

基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构

韦芙芽 刘洪武 付春林

(南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要 提出了一种基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构方法。该方法通过传输矩阵法得到优化目标函数,并将待优化的光纤光栅参数以粒子表示,再让粒子在解空间模拟量子行为进行搜索。以均匀布拉格光栅和线性啁啾光纤光栅为例,分别采用遗传算法(GA)、经典粒子群优化(PSO)算法以及量子粒子群优化(QPSO)算法对其进行参数重构。与传统粒子群算法及遗传算法相比,该方法借鉴了量子行为,具有更好的收敛性能和稳态性能。数值结果表明,种群规模为 40 时,针对均匀和非均匀光栅分别进化 100 代和 200 代得到的重构参数误差均小于 0.5%。

关键词 光纤光学;参数重构;量子粒子群优化;光纤布拉格光栅;传输矩阵

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0205004

Reconstruction of Fiber Grating Parameters from Reflectivity Using Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm

Wei Fuya Liu Hongwu Fu Chunlin

(College of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)

Abstract A parameter reconstruction method for the physical parameters of fiber Bragg grating (FBG) based on quantum particle swarm optimization (QPSO) is proposed. In the proposed method, the objective function is constructed according to the transfer matrix theory, the physical parameters of fiber gratings are represented in the form of particle, and the optimized parameters are obtained by the particles' searching in the solution space according to the quantum behavior. When compared with genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO), the proposed QPSO-based method simulates the quantum behavior, which leads to a better convergence performance and a better static-state performance. The simulation results show that, for both uniform and nonuniform fiber grating evolving 100 or 200 times, the proposed method has the reconstruction parameter error of less than 0.5% when the swarm population is 40.

Key words fiber optics; parameter reconstruction; quantum particle swarm optimization; fiber Bragg gratings; transfer matrix

OCIS codes 060.3735; 060.3738; 060.2340; 060.2400; 060.2310; 060.2330

1 引言

光纤光栅作为一种十分重要的光纤器件已经广泛应用于光纤通信和光纤传感领域^[1~7]。依据给定的反射谱或时延特性重构光纤光栅参数对于器件设计和优化是一个十分重要的问题^[8~19]。目前,重构光纤光栅参数的典型方法有傅里叶变换法^[8],GML积分法^[9],时-频信号表示法^[10]和剥层法^[11]等。上述方法需要预先给出复数型的反射系数来重建光栅的物理结构,例如需要同时给出反射系数的幅度和

相位信息,具有较高的计算复杂度。为了简化计算,在应用上述方法时可根据设计参数的重要程度分配不同的权重系数。然而,参数重构不能用于结构复杂的光纤光栅,例如线性啁啾光栅、相移光栅和超结构光栅等。近年来,模拟退火算法(SA)^[12]、遗传算法(GA)^[13~20]和粒子群优化(PSO)算法^[18,19]以及之前一些方法的改进或组合^[20]为复杂光纤光栅参数提供了新的途径,但此类算法的计算复杂度、收敛性能和稳态性能仍待提高。

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-10-14

作者简介: 韦芙芽(1976—),女,壮族,硕士,讲师,主要从事光纤通信研究及相关教学工作。E-mail: wfy196@126.com

本文针对均匀光栅和线性啁啾光栅,将量子粒子群优化(QPSO)算法应用于光纤光栅参数重构,通过使粒子模拟量子行为在解空间搜索获得优化解。数值仿真结果表明,该方法简单有效、快速、稳定。

