

基于模拟退火遗传算法的微波光子滤波器特性研究

蒋宏彬^{1,2,3} 刘广智^{2,3} 曾小平¹ 杨凡¹

¹绵阳师范学院物理与电子工程学院, 四川 绵阳 621000

²区域光通信网络系统与新型光电子器件国家重点实验室, 北京 100871; ³北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

摘要 采用模拟退火遗传算法, 分析了非等间距低通滤波器不同抽头下全正对称系数及含负系数的微波光子滤波器的频率响应特性, 并与窗函数法进行了对比分析。仿真结果表明: 全正对称系数条件下, 带抽头数量越大, 滤波器的优化性能越好。正负系数滤波器的对比表明, 含负系数的滤波器优化性能明显改善, 特别是对低通滤波器而言, 系数的全正性极大地限制了光学传递函数的取值范围, 影响了滤波器的性能。在同一截止频率下, 模拟退火遗传算法优化性能指标略好于窗函数法。如果限制通带和阻带的截止频率, 即放宽对过渡带的要求, 模拟退火遗传算法性能优势更加明显。

关键词 光学器件; 模拟退火遗传算法; 多抽头; 均方根误差最小准则; 非等间距微波光子滤波器; Q 参数

中图分类号 TN929.91; TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0817001

Characteristics of Microwave Photonic Filter by Using Simulated Annealing Genetic Algorithm

Jiang Hongbin^{1,2,3} Liu Guangzhi^{2,3} Zeng Xiaoping¹ Yang Fan¹

¹ School of Physics & Electronic Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China

² State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems & Networks, Beijing 100871, China

³ School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract By means of simulated annealing genetic algorithm, frequency-response characteristics of nonuniform-delay-time microwave photon filter with full/non positive coefficients are analyzed. And the window-function method is applied at the same time. Simulation results show that the more taps lead to better performance at full-positive symmetric coefficient filter. In the case of low-pass filter, full-positive coefficients limit largely factor on the span of transfer function, the characteristics improvement of non full-positive coefficients filter is obvious. At the same cut-off frequency, the optimal performance of simulated annealing genetic algorithm is slightly better than that of the window-function method. Once limiting the cut-off frequency of pass-band and stop-band, and relaxing the requirements of the transition zone, the advantages of simulated annealing genetic algorithm are much more obvious.

Key words optical devices; simulated annealing genetic algorithm; multiple taps; minimum root-mean-square error criterion; nonuniform-delay-time microwave photon filter; Q parameters

OCIS codes 060.1155; 060.2330; 250.4745

1 引言

微波光子滤波器的性能会受到光域和电域的限制。光域上的局限性表现在光学的非线性效应、偏振、由于滤波器的非相干性导致抽头的恒正性, 以及频谱的周期性、滤波器重构性和可调性等问题^[1,2]。目前, 微波光子滤波器的实现方法多数只能实现全正系数的情况, 尤其是抽头数量 N 比较大的设计, 所以需要区分正、负系数两种情况分别讨论滤波性

能优化问题, 这也是传统的滤波器设计方法无法适用的重要原因。传统滤波器的设计方法没有字长的限制, 即设计参数连续可变, 而实际微波光子滤波器会受到实验器件功率、分辨率、调节范围等限制, 即参数取值是离散的^[3~5], 其结果等效为在有限字长和一定取值范围内对滤波器进行设计, 这样得到的滤波器一般不再是理论上的最优, 因而传统设计方法不再适用。根据数字滤波器的设计经验, 传统的

收稿日期: 2012-05-07; 收到修改稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家创新科学基金(09C26215102319)资助课题。

作者简介: 蒋宏彬(1966—), 男, 高级实验师, 主要从事微波光子技术应用及射频电路等方面的研究。

E-mail: wdxjhb@yahoo.com.cn

滤波器设计不能满足一些特殊的性能要求,比如窗函数法设计滤波器不能满足对阻带的限制,它只满足在通带内均方根(RMS)误差最小,无法限制阻带的均方根误差和通带或阻带波动,所有这些都表明这些算法不具有足够的灵活性^[4~9]。针对上述问题,本文以微波光子滤波器的时延间隔可调性为出发点,针对非等间距低通微波光子滤波器,给出数学建模和优化准则来进行算法优化。

