

基于粒子群算法的多通道光纤布拉格光栅 滤波器优化设计

刘瞰东¹ 叶增软¹ 陈 静¹ 陶继平¹ 江 灏^{1,2*}

(¹ 厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005
² 新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘要 在多通道光纤布拉格光栅(FBG)滤波器的设计中,通道数目的增加会导致最大折射率调制深度的成倍增长,从而造成物理上的不可实现。为此,提出一种基于粒子群算法(PSO)与直接设计方法相结合的多通道 FBG 滤波器设计方法。该方法以最小化最大折射率调制深度为优化目标,在目标反射谱中引入一组群时延参数,为每个通道分配合适的群时延参数,建立群时延参数的优化模型。通过粒子群算法计算得到各通道群时延参数的优化分配值,提升折射率调制深度的均匀化分布程度,促使最大折射率调制深度降低到物理可实现的范围内。仿真实验结果表明设计的 40 通道数、106 通道数的两种 FBG 滤波器的反射谱均匀性好,最大折射率调制深度均降到 0.001 以下。

关键词 光纤光学;多通道 FBG 滤波器;折射率调制深度;粒子群算法;群时延参数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0806005

Optimal Design of Multi-Channel Fiber Bragg Grating Filters Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

Liu Tundong¹ Ye Zengruan¹ Chen Jing¹ Tao Jiping¹ Jiang Hao^{1,2}

(¹ School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China
² School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract With the increasing number of channels, fabricating a multi-channel fiber Bragg grating (FBG) filter requires a considerably high maximum index modulation, which is beyond a physically realizable level. Hence, an effective optimization method based on particle swarm optimization (PSO) algorithm and direct design method to design a multi-channel FBG filter is proposed. By introducing the tailored group delay coefficients into the target reflectivity spectrum, a mathematical model aiming at minimizing the maximum index modulation of the grating is established. The PSO algorithm is employed to find the optimal group delay parameter for each channel. It leads to a more even distribution of the refractive index modulation, thereby reduces the maximum index modulation to a physically realizable level. Design examples of the 40-channel and 106-channel FBG filters both with uniform reflection spectra demonstrate that the proposed method yields a remarkable reduction in the maximum index modulation which is below 0.001.

Key words fiber optics; multi-channel FBG filter; index modulation; particle swarm optimization algorithm; group delay parameter

OCIS codes 060.3735; 130.7408; 060.4510

收稿日期: 2014-03-20; 收到修改稿日期: 2014-04-21

基金项目: 国家青年科学基金(11201391)、福建省自然科学基金(2013J01103)

作者简介: 刘瞰东(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感网络、光纤光栅复用以及光突发交换技术等方面的研究。E-mail: ltd@xmu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jiangh@ntu.edu.sg

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

多通道光纤布拉格光栅(FBG)滤波器作为光纤通信领域的核心传感元件,有着光谱响应良好、体积小、插入损耗低、可靠性高和兼容性好等优点^[1],被广泛运用于密集型光波复用(DWDM)系统^[2-7]。在多通道FBG滤波器的设计中,折射率调制深度是重构光栅的关键,但过大的折射率调制深度会导致滤波器物理上的不可实现^[3,8]。为此,在设计多通道FBG滤波器时,要使光谱满足预期谱线要求的同时,尽可能地减小最大折射率调制深度。

目前,已陆续提出多种设计多通道FBG滤波器的方法,主要有采样方法、层析算法和重叠算法等^[7-16]。其中,运用较为广泛的是离散层析(DLP)算法。DLP算法是利用传输矩阵分段分析的方法,通过逐层递归计算出光纤光栅的耦合系数,从而获得光栅的折射率调制深度的分布^[17]。该方法简单高效,可适用于任意多通道FBG滤波器的设计,但随着通道数的增加,设计中往往需要对相位、耦合系数等光栅结构参数进行优化。Li等^[10]首次在DLP算法的基础上,运用模拟退火算法优化光栅相位,得到了9通道零色散FBG滤波器。Gong等^[12]提出基于DLP算法和非线性最小二乘法(NLLS)的多通道FBG滤波器设计方法,但采用DLP算法求得的初始耦合系数,在NLLS优化过程中容易陷入局部最优。随着通道数的进一步增加,通过此类优化算法降低最大折射率调制深度的能力明显不足。2012年,Cao等^[14]提出了基于DLP算法的直接设计方法,即在不改变反射谱的同时引入群时延参数,使得折射率调制深度更加均匀地分布,这在很大程度上降低了最大折射率调制深度,然而该方法设计

