- [1] 叶林华, 沈永行. 蓝宝石光纤高温传感技术研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 1997(5).
- [2] 杨述平. 蓝宝石光纤黑体腔传感器定度技术研究[J]. 测试技术学报, 2005, 19(2): 186 - 189.
- [3] 郝晓剑, 周汉昌. 蓝宝石光纤黑体腔高温计[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(2): 218 - 223.
- [4] Choopun S, Vispute R D, Noch W, et al. Oxygen pressure-tuned epitaxy and optoelectronic properties of laser-deposited ZnO films on sapphire[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(25): 3947 - 3949.
- [5] 陈肇友, 柴俊兰. 氧化亚铁与铁铝尖晶石的形成[J]. 耐火材料, 2005(3): 207 - 210.
- [6] Liu H L, Li N, Li Q. Study on properties of magnesia - hercynite brick[J]. China's Refractories, 2005, 14(2): 23 - 26.
- [7] 肖国庆, 张军战. 材料物理性能[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- [8] Ya ge Zhan, Hua Wu, Qinyu Yang, et al. Fiber grating sensors for high - temperature measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(4): 349 - 354.