2 设计建模

2.1 时延间距设计模型

时延间距模型设计不再基于传统的数字滤波器原理,即每一路时延不再是基本时延(最小时延)的整数倍。由于微波光子滤波器的灵活性,调整相邻路径的时延间隔是完全可以实现的,这也增加了设计上的灵活性,并具有大的调节范围。非等间距的微波光子滤波器的最大特点是光学传递函数在频域上不再是周期的,即不会重复出现多个谐振通带。

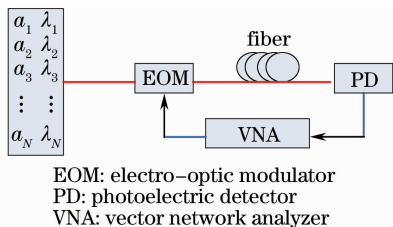


图1 微波光子滤波器的实现架构

Fig. 1 Schematic of microwave photon filter

光学传递函数是由射频(RF)信号频率决定的sinc函数,决定每个滤波器响应通道的是每一路抽头系数 a_r 和抽头数量 N 。从最简单的情况出发,如果滤波器实现了两路时延,即 $N=2$,而抽头系数相等,即 $a_r=1$ 。这种滤波器频谱响应为周期性的带隙滤波器,光学传递函数为由RF信号频率决定的余弦函数。随着抽头数量 N 的增大,光学传递函数可以表示为

$$H(f) = \sum_{r=0}^{N-1} a_r \exp(j2\pi f T_r). \quad (1)$$

式中 f 为频率, T_r 为第 r 个抽样的周期。

2.2 系数幅度优化模型

系数幅度为滤波器的不同时延分量乘以不同的权值,即系数。这种做法与不考虑系数(即系数全为1)的情况相比,明显会改善滤波器的滤波性能。而对于微波光子滤波器而言,这种系数幅度的可调性可以通过很多方法来实现。比如多光源情况下设置

不同光源的出射功率或者在RF调制后经过反射型光栅阵列,通过设置光栅阵列对不同波长的反射率,同样可以实现系数的设计。

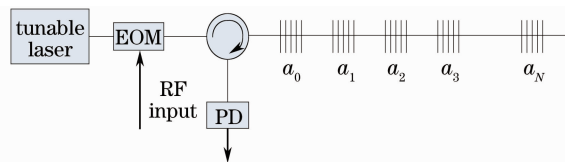


图2 基于光栅阵列的微波光子滤波器

Fig. 2 Microwave photon filter based on grating-array

3 优化准则与算法

3.1 均方根误差最小准则

理想滤波器频率响应 $H_d(\omega)$ 在通带($\omega \in [-\omega_p, \omega_p]$)幅值为1,在阻带($\omega \in [-\pi, -\omega_s] \cup [\omega_s, \pi]$)为0。用待求 N 阶低通滤波器的频率响应 $H(\omega)$ 逼近理想频率响应,期待实现的滤波器冲击响应为

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \exp(-in\omega), \omega \in [-\pi, \pi], \omega = 2\pi f$$

为角频率。均方根误差最小化准则是假设理想的滤波器频率响应是 $H_d(\omega)$,用 $H(\omega)$ 表示实际得到的滤波器频率响应,以 $E(\omega)$ 表示频率响应误差,即

$$E(\omega) = H_d(\omega) - H(\omega), \quad (2)$$

则均方误差为

$$e^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |E(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |H_d(\omega) - H(\omega)|^2 d\omega. \quad (3)$$

则只要选择一组 $h(n)$ 使得 e^2 最小即可。矩形窗法符合均方根误差最小准则,虽然过渡带很窄,但是由于吉布斯效应,窗谱的肩峰过大,造成滤波器通带起伏不均匀且过大,阻带衰减比较小。

