

基于 PSO 的级联马赫-曾德尔型光滤波器优化设计

邹喜华^{1,2}, 潘 炜^{1,2}, 罗 斌¹, 张伟利¹, 王梦遥¹, 秦张森¹

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院光通信与光器件研究所, 四川成都 610031;

2. 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 首次应用连续和离散版本的粒子群优化算法 (PSO), 实现级联马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 型光滤波器中关键结构参数 (耦合角和相移因子) 对理想系数的逼近, 完成光滤波器的优化设计. 结果表明: 三级级联 MZI 型滤波器输出响应与理想响应之间的误差控制在 10^{-5} 量级内; 同时与遗传算法 (GA) 设计方案相比, PSO 方案具备计算时间少、逼近适应度好、滤波消光比高的特点.

关键词: 光滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI); 粒子群优化算法 (PSO); 遗传算法 (GA)

中图分类号: TN252, TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 02-0216-04

Optimal Design for Cascaded Mach-Zehnder Interferometer Based Filter Using PSO

ZOU Xi-hua^{1,2}, PAN Wei^{1,2}, LUO Bin¹, ZHANG Wei-li¹, WANG Meng-yao¹, QIN Zhang-miao¹

(1. Institute of Optical Communication and Optical Devices, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Both continuous and discrete particle swarm optimization (PSO) algorithms are applied to design cascaded Mach-Zehnder interferometer (MZI) based optical filter, for the first time. Then the optimal structural parameters (i. e. coupling angles and phase-shift factors) are obtained, by approaching the ideal coefficients with coupling angles and phase-shift factors. In our experiment, a filter of 3-cascaded MZI has been shown, and the relative error between the obtained response and ideal response is about 10^{-5} . Meanwhile, compared with genetic algorithm (GA) scheme, the PSO scheme is characterized by short computing time, excellent approach fitness and high extinction ratio.

Key words: optical filter; Mach-Zehnder interferometer (MZI); particle swarm optimization (PSO); genetic algorithm (GA)

1 引言

光滤波器在光通信领域具有许多重要应用, 如信道复用/解复用、波长上/下载、增益平坦等. 作为一类重要的光滤波器, 级联马赫-曾德尔型 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 滤波器受到了广泛关注^[1~12]. 设计级联 MZI 型光滤波器, 即优化配置结构参数以实现较优的滤波性能, 如平坦通带、高消光比等.

为实现参数优化配置, 先后提出了二项分布、Chebyshev 分布规律的耦合长度^[1,2], 有效地抑制了边模; 但滤波通带不够平坦, 因而又提出了一系列不同的耦合系数或臂长差组合方案^[3~6], 它们在各自具体结构中解决了平坦性问题, 但不易扩展. 因此一般性的方案显得更为重要: 以数学迭代法可获得

参数的优化组合^[9], 但计算过程容易导致误差累计; 基于准傅里叶变换或者傅里叶级数对比法^[10,11], 以一定的精度搜索到结构参数组合, 需要改善搜索方式来满足多级级联的情况. 近来, 应用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的理想系数逼近方案^[12]简化了设计并提高了效率.

本文提出应用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 设计级联 MZI 型滤波器, 即基于 PSO 优化连续变化的耦合角组合和离散变化的相移因子组合, 使其对应的滤波器系数逼近理想系数, 从而成功设计出光滤波器. 其出发点有三: (1) PSO 具有连续和离散的两种版本^[13,14], 可分别优化连续变化的耦合角和离散变化的相移因子; (2) PSO 的计算形式和参数设置简单、收敛性好, 能以较优的适应度配置滤波器的结构参数; (3) 用耦合角和相移因子组合替代单一的耦合角组合.

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2006-12-01

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10174057, No. 90201011); 教育部科学技术研究重点项目 (No. 2005-105148); 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 级联 MZI 模型

2.1 模型描述

一般地,级联 MZI 由耦合器、相对臂长差以及相移器(黑粗线部分)构成,如图 1. N 级级联 MZI 中,耦合器 C_s 对应的耦合角分别为 $\theta_s, 0 \leq s \leq N$;相移器对应的相移值分别为 φ_s , 各级相对臂长差为 $m_s L$, L 表示单位臂长差, m_s 表示整数, $1 \leq s \leq N$.