的群时延参数分配值是凭经验给出的,具有一定的主观性,通常不是群时延参数的最优分配值。

为此,本文提出一种基于粒子群算法(PSO)与直接设计方法相结合的多通道FBG滤波器设计方法。粒子群算法是一种群体智能优化算法,通过群体中个体的协作与共享来寻找最优解^[18],算法本身具有容易实现、收敛速度快等优势,很适合于群时延参数分配问题的优化求解。本文将不同波长的反射安排在光栅的不同位置上,从而使得折射率调制深度在光栅上的分布更加地均匀。在充分分析群时延参数对折射率调制深度影响的基础上,以最小化最大折射率调制深度为目标,将群时延参数的分配问题转化为组合最优化问题,利用粒子群算法求得一组最优的群时延参数分配值。通过仿真实验可以看出,设计的50 GHz信道间隔的均匀无色散多通道FBG滤波器,在通道数增加的情况下,具有良好的平顶反射谱和较低的最大折射率调制深度。

2 基于群时延参数的多通道FBG滤波器优化建模

多通道FBG滤波器的设计是根据给定的目标反射谱,设计光纤光栅的折射率调制深度的分布,其关键是要保证最大折射率调制深度在物理可实现的范围内。分析群时延参数对折射率调制深度的作用,然后以最小化最大折射率调制深度为优化目标,建立基于群时延参数的多通道FBG滤波器设计的优化模型。

2.1 群时延参数对折射率调制深度的作用分析

在多通道FBG滤波器的设计中,采用DLP算法,可以将 N 通道FBG的目标反射谱表示如下^[10]:

$$r(\lambda) = \sqrt{R} \sum_{j=1}^N \exp\left\{-\left[\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{a}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_j}\right)\right]^b\right\} \exp\left[i2\pi n_{\text{eff}}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)L\right], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 R 为最大反射率, N 为通道数, n_{eff} 为有效折射率, λ_j 为第 j 个通道的中心波长, λ_0 为整个光谱的中心波长, L 为光栅长度, a 和 b 为超高斯函数的两个参数。从目标反射谱可以看出,每一个子通道的相位都为 $2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_0)L$,不同的波长都会从光栅的相同位置发生反射,在而导致折射率调制深度的叠加增大。当用DLP算法进行多通道FBG光栅重

构时,各通道折射率调制深度的重叠极易造成最大折射率调制深度超出物理可实现的上界(0.001)。

为了减少各通道折射率调制深度的重叠,一种可行的方法是通过调整光栅的相位来优化折射率调制深度^[14],从而降低最大折射率调制深度。在不改变光栅反射谱线的前提下,向目标反射谱中引入群时延参数, N 通道FBG的目标反射谱可重写为

$$r(\lambda) = \sqrt{R} \sum_{j=1}^N \exp\left\{-\left[\frac{2\pi n_{\text{eff}}}{a}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_j}\right)\right]^b\right\} \exp\left[i2\pi n_{\text{eff}}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)d_j\right], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中 d_j 为通道 j 的群时延参数,用于分配通道 j 的群时延。光栅每一个子通道的相位为

$$\phi(\lambda) = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) d, \quad (3)$$

$$d = (d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_N),$$

则相应的光栅群时延为

$$\tau_p = \frac{d\phi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{n_{\text{eff}}}{c} d, \quad (4)$$

式中 c 为光速。由此可知,群时延 τ_p 与群时延参数 d 成比例关系,即光栅的相位和群时延取决于群时延参数。若给各个子通道分配一个合适的群时延参数,使各通道的折射率调制深度在光栅上尽可能分散分布,将能够减少各通道折射率调制深度的重叠,从而降低最大折射率调制深度。因此,群时延参数的分配将成为多通道 FBG 滤波器设计的关键。随着通道数目的增加,由于各通道之间的耦合性,凭经验给出的群时延参数分配值,将不可能是群时延参数的最优分配值。为此采用数学优化的方法来研究多通道 FBG 滤波器的设计问题。

2.2 基于群时延参数优化的多通道 FBG 滤波器模型

在多通道 FBG 滤波器的设计中,以最小化最大折射率调制深度为优化目标,将目标函数定义为

$$f_{\text{obj}} = \max[\Delta n_{\text{ac}}(d)], \quad d = (d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_N), \quad (5)$$