3.2 优化算法策略

目前普遍关注的算法优化策略,主要有局部邻域搜索法和广义邻域搜索法两大类。其中局部邻域搜索法特点:算法简单、计算量小、优化快速且不要求函数可导,因而适用范围较广,但它对初始解的依赖性较强,容易陷入局部极小点,而且优化效果随函数维度的增加明显下降。

为使不陷入局部极小以及改善算法的稳健性能,引入随机概率的方法进行在解空间搜索,以使搜索过程服从某种算法设计好的搜索原则,同时又能一定区域内完成随机搜索,使算法得到很大改进,效果突出的算法包括模拟退火算法(SA),遗传算法

(GA)等所谓的广义邻域搜索算法^[9,10]。

SA的特点是通常要求较高的初温、较慢的降温速度、较低的终止温度以及各温度下足够多的采样次数。在常规SA中使用固定的迭代次数作为算法终止准则,因而SA往往优化过程较长,因此,选取合适的参数是提高控制SA优化效率的关键。SA的通用性强,算法易于实现,但要真正取得质量可靠性高、初值稳健性好的效果,克服计算时间长并使其适用于大规模问题,尚需进行研究工作。

GA^[10]也是一类随机优化算法,但它不是简单的随机比较搜索,而是通过对染色体的性能评价和对染色体中基因的作用,有效地利用已有的信息来指导搜索有希望改善优化质量的状态。

考虑到非等间距微波光子滤波器是一个多变量多极值的寻优问题,算法极易陷入局部最优点,寻求基于SA和GA混合的优化策略——模拟退火遗传(SA-GA)算法来得到最优解,SA-GA算法的流程如图3所示。该算法综合利用了SA具有较强的局域搜索能力和GA全局寻优控制能力的特点,有效地提高了GA的运行效率和求解质量^[8~10]。其运行方式是GA按一定概率保留最优个体的基础上,进行模拟退火遗传操作,然后与已保留的最优个体生成下一代的种群,反复迭代,直至满足终止条件。利用这种新的GA,特点是在传统的GA中引入模

拟退火机制,该算法综合了模拟SA具有较强的局域搜索能力和GA全局寻优控制能力的特点,有效地提高了GA的运行效率和求解质量^[11]。

4 结果与分析

目前非相干型光子滤波器只能实现正系数滤波器,而负系数滤波器需要特殊的结构来实现,所以先对权重系数分为全正系数和含负系数两种情况讨论,并且考虑权重系数有限字长的影响,选择SA-GA算法优化,按照均方根误差最小准则对微波光子滤波器性能进行讨论分析。

4.1 边带抑制比和Q参数

图4给出了不同抽头数量下滤波器边带抑制比(MSSR)的变化曲线,从图中可以看出,在抽头系数相等的情况下,影响MSSR的一个因素为抽头数量 N 。且随着 N 的增大,MSSR也随之增大,但是曲线随 N 的增大慢慢趋于平坦,即随着 N 增大到一定程度,MSSR对 N 的变化就不敏感了。说明光域上的局限性表现在光学的非线性效应、偏振、由于滤波器的非相干性导致抽头的恒正性,以及频谱周期的限制,还有频谱的周期性、滤波器重构性和可调性等问题。