2 光纤光栅的传输矩阵理论

算法中目标函数,如光纤光栅的反射谱或时延特性曲线,可通过传输矩阵法得到,然后把目标函数的自变量作为个体变量。

对于均匀布拉格光栅,可直接求解耦合模方

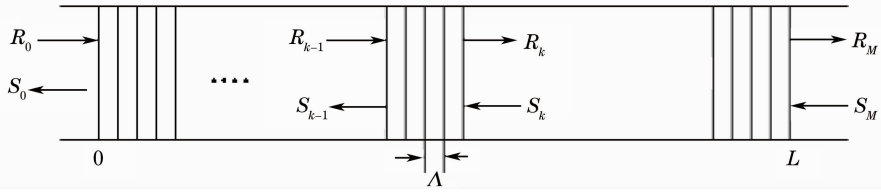


图 1 光纤光栅传输矩阵模型

Fig. 1 Fiber grating transfer matrix model

程^[1],得到解析解后,直接分析光栅反射谱和时延特性。然而对于非均匀光栅,耦合模方程没有解析解,最简单有效的方法是用传输矩阵法进行数值求解。

传输矩阵分析方法:首先将非均匀光栅均匀划分为 M 段,其中每一小段光栅等效为一个均匀光栅,比如任意第 k 段光纤光栅的传输特性用一个 2×2 的传输矩阵表征,如图 1 所示。则整个非均匀光栅的传输特性可以用 M 段均匀光栅的级联表示,把 M 个矩阵联乘起来就可以得到整个光栅的传输方程。

程 1 中 R_k 和 S_k 表示通过第 k 段光纤光栅的前向波和后向波的振幅。 F_k 表示第 k 段光纤光栅传输特性的 2×2 矩阵,

$$\begin{bmatrix} R_k \\ S_k \end{bmatrix} = F_k \begin{bmatrix} R_{k-1} \\ S_{k-1} \end{bmatrix},$$

对于反射型光纤光栅矩阵 F_k 为^[17]

$$F_k = \begin{bmatrix} \cosh(\Omega dz) - i \frac{\delta}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & -i \frac{k_{ac}}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \\ i \frac{k_{ac}}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & \cosh(\Omega dz) + i \frac{\delta}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\Omega = \sqrt{|k_{ac}|^2 - \delta^2}$, k_{ac} , δ , Ω 分别为第 k 段均匀光栅中的值, dz 为第 k 段光栅的长度。

整个非均匀光栅可表示为

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F_M F_{M-1} \cdots F_k \cdots F_2 F_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

再结合边界条件得出光栅的反射系数为 $\rho =$

$\frac{S_M}{R_M}$, 时延为 $\tau = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda}$, 式中 θ 为反射系数的相位, c 为真空中光速。

3 算法分析

为了分析 QPSO 算法应用于光纤光栅参数重构的性能,分别将其与 PSO 及 GA 比较。

3.1 遗传算法

GA 是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理而发展起来的一种群体智能。从任意一个初始种群出发,通过选择、交叉和变异操作,产生比

父辈更适应环境的子代群体。经过一代代不断繁衍进化后,得到最适应环境的群体,再从中选择最优个体作为问题的最终解。

GA 的优点是其群体搜索特性,并行计算能力,可扩充性和易于与其他方法相结合。GA 的缺点是编码不规范及编码表示的不准确性,算法效率比其他传统的优化方法低,容易出现过早收敛。

3.2 经典粒子群算法

经典 PSO 是一种群体智能,它源于对鸟群捕食行为的模拟。PSO 寻优是通过在进化中更新粒子(可行解)的飞行速度和位置来实现的。飞行方向以粒子所经历的最佳位置及群体所经历的最佳位置共同指引。进化过程结束后,群体所经历的最佳位置作为最终解。

POS 主要的优点是算法简单,没有遗传操作,不象 GA 需要对每一个特定的问题设计一个特定的编码方案,且比 GA 收敛速度更快;但是也跟 GA 一

样不一定能保证所得解的可行性和最优性。

3.3 量子粒子群算法

QPSO算法是由J. Sun等^[21~23]所提出的一种具有量子行为的粒子群优化算法。QPSO算法寻优过程不再是按照特定的轨迹飞行搜索,而是粒子以既定的概率出现在整个可行空间的某一任意位置,类似于量子行为,可用波函数来描述。

从动力学的观点看,粒子必须在引力势场内向其中心 p 点移动,以避免飞出搜索空间并保证收敛。这一点,在经典PSO算法中通过直接限定搜索范围来实现。类似地,在QPSO算法中,为了保持粒子的束缚态,粒子必须向势场内移动。当势场为Delta势阱时,粒子飞向势阱中心 p 点,实现全局收敛。

QPSO算法中,粒子的空间状态用波函数 $\psi(x, t)$ 来描述。粒子在某一位置出现的概率可用概率密度函数 $|\psi(x, t)|^2$ 描述。通过蒙特-卡罗随机模拟仿真得到粒子的位置方程

$$x(t+1) = p \pm \beta |m_{\text{best}} - x(t)| \ln(1/u), \quad (3)$$

$$m_{\text{best}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M p_{i,1}, \sum_{i=1}^M p_{i,2}, \dots, \sum_{i=1}^M p_{i,D} \right), \quad (4)$$

$$p_{i,d} = \varphi p_{\text{best}}^{i,d} + (1 - \varphi) g_{\text{best}}^d, \quad (5)$$