式中 Δn_{ac} 为折射率调制深度,群时延参数 d 为最小化最大折射率调制深度的决策变量。考虑子光栅均匀分布的情况,可将群时延参数分配值的可选集合 $D = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$ 中的元素定义为

$$\tau_j = 2 \times [L_L + (j-1) \times L_{\text{step}}], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

$$L_{\text{step}} = \frac{L - (L_R + L_L)}{N-1}, \quad (7)$$

式中 L_{step} 为光栅上相邻两通道的间距, L_L 为光栅左端第一个通道的位置, L_R 为光栅右端第一个通道的位置。群时延参数 $d_j \in D$, 且当 $i \neq j$ 时, $d_i \neq d_j$, 其中 $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, 即群时延参数 d 为集合 D 中各元素的一种排序。

为了得到折射率调制深度 Δn_{ac} 与群时延参数 d 之间的数学关系式,采用 DLP 算法进行光栅重构,将带有群时延参数的目标反射谱(2)式代入 DLP 算法中进行迭代。将光栅均匀地分成 M 段,波长数也设为 M ,根据 DLP 算法,复反射系数 $\rho_j (j=1, 2, \dots, M)$ 为

$$\rho_j = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_j(m), \quad (8)$$

$$r_{j+1}(\delta) = \exp(-i2\delta\Delta) \frac{r_j(\delta) - \rho_j}{1 - \rho_j^* r_j(\delta)}, \quad (9)$$

式中 Δ 为每小段光栅长度, δ 为波长失谐量, $r_j(m)$ 为光谱 $r_j(\lambda)$ 的离散形式。从(2)式可以看出, $r_j(m)$ 随着群时延参数 d 的变化而变化。因此,通过迭代可以得到复反射系数 $\rho(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M)$ 是关于 d 的函数,记为 $\rho(d)$ 。由 DLP 算法可以得到耦合系数为

$$q = -\frac{\text{arctanh}(|\rho(d)|) \rho^*(d)}{|\rho(d)| \Delta}, \quad (10)$$

则折射率调制深度的表达式为

$$\Delta n_{\text{ac}} = \frac{\lambda_B}{\pi} |q| = \frac{\lambda_B}{\pi} \left| \frac{\text{arctanh}(|\rho(d)|) \rho^*(d)}{|\rho(d)| \Delta} \right|, \quad (11)$$

式中 λ_B 为中心波长。最后,可以将多通道 FBG 滤波器设计的优化模型表示为

$$\min f_{\text{obj}} = \max \left\{ \frac{\lambda_B}{\pi} \left| \frac{\text{arctanh}(|\rho(d)|) \rho^*(d)}{|\rho(d)| \Delta} \right| \right\},$$

$$d_j \in D, \quad d_i \neq d_j, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (12)$$

将多通道 FBG 滤波器的设计问题转化为寻找一组最优的群时延参数分配值,使得最大折射率调制深度最小化的组合最优化问题。粒子群算法是一种具有全局搜索能力的群体智能优化算法,很适合于多通道 FBG 滤波器设计的优化模型的求解,利用粒子群算法可求得一组最优的群时延参数分配值,从而降低最大折射率调制深度。

3 基于粒子群算法的群时延参数优化设计

粒子群算法是一种基于群体智能的全局优化方法,最早由 Eberhart 等^[18]在鸟类觅食行为的启发下于 1995 年提出。粒子群算法将所求问题的搜索空间与鸟类的飞行空间进行类比,每个粒子都具有自己的“粒子位置”和“飞行速度”,通过群体中各粒子间的合作与竞争来实现全局优化搜索。粒子群算法简单且容易实现,在多维空间函数寻优方面具有高效并行处理、收敛速度快和稳健性好等优势,很适合于群时延参数分配问题的优化求解。

多通道 FBG 滤波器群时延参数分配值的优化本质上属于离散寻优问题,对不同群时延参数分配值的多通道 FBG 滤波器,它的最大折射率调制深度亦各不相同。为此,采用整数编码方式对粒子的位置进行编码。对于 N 通道的 FBG 滤波器,群时延参数为

$$d(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_N) = d(\tau_{i_1}, \tau_{i_2}, \dots, \tau_{i_j}, \dots, \tau_{i_N}), \quad (13)$$

