

文章编号: 0253-2239(2006)07-0991-6

一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法

高志鹏 余震虹 邢丽华

(江南大学控制科学与工程研究中心通信研究所, 无锡 214122)

摘要: 阐述了光纤布拉格光栅的重构理论及被广泛采用的剥层算法, 指出了剥层算法在重构强反射光栅时的弊端, 提出了一种剥层算法和遗传算法相结合的方法来重构强反射光栅。此方法先由剥层算法得到光栅耦合系数的初始值, 再依据重新采样后的初始值创建初始种群, 通过遗传算法实现对剥层算法所得结果的后半部分进行优化。数值模拟表明此方法有效地改善了剥层算法的结果, 具有较快的收敛速度和很好的精度, 能适用于大多数强反射光栅的重构。

关键词: 光纤光学; 光栅重构; 遗传算法; 剥层算法

中图分类号: TN253 文献标识码: A

A Novel Method for Reconstructing Strongly Reflecting Fiber Bragg Gratings

Gao Zhipeng Yu Zhenhong Xing Lihua

(Institute of Communication, Research Center of Control Science and Technology,
Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

Abstract: The theory of fiber Bragg grating (FBG) reconstruction and the widely used layer-peeling (LP) algorithm are illustrated. The deficiency of LP algorithm in reconstructing strongly reflecting FBGs is pointed out and a hybrid method of combining genetic algorithm with LP algorithm is proposed. In this method, the preliminary values of the grating couple coefficients are obtained by using LP algorithm, and then genetic algorithm is employed to optimize the latter half of the results of the LP algorithm according to the re-sampled preliminary value with which the starting population of genetic algorithm are created. By numerical simulation, the novel method is proved to be fast convergent, very accurate, suitable for reconstructing most of strongly reflecting FBGs, and improve the result of LP algorithm effectively.

Key words: fiber optics; grating reconstruction; genetic algorithm; layer-peeling algorithm

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)作为光通信系统中的核心器件之一, 被广泛地用作滤波器^[1]和色散补偿器^[2]。只要光纤布拉格光栅的结构(长度、光栅周期、折射率调制)已知, 其反射谱和时延特性就可以通过传输矩阵的方法计算出来^[3]。相反地, 从测量得到的反射谱和时延特性中提取出光栅结构信息的过程被称作光栅重构。重构光栅的逆散射算法主要有傅里叶变换算法^[4]、GLM 算法^[5]和剥层(Layer-peeling, LP)算法^[6,7]。其中, 剥层算法由于运行速度快、精度高, 得到了广泛的应用。但是, 剥层算法所建立的分层光栅模型应用于强反射光栅时, 精度

会明显下降, 并且变得不稳定。

A. Rosenthal 等^[8]提出使用 GLM 算法和剥层算法相结合的方法(称为 ILP 算法)来重构强反射光栅。但是, GLM 算法涉及复杂的数学处理, 使得这种 ILP 算法运行效率低, 编程实现困难。本文提出一种基于剥层技术的遗传算法来重构强反射光栅, 它收敛速度快、精度高, 而且易于编程实现。

2 光栅重构的理论基础及剥层算法

2.1 光栅重构的理论基础

光纤布拉格光栅中的折射率分布为

作者简介: 高志鹏(1981~), 男, 湖南郴州人, 江南大学通信研究所硕士研究生, 主要从事光无源器件方面的研究。

E-mail: no9_magician@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-08-10; 收到修改稿日期: 2005-11-16

$$n(z) = n_0 + n_{dc}(z) + n_{ac}(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \theta(z)\right], \quad (1)$$

式中 n_0 为纤芯折射率, $n_{dc}(z)$ 、 $n_{ac}(z)$ 分别代表光栅的折射率直流调制幅度和交流调制幅度, Λ 是光栅周期, $\theta(z)$ 为光栅的相位啁啾。 $n_{dc}(z)$ 的大小与光栅的制作方式有关: 普通的紫外曝光法制作的光栅 $n_{dc}(z) = v \cdot n_{ac}(z)$, v 为调制深度; 实际中大多采用抑制直流调制的两步曝光法^[9], 使 $n_{dc}(z) = 0$ 。为了简化分析, 假定 $n_{dc}(z) = 0$ 。

当吸收效应可以忽略时, 波数为 β 的光波在布拉格光栅中的传播过程可以用下面的耦合模方程来表征:

$$\begin{aligned} \frac{du(\delta, z)}{dz} &= i\delta u(\delta, z) + q(z)v(\delta, z), \\ \frac{dv(\delta, z)}{dz} &= -i\delta v(\delta, z) + q^*(z)u(\delta, z), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\delta = \beta - \pi/\Lambda$, 代表波数的失谐量; $u(\delta, z)$ 和 $v(\delta, z)$ 分别代表前向传播光波的复振幅和后向传

播光波的复振幅。 $q(z)$ 是光栅的耦合系数, $q^*(z)$ 为其复共轭。

$$q(z) = \frac{i\pi}{\lambda_b} n_{ac}(z) \exp\left[i\theta(z) - i\frac{4\pi}{\lambda_b} \int_0^z n_{dc}(s) ds\right], \quad (3)$$

$\lambda_b = 2n_0\Lambda$, 为布拉格波长。由(3)式可看出, $q(z)$ 的幅度对应着光栅的折射率交流调制, 其相位包含了光栅的啁啾信息。光栅的有效周期为^[10]

$$\Lambda_{\text{eff}}(z) = \Lambda \left[1 + \frac{\Lambda}{2\pi} \frac{\text{darg}(q)}{dz} \right]^{-1}, \quad (4)$$