式中 M 为种群规模, D 为个体变量的维数, p_{best}^i 为个体最优解, g_{best} 为全局最优解, m_{best} 是局部最优解的平均值, φ 和 u 是 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机值, β 称为伸缩系数,是QPSO唯一的参数。

当势场为Delta势阱时, $|\psi(x, t)|^2$ 具有Delta函数特征,势阱宽度 $L \rightarrow 0$,当 $t \rightarrow +\infty$ 时,总有 $x \rightarrow p$ 。而QPSO算法每一代进化中,粒子以某一确定的概率出现在整个可行搜索空间,所以 p 点也可能比当前群体最佳位置更具优势,从而使算法向全局最佳位置逼近。而PSO寻优过程粒子以确定的轨迹飞行在某一限定的空间内,因此有时会陷入局部最优,有时会停滞不前。

可见,与PSO,GA相比,QPSO算法更简单有效,收敛速度更快,其全局搜索性能更好。

4 应用量子粒子群算法重构光纤光栅参数

把给定的设计参数(例如光纤光栅的反射谱或者时延特性)作为目标函数,把需要重构的参数作为变量,两者一起构成种群的个体变量(粒子)。均匀

光纤光栅的个体包含的变量为:长度 L ,周期 Λ (对应啁啾光纤光栅起始波长的周期),折射率调制 Δn ;啁啾光纤光栅个体变量还增加一维:啁啾系数。以已知光纤光栅产生的反射谱作为目标函数中的 R_{trng} ,分别对均匀光纤光栅和线性啁啾光纤光栅进行了参数重构。

建立误差函数

$$f_{\text{error}} = \sum_k |R_{\text{clac}}(\lambda_k) - R_{\text{trng}}(\lambda_k)|. \quad (6)$$

应用QPSO算法重构光纤光栅参数的实现步骤:

- 1) 建立目标函数及误差函数 f_{error} ;
- 2) 设置初始进化代数 $t=0$;
- 3) 初始化种群:生成粒子结构,设置种群规模 M ,以随机方式产生每个粒子的初始位置 X_i ;
- 4) 评估每个粒子的误差函数值 $f_i = f_{\text{error}}(X_i)$,
 $i = 1, 2, 3, \dots, M$;
- 5) 确定个体最优解 p_{best}^i 和全局最优解 g_{best} :
 $p_{\text{best}}^i = X_i$; $g_{\text{best}} = \min(p_{\text{best}}^1, \dots, p_{\text{best}}^M)$;
- 6) While 终止条件未满足 Loop
 $t = t + 1$;
For $i = 1$ to $i = M$
根据(4)式计算 m_{best} ;
根据(5)式计算 p_i ;
根据(3)式更新粒子位置 X_i ;
计算每个粒子的误差函数值 $f_i = f_{\text{error}}(X_i)$;
更新个体最优解 p_{best}^i ;

结束

更新全局最优解 g_{best} ;

结束

5 仿真结果与讨论

用QPSO算法分别对均匀和非均匀光纤光栅(以线性啁啾光栅为例)进行参数重构,并将之与GA和PSO算法进行比较。采用耦合模理论和传输矩阵法相结合^[1]对光纤光栅进行求解。算法初始种群包含40个个体,对均匀和非均匀光栅进化100和200代寻得的最优解作为重构光栅的参数。每组实验数据取20次运行结果的平均值,并计算其标准差。

对于均匀光纤光栅,其目标物理参数为:光栅长度 $L=6.0 \text{ mm}$,周期 $\Lambda=535.2210 \text{ mm}$ (对应啁啾光纤光栅起始波长的周期),折射率调制 $\Delta n=2.0 \times 10^{-4}$,其目标反射谱和各算法得到的重构反射谱如