则对应坐标编号为 $X = (i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_N)$ 。针对多通道 FBG 滤波器群时延参数分配值的优化问题,采用“交换子”和“交换序”^[19]来表示粒子的飞行速度,每个粒子的飞行速度根据粒子自身的飞行经验和种群中所有粒子的飞行经验进行动态调整。

本文设计的粒子群算法首先通过随机生成一群不同序列的粒子进行种群初始化。每个粒子表示一组群时延参数的分配值,并根据 DLP 算法求得最大

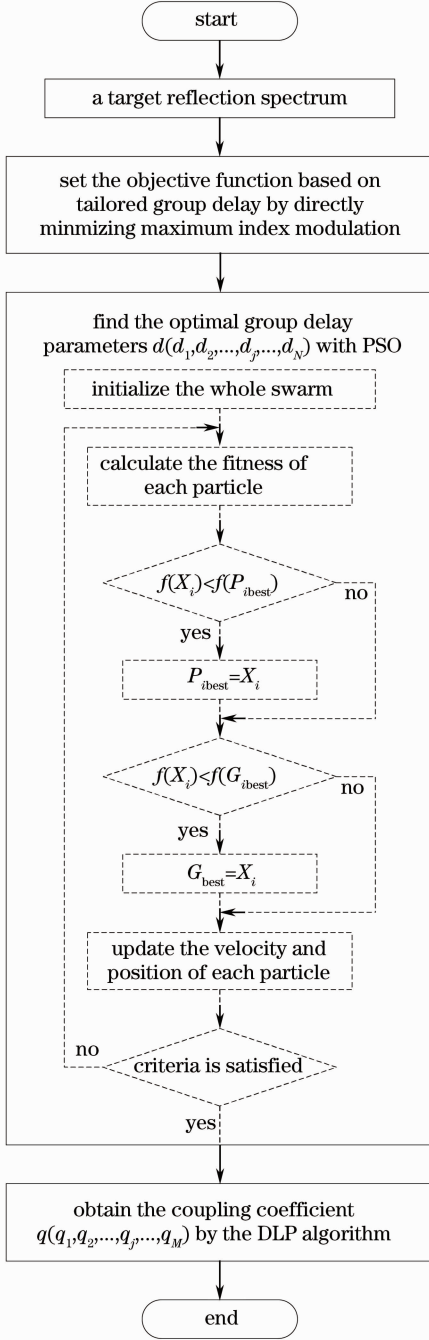


图1 粒子群算法设计多通道 FBG 滤波器流程图

Fig. 1 Flowchart of the multi-channel FBG design with PSO algorithm

折射率调制深度作为粒子的适应度值。同时,每个粒子按照自身的飞行速度在解空间中移动,其飞行速度的大小和方向都将由当前自身的速度和两个极值来控制:1)粒子自身当前找到的最优位置,即个体极值 P_{ibest} ;2)整个种群当前找到的最优位置,即全局最优位置 G_{best} 。随后,每个粒子都通过上述方式不断地移动,最终寻找到其最优位置。

种群中的第 i 个粒子将根据下式更新自己的速度和位置:

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (P_{ibest} - X_i^t) + c_2 r_2 (G_{best} - X_i^t),$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}, \quad (14)$$

式中 X_i^t 为第 i 个粒子第 t 代的位置, V_i^t 为第 i 个粒子第 t 代的速度, P_{ibest} 为第 i 个粒子自身当前达到的最优位置, G_{best} 为所有粒子当前达到的最优位置, ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为介于 $(0, 1)$ 之间的随机数。利用粒子群算法进行多通道 FBG 滤波器群时延参数分配值优化的流程如图 1 所示。

4 实验仿真及结果分析

为了验证基于粒子群算法的多通道 FBG 滤波器优化设计方法的有效性,首先设计了均匀无色散的 40 通道 FBG 滤波器,其反射率为 95%,信道间隔为 50 GHz。根据(2)式的目标反射谱,可将相应的参数设置如下: $a = 501.8$, $b = 20$, $N = 40$, $R = 0.95$, $n_{eff} = 1.46$ 。光栅长度 $L = 12$ cm,中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm,第 j 通道的中心波长 $(\lambda_j = 1541.8 + 0.4j)$ nm,其中 $j = 1, 2, \dots, 40$ 。

为了更好地进行比较,首先将群时延参数固定,即 $d_j = L(j = 1, 2, \dots, 40)$,用 DLP 算法直接进行 40 通道 FBG 滤波器光栅重构,其折射率调制深度分布、反射谱与群时延如图 2 所示。