图 1 级联 MZI 型光滤波器的结构图

级联 MZI 的工作原理如下:耦合器将光场分为两路,然后分别经过不同干涉臂产生相位延迟,逐级形成多光束干涉^[7]. 设输入光场为 $[0, E_1]^T$, 输出光场为 $[E_4, E_3]^T$, 用传输矩阵法描述为

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_N & -j \sin \theta_N \\ -j \sin \theta_N & \cos \theta_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-j m_N L) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-j \theta_N) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} \exp(-j \theta_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-j m_1 L) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -j \sin \theta_0 \\ -j \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_3 = \sum_{k=0}^M a_k \exp[-j(k L)] \quad (2)$$

$$E_4 = \sum_{k=0}^M b_k \exp[-j(k L)] \quad (3)$$

其中, $j = \sqrt{-1}$, $M = m_1 + \dots + m_N$, 是传输常数; a_k, b_k 是滤波器系数, 数学形式为耦合角和相移因子的正弦或余弦组合的和项、差项或者和差项, 用函数符号 F_k 和 F_k 表示为

$$a_k = F_k(0, 1, \dots, N, 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$b_k = F_k(0, 1, \dots, N, 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式(4)、(5)给出了耦合角和相移值组合与滤波器系数的关系, 而式(2)、(3)中 a_k, b_k 可与数字滤波器的系数关联; 由式(4)、(5)可建立耦合角和相移值组合与数字滤波器系数的关系, 从而可借助数字滤波技术设计级联 MZI 滤波器^[9,10,12].

2.2 设计方案描述

基于上述级联 MZI 模型, 提出设计方案: 由耦合角和相移值共同组成结构参数, 并引用数字滤波器系数作为理想系数, 应用 PSO 使 a_k 或 b_k (也就相当于耦合角和相移因子的不同组合) 逼近理想系数, 从而获得耦合角和相移因子的优化配置. 此设计方案区别于文献[12]的设计思路, 提出将耦合角限制在 $(0, \pi/2)$ 之间连续变化; 而相移值离散取值为 0 或 π (本文讨论限于实系数滤波器), 用于调整符号. 这样一来, 耦合角组合只需满足数值要求, 并与相移值有机组合成滤波器系数, 更符合实际情况. 同时, 方案应用 PSO 算法配置结构参数, 即连续 PSO 优化耦合角组合, 离散 PSO 优化相移值组合.

3 PSO 算法介绍

在 PSO 算法中^[13], D 维搜索空间中粒子的位置和速度根据粒子自身和同伴的飞行经验进行动态调整. 粒子群(数目为 I) 中第 i 个粒子位置表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 它经历过的最好位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, 群体所有粒子经历过的最好位置记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$, 粒子速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. 由于引入收敛因子后, 算法具有更好的收敛性, 本文采用类型 1 (Type 1), 并简化成标准版本^[15]

$$\begin{cases} v_{id} = [v_{id} + \phi_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + \phi_2 * Rand() * (p_{gd} - x_{id})] \\ x_{id} = x_{id} + v_{id} \\ i = 1, 2, \dots, I, d = 1, 2, \dots, D \end{cases} \quad (6)$$

其中, ϕ_1, ϕ_2 为学习因子, $rand()$ 和 $Rand()$ 产生 $[0, 1]$ 之间的随机数, ϕ 为与待选参数 K 相关的收敛因子

$$= \sqrt{2K(\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi})}, \phi = \phi_1 + \phi_2, \phi > 4 \quad (7)$$

上述迭代公式可用于求解连续变量的优化问题, 如 $[1, 2, \dots, N]$. 而 $[1, 2, \dots, N]$ 对应的搜索过程则需由离散型 PSO 来实现. 两者的区别在于粒子位置调整的方式, 用伪代码表示为^[14]

$$\begin{cases} \text{if } rand() < S(v_{id}), & x_{id} = 1 \\ \text{else} & x_{id} = 0 \end{cases}$$

其中, $S(t) = 1 / (1 + \exp(-t))$. 粒子位置调整过程解释为: v_{id} 经 S 函数转化成 $[0, 1]$ 之间的概率, 即 x_{id} 为 1 的概率为 $S(v_{id})$, x_{id} 为 0 的概率为 $1 - S(v_{id})$. 同时, 位置调整可采用 0、1 位置反转来实现, 以 v_{id} 趋于 0 为收敛条件, 在文[14]的基础上作一定的调整, 代码如下

$$\begin{cases} \text{if } 0.25 * rand() < S(v_{id})(1 - S(v_{id})) & x_{id} \text{ 不变} \\ \text{else} & x_{id} \text{ 反转} \end{cases}$$

在下文的设计实验中, 将结合这两种不同版本的 PSO 算法优化配置耦合角和相移因子组合.