抽头数量对Q参数的影响如图5所示,可以看

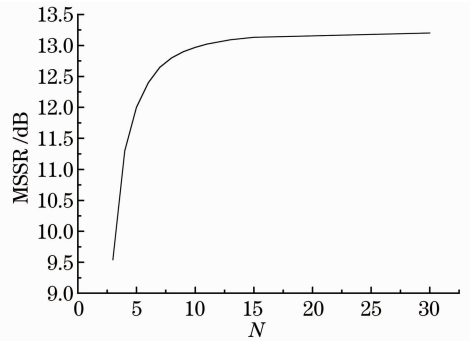


图4 不同抽头数量 N 下滤波器MSSR的变化曲线

Fig. 4 MSSR of filter versus tap number N

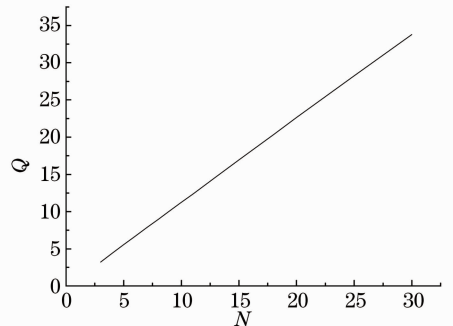


图5 不同抽头数量 N 下滤波器Q参数的变化曲线

Fig. 5 Q parameter versus tap number N

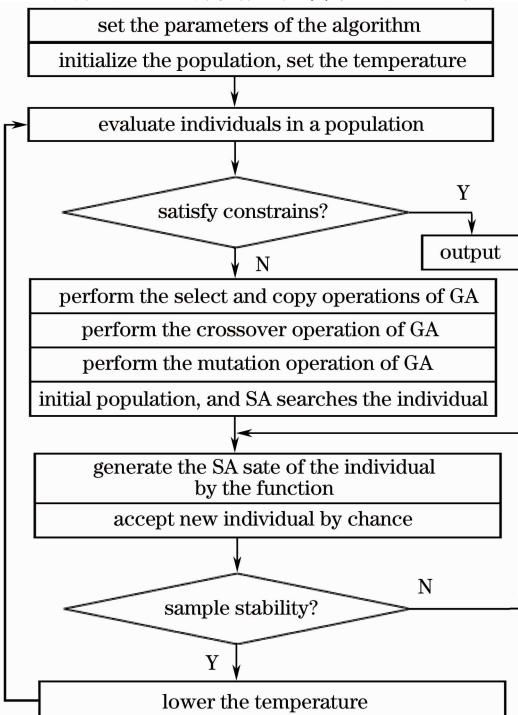


图3 SA-GA算法流程

Fig. 3 Flow of SA-GA algorithm

出,在抽头系数相等的情况下,影响 Q 参数的一个因素为抽头数量 N 。随着 N 的增大, Q 参数随之线性增大,且 $Q=1.132N$ 。

3.2 低通滤波器优化设计

下面以低通微波光子滤波器为例,参数设置如下:通带为 0.3,阻带为 0.3,全正系数为 $[0,1]$,含负系数为 $[-1,1]$,有限字长为小数点后三位。

图 6 给出了不同抽头数目 N 下,全对称系数的微波光子滤波器的优化频率响应曲线比较结果。因为抽头系数是对称的,相频曲线一定满足线性相位,以下所有的优化设计均满足对称系数的约束。从图中可以看出,随着抽头数量的增大,滤波器的优化性能将决定微波光子滤波器的模和相位响应。

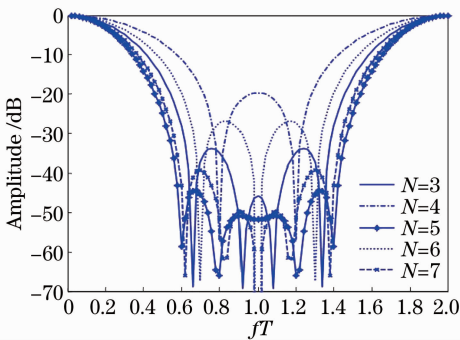


图 6 全正对称系数的微波光子滤波器 SA-GA 算法结果

Fig. 6 Result of SA-GA for microwave photonic filter of fully-positive symmetric coefficients

$N=11$ 条件下正系数和含负系数优化结果对比如图 7 所示,表 1 为不同抽头下滤波器性能指标比较。正负系数滤波器的对比表明,含负系数的滤波器优化性能明显改善。在滤波器设计中逼近理想的滤波器通带和阻带会比含有负系数的情况均方根误差明显要大。说明对低通滤波器而言,系数的全正性极大地限制了光学传递函数的取值范围,影响