图 2(a)中,折射率调制深度呈峰值状分布,且主要集中于光栅中心位置。在实验结果中,最大折射率调制深度为 $\Delta n_{ac} = 7.580 \times 10^{-3}$,远远超出物理可实现的上界 (0.001) 。图 2(b)中,重构得到的反射谱各个通道均匀分布,谱线光滑,反射率和带宽基本能够达到设计要求,且各通道的群时延都相同。对于多通道 FBG 滤波器,随着通道数目的增加,最大折射率调制深度会成倍增长,40 通道 FBG 滤波器的最大折射率调制深度 $\Delta n_{ac} \approx N \times \Delta n_s$,其中 Δn_s 为单通道 FBG 滤波器的最大折射率调制深度,实验中 $\Delta n_s = 0.198 \times 10^{-3}$ 。由此可见,DLP 算法并不能够降低最大折射率调制深度。

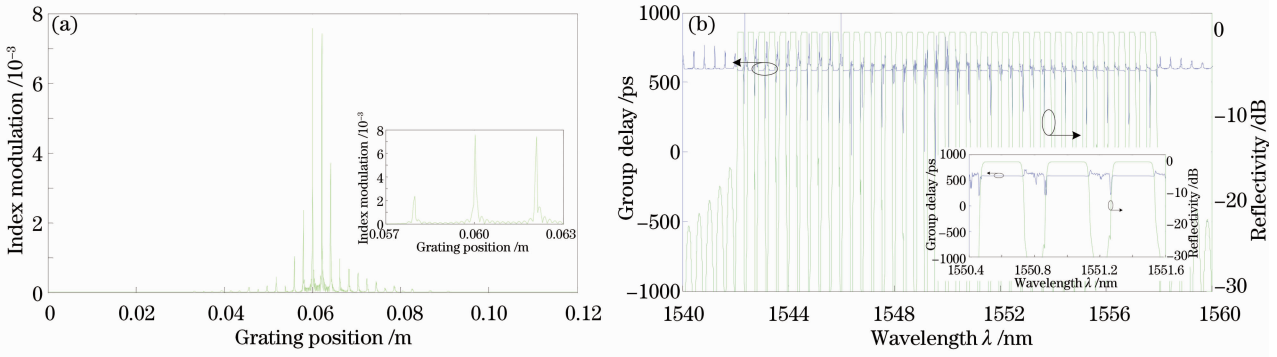


图2 DLP算法设计的40通道FBG滤波器。(a)折射率调制深度分布；(b)反射谱与群时延
Fig.2 Designed 40-channel FBG filter with DLP algorithm. (a) Synthesized index modulation;
(b) synthesized reflection spectrum and group delay response

对于40通道FBG滤波器,采用粒子群算法寻得一组最优的群时延参数分配值 $d(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_{40})$,其左边距 $L_L = 7.2$ mm,右边距 $L_R = 7$ mm。将粒子群算法的相应参数设置如下:种群大

小,即粒子个数 $m = 100$;迭代次数为200。利用粒子群算法所得的群时延参数分配值进行40通道FBG滤波器重构,其折射率调制深度分布、反射谱与群时延如图3所示。

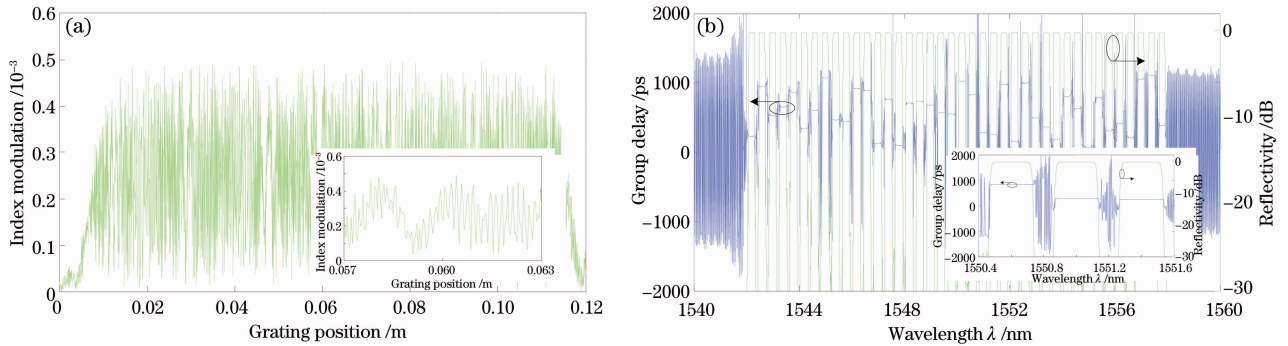


图3 粒子群算法设计的40通道FBG滤波器。(a)折射率调制深度分布；(b)反射谱与群时延
Fig.3 Designed 40-channel FBG filter with PSO algorithm. (a) Synthesized index modulation;
(b) synthesized reflection spectrum and group delay response