4 设计实验

4.1 PSO 设计流程

(1) 初始化位置和速度. 将结构参数组合成 $[1, 2, \dots, N, 1, 2, \dots, N] \times [0, 1, \dots, N]$ 初始位置、个体最优位置序列在 $(0, 0.5)$ 之间随机取值, 速度序列在 $[-0.5, 0.5]$ 之间随机取值; $[1, 2, \dots, N]$ 初始位置、个体最优位置序列各维随机取 1 或 0, 速度序列在 $[-6, 6]$ 之间随机取值^[14].

(2) 适应度计算. 适应度用来引导粒子群向全局最优解移动, 定义适应度函数如下

$$fitness(0, 1, \dots, 1, 2, \dots) = \sum_k [b_k(0, 1, \dots, N, 1, 2, \dots, N) - b_k^{ideal}]^2 \quad (8)$$

其中, b_k^{ideal} 为理想系数.

(3) 参数更新. 应用连续或离散 PSO 过程来不断更新参数: 粒子位置、个体最优位置、全局最优位置以及粒子速度. 鉴于耦合角和相移因子的取值形式分别为连续型和离散型, 因

而分成两个分支来更新.

(4) 判断和结束. 如满足结束条件, 则输出 $[\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_N, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$; 否则转到步骤 (2).

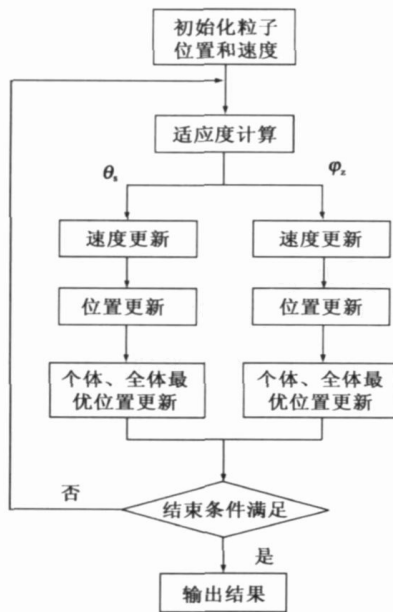


图 2 PSO 设计流程图

4.2 实验结果

设计三级级联交错滤波器, 中心波长为 1552.52nm, 信道间隔为 0.8nm. 文献[9]的级联结构(臂长差满足关系 $[1 \ 2 \ 2 \ 2 \dots]_j$, 第一个耦合角应为 0.25 (滤波器为半带滤波器). 根据选取 PSO 参数 ($\phi_1 = \phi_2 = 2.05, K = 0.8$, 粒子群数目为 50, 进化代数数为 200), 搜索到耦合角和相移值组合如下:

$$[\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3] = \times [0.25000 \ 0.37552 \ 0.15908 \ 0.46646 \ 0 \ 1 \ 0]$$

转换成滤波器系数为:

$$b_k = [0.23525 \ -0.57059 \ 0.32512 \ 0.095499 \ -0.060346 \ -0.024881]$$

可见获得的结构参数组合与已报道的一致, 同时系数 b_k 与 b_k^{ideal} 也一致^[9]. 基于系数序列 b_k 的滤波器响应如图 3(a), 它与理想波形相差很小, 只能通过相对差值来分析两者之间的微小差别(约 10^{-5} 量级), 如图 3(b) 所示. 事实上, 此设计方案还可以扩展到臂长差恒定的模型、多级模型等.

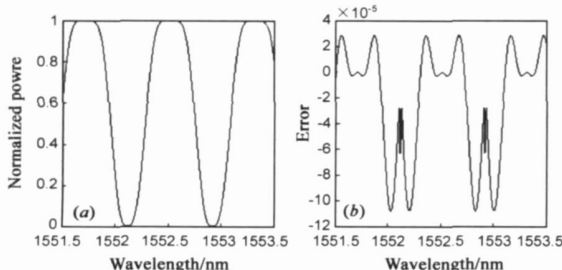


图 3 PSO 方案的设计结果 (a) 输出响应; (b) 与理想响应的对比误差

5 PSO 与 GA 设计方案对比

5.1 GA 方案设计滤波器

设计实验部分验证了 PSO 方案, 本节分别应用 PSO 和 GA 来实现参数优化配置, 以比较设计的效率和效果.