图 2 所示。对于线性啁啾光栅,目标物理参数为 $L=11.3\text{ mm}$, $\Lambda=535.9613\text{ mm}$ (对应啁啾光纤光栅起始波长的周期), $\Delta n=1.12\times 10^{-4}$, 啁啾系数 $C=0.6305\text{ nm/cm}$, 其目标反射谱和各算法得到的重构参数如图 3 所示,其时延曲线则如图 4 所示。均匀和啁啾光栅的重构参数分别列于表 1, 2 中(表 1, 2 中迭代次数以误差函数 $f_{\text{error}}<5\times 10^{-5}$ 为标准)。从图 2~4 中看出 3 种算法优化结构均与目

标曲线基本吻合,但是从放大结果看出 QPSO 算法重构的反射谱和时延曲线最贴合目标曲线,其次是 PSO 算法,再是 GA 算法。从表 1, 2 同样看出基于 QPSO 算法重构的参数精度最高,各参数误差均小于 0.5%, 比 GA 和 PSO 算法的精度都高 1 个数量级,其各参数的标准差也是最小,采用的平均迭代次数也最少。同时,从图 5 各算法的收敛曲线对比看出,量子粒子群算法的收敛速度更快。

表 1 均匀布拉格光栅的参数重构结果

Table 1 Reconstruction result of uniform Bragg grating

Parameters		L/mm	Λ/nm	Δn	f_{error}	Iteration
Target		6.0	535.2210	2.0×10^{-4}		
GA	Reconstructed	5.99768	535.22106146	1.9957×10^{-4}	3.36396×10^{-5}	81.25
	Error / %	0.039	1.25×10^{-5}	0.21		
	Std.	0.061468	14.8661×10^{-4}	3.7567×10^{-6}	2.03746×10^{-5}	13.167
PSO	Reconstructed	5.991888	535.22108184	1.9977×10^{-4}	3.61379×10^{-5}	80.125
	Error / %	0.135	1.63×10^{-5}	0.114		
	Std.	0.01913	4.2207×10^{-4}	1.0826×10^{-6}	1.2912×10^{-6}	10.248
QPSO	Reconstructed	6.000326	535.2210107	1.9995×10^{-4}	6.42559×10^{-8}	69.350
	Error / %	0.0054	3.032×10^{-6}	0.024		
	Std.	0.002315	6.4537×10^{-5}	1.5040×10^{-7}	1.45847×10^{-7}	23.25

表 2 线性啁啾光纤光栅参数重构结果

Table 2 Reconstruction result of linearly chirped fiber grating

Parameters		L/mm	Λ/nm	Δn	$C/(\text{nm/cm})$	f_{error}	Iteration
Target		11.3	535.9613	1.12×10^{-4}	0.6305		
GA	Reconstructed	11.50305	535.96145	1.1084×10^{-4}	0.613539	7.436×10^{-5}	97.750
	Error / %	1.80	3.355×10^{-5}	1.033	2.69		
	Std.	1.5403	1.0512×10^{-3}	1.7055×10^{-6}	0.014395	1.93018×10^{-5}	14.754
PSO	Reconstructed	11.33713	535.961412	1.1158×10^{-4}	0.627280	6.21952×10^{-6}	93.50
	Error / %	0.33	2.75×10^{-5}	0.37	0.51		
	Std.	3.9104×10^{-2}	5.35775×10^{-4}	6.120×10^{-7}	0.003853	2.9496×10^{-6}	14.264
QPSO	Reconstructed	11.30039	535.96126	1.12001×10^{-4}	0.6303676	3.68217×10^{-8}	77.55
	Error / %	0.0035	2.13×10^{-6}	0.0012	0.021		
	Std.	0.0031	3.7782×10^{-5}	4.7388×10^{-8}	2.84775×10^{-4}	1.07875×10^{-8}	29.25

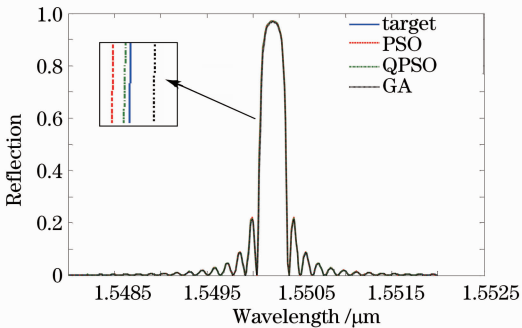


图 2 均匀布拉格光栅参数重构的反射谱
Fig. 2 Reflection of uniform Bragg grating with reconstructed parameter