图3(a)中,折射率调制深度在光栅上的分布较为均匀,最大折射率调制深度为 $\Delta n_{ac} = 0.497 \times 10^{-3}$,小于物理可实现的上界(0.001)。图3(b)中,反射谱很好地满足设计要求,且不同通道的群时延各不相同。由此可知,基于粒子群算法的多通道FBG滤波器设计方法提升了折射率调制深度在光栅上的均匀化分布程度,能够有效地降低最大折射率调制深度,且反射谱线满足设计要求。

$d_{106}) = d(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{106})$,其最大折射率调制深度为 $\Delta n_{ac} = 1.237 \times 10^{-3}$,大于物理可实现的上界(0.001),达不到设计要求。采用基于粒子群算法的多通道FBG滤波器优化设计方法,106通道FBG滤波器的折射率调制深度分布、反射谱与群时延如图4所示,其最大折射率调制深度为 $\Delta n_{ac} = 0.989 \times 10^{-3}$,小于物理可实现的上界(0.001),且反射谱线满足设计要求。

随着FBG滤波器通道数目的增多,多通道FBG滤波器的设计越发困难,凭借经验给出的群时延参数设置并不一定能满足设计的要求,其最大折射率调制深度往往会超出物理可实现的上界(0.001)。采用直接设计方法进行均匀无色散的106通道FBG滤波器设计,第 j 通道的中心波长为 $\lambda_j = (1528.4 + 0.4j)$ nm,其中 $j = 1, 2, \dots, 106$,将群时延参数设置为上升型,即 $d(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots,$

采用基于粒子群算法的多通道FBG滤波器优化设计方法,106通道FBG滤波器最大折射率调制深度的收敛曲线如图5所示。从图5可以看出最大折射率调制深度在粒子群算法迭代过程中的变化,随着迭代次数的增大,最大折射率调制深度不断降低,直至降低到物理可实现的上界(0.001)。由此可知,随着FBG滤波器通道数目的增大,基于粒子群算法的多通道FBG滤波器优化设计方法亦是有效可行的。

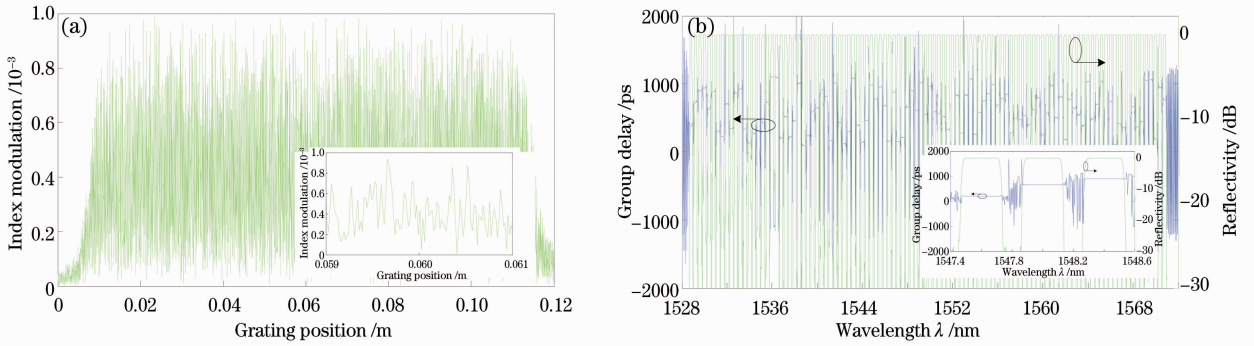


图 4 粒子群算法设计的 106 通道 FBG 滤波器。(a) 折射率调制深度分布；(b) 反射谱与群时延
Fig. 4 Designed 106-channel FBG filter with PSO algorithm. (a) Synthesized index modulation;
(b) synthesized reflection spectrum and group delay response