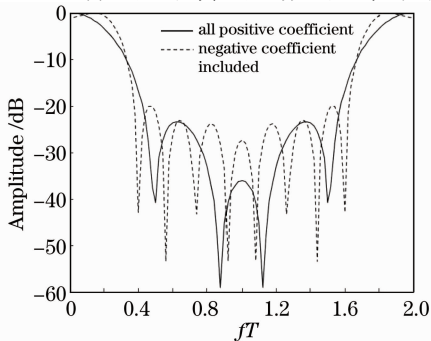


图 7 全正系数和含负系数的优化结果

Fig. 7 Optimization performance of full/non all positive coefficients

了滤波器的性能。由于字长限制在小数点后三位,对于高阶的全正系数滤波器优化结果表明,为了得到最小的均方根误差,会有一些抽头系数优化结果为 0,而优化后的滤波器性能并不会随着阶数的升高而有明显的改善,这也是由正系数的取值范围和有限字长限制的结果。

表 1 不同抽头的滤波器性能指标比较

Table 1 Comparison of filter performance indices for different taps

N	3 dB	20 dB	Shape_factor	MSSR
3	0.34	0.72	2.12	19.6
4	0.28	0.61	2.17	27.0
5	0.24	0.54	2.25	33.8
6	0.22	0.50	2.27	39.2
7	0.20	0.48	2.40	44.4

SA-GA 算法优化与窗函数法设计微波光子滤波器的频率响应曲线比较如图 8 所示,表 2 为不同系数下的滤波器性能指标比较,同时也给出了平均功率因子(MPF)的值。因为数字滤波器的窗函数法也满足均方根误差最小的准则,从限制通带的截止频率方面来看,SA-GA 算法优化性能略好于窗函数法。如果用 SA-GA 算法分别限制通带和阻带截止频率,即放宽对过渡带的要求,滤波器的优化结果要更好,即均方根误差会更小。

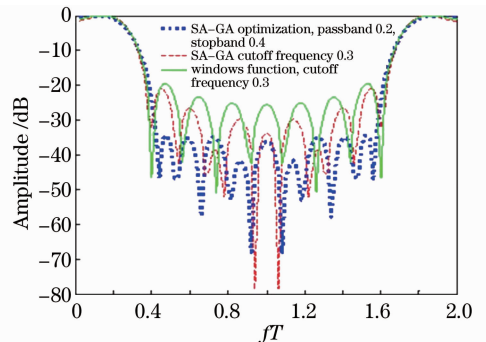


图 8 不同算法下的仿真收敛曲线和频率响应曲线

Fig. 8 Simulation convergence and frequency response curves for different algorithms

表 2 不同系数下的滤波器性能指标比较

Table 2 Comparison of filter performance indices for different coefficients

Coefficient range	RMS	MSSR	3 dB	20 dB	Shape_factor
All positive coefficient MPF	1/30.7	23.4	0.19	0.42	2.21
Negative coefficient included MPF	1/57.4	21.1	0.26	0.38	1.46

4.3 算法实例验证

为验证本算法的准确性,以文献[6]中的参量作为条件,对光纤光栅(FBG)在反射系数 $R_1=0.5, R_2=0.995, Q=804$ 条件下,进行优化仿真,得到频率响应的曲线如图9所示,通过比较文献[12]中的曲线,发现本算法的曲线趋势基本与原文曲线趋于一致,只是在振幅上有一点偏差,但这并不影响本算法的准确性。进而,本文针对不同增益因子 g 的影响进行仿真,如图10所示,当增益因子 $g=5$ 时,可以看到一个尖锐深度约为48 dB的滤波器响应,此时 Q 值最大,而增大或减小增益,其 Q 值均下降,这与文献[6]中的50 dB频率响应很接近,这进一步说明本算法的可信程度。

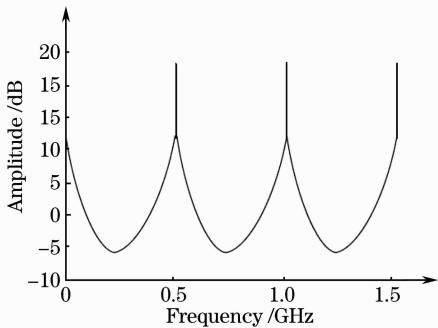


图9 $R_1=0.5, R_2=0.995$, FBG 仿真频响曲线
Fig.9 FBG simulation for $R_1=0.5, R_2=0.995$