与 PSO 类似, GA 亦能实现全局寻优, 基本步骤包括: 编码/解码、选择、交叉、变异. GA 设计方案的相关操作和参数: 采用基本遗传算法(SGA)-轮盘赌选择算子、单点交叉算子和基本位变异算子, 交叉概率 0.8, 变异概率 $0.08^{[16]}$; 将 $[\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_N, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ 作为一个染色体, 每个耦合角的编码长度为 16 比特(耦合角在 (0,0.5) 范围内的求解精度为 10^{-5}), 每个相移值的编码长度为 1 比特, 其流程与 PSO 方案一致.

5.2 设计性能对比

给定种群大小 50, 进化代数 200, 统计两种方案的 10 次结果进行对比. 由表 1 可知, 设计效率上, PSO 比 GA 的计算时间(代码运行的 CPU 时间)要少 0.5s 左右, 即同样的进化代数 GA 的计算速度不如 PSO. 设计质量上, PSO 的最优适应度和平均适应度都要优于 GA; 滤波性能上, PSO 方案平均组合的消光比高出约 15dB, 同时 10 次结果的整体消光比要优于 GA 方案, 如图 4(a), (b).

表 1 PSO 和 GA 实验结果对比(进化代数数为 200)

	最优适应度	最优组合 (×)								
GA	3.98×10^{-9}	0.2500	0.3755	0.1591	0.4664	0	1	0		
PSO	8.65×10^{-11}	0.2500	0.3755	0.1591	0.4664	0	1	0		
	平均适应度	平均组合 (×)								
GA	6.8×10^{-7}	0.2500	0.3755	0.1591	0.4666	0	1	0		
PSO	8.0×10^{-9}	0.2500	0.3755	0.1591	0.4664	0	1	0		
计算时间/s										
GA	1.97	1.98	2.02	1.98	2.02	1.97	2.00	2.00	2.03	1.98
PSO	1.53	1.53	1.56	1.53	1.53	1.59	1.55	1.56	1.53	1.53

*说明: GA 选择算子中的适应度值为此适应度的倒数

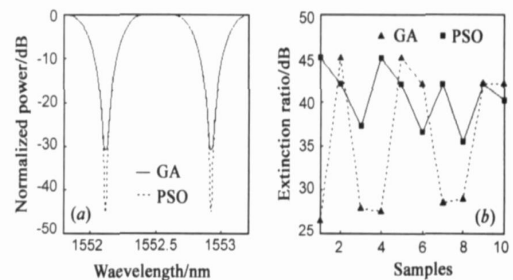


图 4 滤波器消光比性能对比 (a) 平均组合的输出响应; (b) 10 次结果的消光比

需指出的是, 本文比较了引入收敛因子的 PSO 和基本 GA 在设计方案中的效率, 没有涉及 PSO 和 GA 的各种改进版本. 因为 PSO 和 GA 的改进版本以及参数设定的方法众多^[17,18], 难以一一评价和对比, 我们会继续探讨更多算法在滤波器设计中的应用.

6 结论

本文从级联 MZI 型光滤波器的模型出发, 建立起耦合角、相移值与滤波器系数的关系; 根据耦合角和相移值的取值特点, 分别应用连续和离散型 PSO 优化耦合角和相移值组合, 实

现滤波器系数对理想系数的逼近,从而获得了其优化组合.实验成功地设计出了三级 MZI 型滤波器,其输出响应与理想响应的相对误差控制在 10^{-5} 左右;并对比了滤波器设计的 PSO 方案和 GA 方案,其中 PSO 方案在计算时间、逼近适应度和消光比方面优势明显.