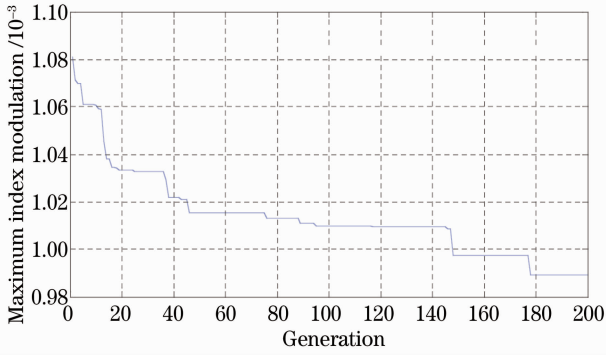


图 5 粒子群算法设计 106 通道 FBG 滤波器收敛曲线
Fig. 5 Convergence curve of PSO algorithm for
the design of 106-channel FBG filter

5 结 论

对多通道 FBG 滤波器的设计问题进行研究,建立了基于群时延参数的多通道 FBG 滤波器设计的优化模型,通过粒子群算法对该模型进行求解并得到最优群时延参数分配值。实验结果表明,粒子群算法作为一种全局优化算法,能够有效地将多通道 FBG 滤波器的最大折射率调制深度降低到物理可实现的范围内,并且反射谱满足设计要求,具有较高的参考价值。

参 考 文 献

- 1 T Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1277—1294.
- 2 M Morin, M Poulin, A Mailloux, *et al.*. Full C-band slope-matched dispersion compensation based on a phase sampled Bragg grating [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2004, 1: WK1.
- 3 C Lee, R Lee, Y Kao. Design of multichannel DWDM fiber Bragg grating filters by Lagrange multiplier constrained optimization [J]. *Opt Express*, 2006, 14(23): 11002—11011.
- 4 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.

- 5 K H Wen, L S Yan, W Pan, *et al.*. Analysis for reflection peaks of multiple-phase-shift based sampled fiber Bragg gratings and application in high channel-count filter design [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(29): 5438—5444.
- 6 Y Dai, J Yao. Design of high-channel-count multichannel fiber bragg gratings based on a largely chirped structure [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45(8): 964—971.
- 7 Bai Qing, Feng Dejun. Improved discrete layer-peeling method for the reconfiguration of multi-channel fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(4): 505—508.
- 柏青, 冯德军. 重构多信道光纤光栅的改进离散层析算法[J]. *光子学报*, 2011, 40(4): 505—508.
- 8 M Ibsen, M K Durkin, M J Cole, *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(6): 842—844.
- 9 R Slavik, S LaRochelle. Large-band periodic filters for DWDM using multiple-superimposed fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(12): 1704—1706.
- 10 H Li, Y Sheng. Direct design of multichannel fiber Bragg grating with discrete layer-peeling algorithm [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(9): 1252—1254.
- 11 H Li, Y Sheng, Y Li, *et al.*. Phased-only sampled fiber Bragg gratings for high-channel-count chromatic dispersion compensation [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(9): 2074—2083.
- 12 Y Gong, X Liu, L Wang, *et al.*. Optimal design of multichannel fiber Bragg grating filters with small dispersion and low index modulation [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(15): 3235—3240.
- 13 M Li, X Chen, J Hayashi, *et al.*. Advanced design of the ultrahigh-channel-count fiber Bragg grating based on the double sampling method [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8382—8394.
- 14 H Cao, J Atai, X Shu, *et al.*. Direct design of high channel-count fiber Bragg grating filters with low index modulation [J]. *Opt Express*, 2012, 20(11): 12095—12110.
- 15 Y Chang, C H Chen. Effective algorithm for high-channel-count multichannel fiber Bragg grating designs [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(25): 5952—5959.
- 16 C Jing, J Hao, Y Zengruan, *et al.*. Optimal design of high-channel-count fiber Bragg grating filters with low index modulation using an improved differential evolution algorithm

- [J]. IEEE Photon Journal, 2013, 5(6): 7101211.
- 17 J Skaar, L Wang, T Erdogan. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling [J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(2): 165–173.
- 18 R Eberhart, J Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proceedings of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, 1: 39–43.
- 19 M Clerc. Discrete Particle Swarm Optimization, Illustrated by the Traveling Salesman Problem [M] // New Optimization Techniques in Engineering. Berlin: Springer, 2004. 219–239.

栏目编辑：史 敏