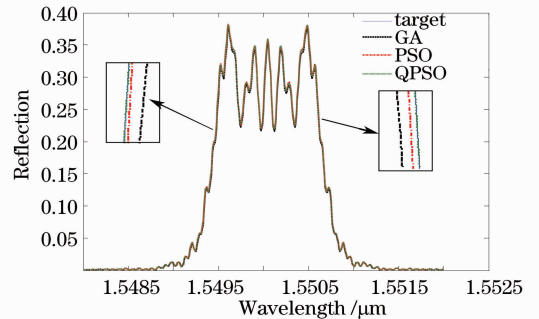


图 3 线性啁啾光栅参数重构的反射谱
Fig. 3 Reflection of linearly chirped fiber Bragg grating with reconstructed parameter

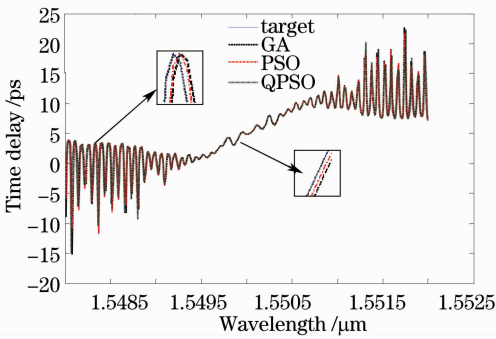


图4 线性啁啾光栅参数重构的时延曲线

Fig. 4 Time-delay of linearly chirped fiber Bragg grating with reconstructed parameter

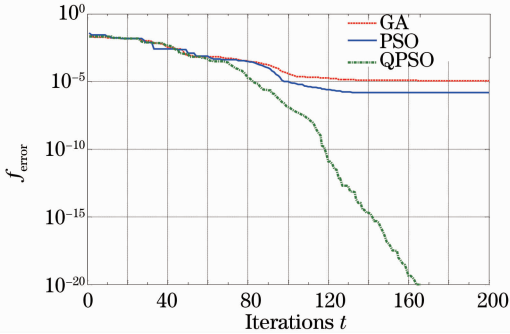


图5 各算法的收敛曲线

Fig. 5 Comparison of convergence curves for linearly chirped grating

6 实验结果与分析

为了验证算法的可靠性,制作了啁啾光纤光栅,其参数为 $L = 33 \text{ mm}$, $\Lambda = 527.93 \text{ nm}$, $\Delta n = 0.0008$, $C = 1.27 \text{ nm/cm}$,起始波长为 1546.33 nm ,终止波长为 1554.58 nm ,带宽为 8.25 nm 。QPSO 算法从其反射谱数据得到重构参数为 $L = 32.9986 \text{ nm}$, $\Lambda = 527.9299 \text{ nm}$, $\Delta n = 0.000800016$, $C = 1.270635 \text{ nm/cm}$,起始波长为 1546.312 nm ,终止波长为 1554.573 nm ,带宽为 8.265 nm 。用光谱仪测试实验光纤光栅得到的反

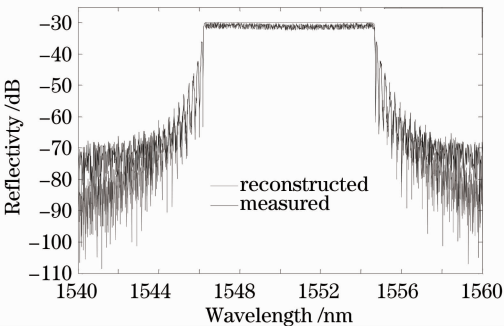


图6 实测反射谱与重构反射谱

Fig. 6 Reflection of measured and reconstructed

射谱与重构反射谱如图6所示。由图6可见,重构光栅的反射谱与实验光栅的反射谱基本相同,带宽内反射率稍有差异,这是由实际写入光栅过程中掩模板的误差等因素造成的。

7 结 论

将 QPSO 算法与 GA, PSO 算法比较,从算法的实现机理上分析 QPSO 算法与其他算法的本质区别及其优越性。然后以均匀光栅和线性啁啾光栅为例,采用量子粒子群算法结合传输矩阵理论,从反射谱中重构出满足要求的光栅参数。仿真结果及实验数据表明该方法对均匀和非均匀光纤光栅的参数重构精度高(各参数误差均小于 0.5%),与 PSO 和 GA 算法相比,该算法简单,收敛速度快且稳定,不易陷于局部最优。由于啁啾光纤光栅具有非均匀光栅的典型代表性,传输矩阵法是分析非均匀光栅的最便捷且普遍方法,本文提出的光纤光栅参数重构方法还可进一步应用到相移光栅、取样光栅及长周期光栅等非均匀光纤光栅的参数重构中。