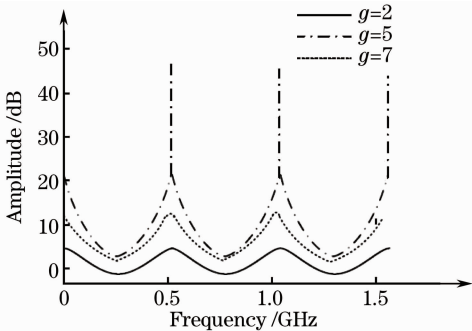


图10 不同增益因子 g 对应的频响曲线
Fig.10 Frequency response curves for different gain factors g

5 结论

以非等间距滤波器为例,采用时延间距设计模型、系数幅度优化设计和最小均方根误差准则,讨论了全正系数和含负系数两种滤波器的性能差别,非等间距微波光子滤波器的优化设计方法,提出了一种优化准则,应用 GA 实现了对频率响应曲线边带抑制比的优化设计。采用 GA-SA 算法,分析了不同抽头下全正、含负对称系数的微波光子滤波器的幅频特性,

仿真结果表明:随着抽头数量的增大,滤波器的优化性能也越好。在满足均方根误差最小的准则及同一截止频率下,SA-GA 算法化性能略好于窗函数法。当抽头一定,通带、阻带及有限字长限定,含负系数的滤波器优化性能明显改善。当然,微波光子滤波器的研究还存在很多亟待解决的问题,比如如何实现稳定而又高 Q 值的光子滤波器、滤波器之间的级联以获得更好的滤波效应、滤波器的连续线性大范围可调以及在时延非常小时的相干扰动等。

参考文献

- 1 M. Sagues, O. R. Garcia, A. Loayssa. Multi-tap complex-coefficient incoherent microwave photonic filters based on optical single-sideband modulation and narrow band optical filtering[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 95~303
- 2 B. Vidal, V. Polo, J. L. Corral. Cost-effective photonic microwave filter employing tap reusing[C]. International Topical Meeting on MWP 2003 Proceedings, 2003. 267~270
- 3 Liu Chongzheng, Chen Jianguo, Zhou Tao. Microwave photonic filter technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(10): 32~38
刘崇正, 陈建国, 周涛. 微波光子滤波技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(10): 32~38
- 4 Li Zhiqun, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 663~667
李志全, 康莉莉, 苏凤燕等. 光子晶体增益平坦滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 663~667
- 5 Qi Chunhui, Pei Li, Ning Tigang *et al.*. Flat analysis of microwave photon filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(5): 910~914
祁春慧, 裴丽, 宁提纲等. 微波光子滤波器的平坦特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(5): 910~914
- 6 Qi Chunhui, Pei Li, Ning Tigang *et al.*. Analysis of quality factor for one order infinite impulse response microwave photon filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1314~1317
祁春慧, 裴丽, 宁提纲等. 一阶无限抽头响应微波光子滤波器的品质因数分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **46**(7): 1314~1317
- 7 Zhen Huiru, Zhou Jun, Xue Chunhua *et al.*. Design of super narrow band and comb-shaped multi-channel photonic crystal filters[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2006, **18**(11): 1917~1921
郑慧茹, 周骏, 薛春华等. 超窄带和梳状多通道光子晶体滤波器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1917~1921
- 8 Zhang Mei. Reconfigurable Microwave Photonic Filter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011
张梅. 可重构微波光子滤波器[D]. 成都: 电子科技大学, 2011
- 9 Lu Jinyue. Theory and Experiment Research of Microwave Photonic Filter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011
卢金跃. 微波光子滤波器的理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
- 10 Wang Ling. Intelligent Optimization Algorithms and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 60~200
王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 60~200
- 11 H. Reiner, P. M. Pardalos, N. V. Thoai. Introduction to Global Optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003

栏目编辑: 宋梅梅