参考文献:

- [1] Kuznetsov M. Cascaded coupler mach-zehnder channel dropping filter for wavelength division-multiplexed optical systems [J]. J Lightwave Technol, 1994, 12(2): 226 - 230.
- [2] Kostrzewa C, Petermann K. Bandwidth optimization of optical add/drop multiplexers using cascaded couplers and Mach-Zehnder sections [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(8): 902 - 904.
- [3] Oguma M, Jinguji K, Kitoh T, et al. Flat-passband interleaver filter with 200GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure [J]. Electron Lett, 2000, 36(15): 1299 - 1300.
- [4] Chiba T, Arai H, Ohira K, et al. Novel architecture of wavelength interleaving filter with Fourier transform-based MZIs [A]. OFC '01 [C]. Anaheim, USA, 2001. WB5-1-WB5-3.
- [5] Oguma M, Kitoh K, Inoue Y, et al. Compact and low-loss interleaver filter employing lattice-form structure and silica-based waveguide [J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(3): 895 - 902.
- [6] 李杰, 童峥嵘, 蒙红云, 等. 级联马赫-曾德尔干涉仪光学梳状滤波的理论研究 [J]. 光学学报, 2003, 23(1): 41 - 44.
Li Jie, TONG Zheng-rong, MENG Hong-yun, et al. Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 41 - 44. (in Chinese)
- [7] 邹喜华, 潘炜, 罗斌, 等. 新型阶梯形可调谐光滤波器的优化设计 [J]. 光电子·激光, 2005, 16(2): 146 - 149.
Zou Xi-hua, Pan Wei, Luo Bin, et al. Optimization design of a novel ladder-type structure tunable optical filter [J]. J Optoelectronics Laser, 2005, 16(2): 146 - 149. (in Chinese)
- [8] 瞿荣辉, 赵浩, 方捷. 级联非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪型复用器特性分析 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(3): 254 - 257.
Qu Rong-hui, Zhao Hao, Fang Zhi-jie. Analysis of optical multiplexer/demultiplexer based on cascaded non-balanced Mach-Zehnder interferometer [J]. J. Optoelectronics Laser, 2001, 12(3): 254 - 257. (in Chinese)
- [9] Jinguji K, Oguma M. Optical half-band filter [J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(2): 252 - 259.
- [10] 张瑞峰, 葛春风, 王书慧, 等. 全光纤奇偶交错空分滤波器的优化设计 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(5): 496 - 500.
Zhang Rui-feng, Ge Chun-feng, Wang Shu-hui, et al. Optimized design of all fiber interleaver [J]. J Optoelectronics Laser, 2003, 14(5): 496 - 500. (in Chinese)
- [11] 张娟, 刘立人, 周煜. 平面波导环形格子结构型光交错复用器的设计 [J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1269 - 1273.
Zhang Juan, Liu Li-ren, Zhou Yu. An optimized design of interleaver filter based on planar lightwave circuit-type lattice structure [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1269 - 1273. (in Chinese)
- [12] 肖悦娱, 何赛灵. 一种级联马赫-曾德尔滤波器设计的新方法 [J]. 光学学报, 2004, 24(3): 346 - 350.
Xiao Yue-yu, He Sai-ling. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 346 - 350. (in Chinese)
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks [C]. Perth, Australia, 1995. 1942 - 1948.
- [14] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of particle swarm algorithm [A]. Proc. of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics [C]. Orlando, USA, 1997. 4104 - 4108.
- [15] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58 - 73.
- [16] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 18 - 50.
- [17] 彭宇, 彭喜元, 刘兆庆. 微粒群算法参数效能的统计分析 [J]. 电子学报, 2004, 32(2): 209 - 213.
Peng Yu, Peng Xi-yuan, Liu Zhao-qing. Statistic analysis on parameter efficiency of particle swarm optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(2): 209 - 213. (in Chinese)
- [18] 吕振肃, 侯志荣. 自适应变异的粒子群优化算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 416 - 420.
Lü Zhen-su, Hou Zhi-rong. Particle swarm optimization with adaptive mutation [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 416 - 420. (in Chinese)

作者简介:



邹喜华 男, 1981 年出生于湖南衡阳, 现为西南交通大学信息科学与技术学院博士生, 主要研究方向为优化算法、光器件、光通信等, 已在 IEEE 等国内外重要期刊上发表相关学术论文十余篇. E-mail: zouxihua@126.com



潘炜 男, 1959 年出生于安徽, 西南交通大学信息科学与技术学院副院长、教授、博士生导师、IEEE 会员. 主要研究方向为量子信息与量子通信、非线性系统理论研究、光通信与光器件等.