参 考 文 献

- R. Kashyap. Fiber Bragg Gratings [M]. London: Elsevier Science Press, 1999
- Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A humidity sensor based on ultra-long-period fiber gratings with asymmetric refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2042~2045
宋 韵, 朱 涛, 饶云江等. 基于非对称折变型超长周期光纤光栅的湿度传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2042~2045
- Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanjiang *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Pérot interferometric sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1490~1495
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1490~1495
- Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Wavelength tunable band-pass filter based on chirped fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 873~878
姜 萌, 张伟刚, 金龙等. 基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 873~878
- Ma Weitao, Zhou Jun, Xu Tiefeng *et al.*. Design of optical comb filter with multi-concatenated linearly chirped fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1284~1289
马伟涛, 周 骏, 徐铁峰等. 多级联线性啁啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1284~1289
- Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 142~146
裴 丽, 宁提刚, 祁春慧等. 高速光通信系统光纤光栅色散补偿的偏振模色散研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 142~146
- Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- K. A. Winick, J. E. Roman. Design of corrugated waveguide

- filters by Fourier-transform techniques[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(11): 1918~1929
- 9 E. Peral, J. Capmany, J. Marti. Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(12): 2078~2084
- 10 M. A. Muriel, J. Azana, A. Carballar. Fiber grating synthesis by use of time-frequency representations[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(19): 1526~1528
- 11 R. Feced, M. N. Zervas, M. A. Muriel. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8): 1105~1115
- 12 P. Dong, J. Azana, A. G. Kirk. Synthesis of fiber Bragg grating parameters from reflectivity by means of a simulated annealing algorithm [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(4-6): 303~308
- 13 J. Skaar, K. M. Risvik. A genetic algorithm for the inverse problem in synthesis of fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10): 1928~1932
- 14 G. Cormier, R. Boudreau, Sylvain Theriault. Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(12): 1771~1776
- 15 Mu Kejun, Zhou Xiaojun, Ren Guorong *et al.*. Reconstruction of parameters of fiber gratings from time-delay characteristics using the genetic algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 688~693
- 穆柯军, 周晓军, 任国荣 等. 用遗传算法从时延特性重构光纤光栅参数[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 688~693
- 16 Lü Bo, Gong Taorong, Xu Ou *et al.*. Performance optimization of linear chirped gratings using genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1434~1440
- 吕博, 龚桃荣, 许鸥 等. 利用遗传算法优化线性啁啾光栅性能[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1434~1440
- 17 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 18 Liu Yumin, Yu Zhongyuan, Zhang Jianzhong *et al.*. An investigation of particles swarm optimization algorithm for the synthesis of fiber Bragg gratings [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(4): 69~70
- 刘玉敏, 俞重远, 张建忠 等. 粒子群优化算法用于光纤布拉格光栅综合问题的研究 [J]. *激光杂志*, 2005, **26**(4): 69~70
- 19 Xie Junhua, Qin Zixiong, Zeng Qingke. Design of fiber Bragg gratings using particle swarm optimization [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(4): 674~677
- 谢军华, 秦子雄, 曾庆科. 用粒子群优化算法设计光纤布拉格光栅[J]. *应用光学*, 2009, **30**(4): 674~677
- 20 Gao Zhipeng, Yu Zhenhong, Xing Lihua. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 991~996
- 高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 991~996
- 21 J. Sun, B. Feng, W. Xu. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [C]. Conf. Evolutionary Computation, CEC2004, Portland, June, 2004, (1): 325~331
- 22 Jun Sun, Wenbo Xu, Bin Feng. A global search strategy of quantum behaved particle swarm optimization [C]. Proc. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 2004, (1): 111~116
- 23 S. Mikki, A. Kishk. Investigation of the quantum particle swarm optimization technique for electromagnetic applications [C]. Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp., Jul. 3-8, 2005, (2A): 45~48