因此, 光栅重构的关键就是求得光栅的耦合系数分布。

2.2 重构光栅的剥层算法

剥层算法基于离散的光栅模型, 如图 1 所示。整个光栅被划分为 N 段 (N layers), 每段长度为 $\Delta = L/N$, L 为光栅长度。当 N 取得足够大时, 每段光栅可认为是均匀的, 此时耦合模方程有解析解, 可写成矩阵方程的形式:

$$\begin{bmatrix} u(z + \Delta, \delta) \\ v(z + \Delta, \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\Delta) + i\frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) & \frac{q}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) \\ \frac{q^*}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) & \cosh(\gamma\Delta) - i\frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma\Delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(z, \delta) \\ v(z, \delta) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

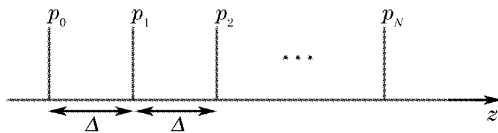


图 1 离散光栅模型

Fig. 1 Discrete grating model

其中 $\gamma = |q|^2 - \delta^2$ 。(5) 式的初始条件为

$$\begin{bmatrix} u(0, \delta) \\ v(0, \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ r_0(\delta) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$r_0(\delta)$ 是光栅的反射谱。同时, 在离散光栅模型中, 前、后向传输光在布拉格光栅中的耦合被认为是在 $N + 1$ 个离散的反射点瞬时完成的, 在其他地方, 光场传播只产生相移。这样, (5) 式中的传输矩阵 \mathbf{T} 可用一个相移矩阵和一个反射矩阵的级联来近似: $\mathbf{T} \approx \mathbf{T}_\Delta \mathbf{T}_\rho$ 。令 $|q| \rightarrow \infty$, 同时使耦合量 $|q|\Delta$ 保持为常数, 就可以从(5)式中的传输矩阵 \mathbf{T} 导出反射矩阵:

$$\mathbf{T}_\rho = (1 - |\rho|^2)^{-1/2} \begin{bmatrix} 1 & -\rho^* \\ -\rho & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中复反射系数

$$\rho = -\tanh(|q|\Delta) \frac{q^*}{|q|}, \quad (8)$$

相似地, 令 $q \rightarrow 0$, 就得到了相移矩阵:

$$\mathbf{T}_\Delta = \begin{bmatrix} \exp(i\delta\Delta) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta\Delta) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

这样, 整个布拉格光栅就由 $N + 1$ 个反射点来表征, $\rho_j = -\tanh(|q_j|\Delta) q_j^* / |q_j|$, $j = 0, 1, \dots, N$, 这些反射点被 N 个传输段隔开。

光栅的反射谱可以写成其冲激响应的傅里叶级数:

$$r_0(\delta) = \sum_{n=0}^{\infty} h_0(n) \exp(i\delta n \cdot 2\Delta), \quad (10)$$

这里 2Δ 是光在一段均匀光栅中的往返距离, 也是冲激响应的采样周期。根据因果分析^[10], 冲激响应的第一点与反射系数 $\rho_j (j \geq 1)$ 无关, 于是有 $\rho_0 = h_0(0)$ 。既然得到了 ρ_0 , 就可以使用 $\mathbf{T}_\Delta \mathbf{T}_{\rho_0}$ 前向传播光场:

$$\begin{bmatrix} u(0 + \Delta, \delta) \\ v(0 + \Delta, \delta) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_\Delta \mathbf{T}_{\rho_0} \begin{bmatrix} u(0, \delta) \\ v(0, \delta) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

从而得到 $r_1(\delta) = v(0 + \Delta, \delta) / u(0 + \Delta, \delta)$ 。用同样的方法, 可以得到 $\rho_1 = h_1(0)$ 。光继续逐层传播, 就得到了全部的 $\rho_j (j = 0, 1, \dots, N)$ 。使用(8)式, 计算得到 q_j , 最后使用(3)式、(4)式便可得到折射率的交

流调制幅度以及光栅的本地周期。

剥层算法是一种高效、高精度的光栅重构算法。但是,当光栅中的折变量很大以致峰值反射率超过 95% 时,大部分的光还未到达光栅尾部时就已经被反射。因此,剥层算法这种以光的逐层传播来确定光栅耦合系数的方式在重构强反射光栅时,所求得的光栅末端的耦合系数会变得不准确,并且这些误差将逐层累积。图 2 是用剥层算法对不同峰值折变量的高斯切趾光栅进行重构得到的结果。其中所选用的参量为: $L=2\text{ cm}$, $\lambda_b=1550\text{ nm}$,高斯切趾半峰全宽(FWHM)为 0.5 cm ,峰值折变量从 6.8×10^{-4} 开始以 0.4×10^{-4} 为间隔不断增大,对应的峰值反射率均超过了 99%。从图中可以看到,由于峰值变量的不断增大引起峰值反射率的不断增大,使末端的重构结果不断趋于发散。

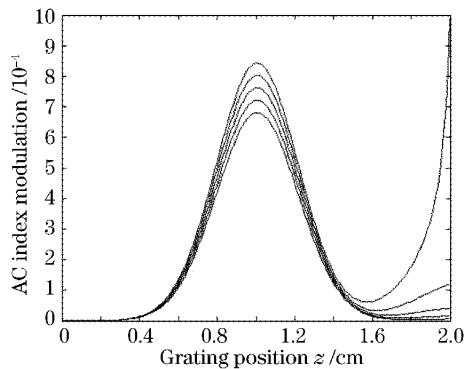


图 2 使用剥层算法重构 5 个不同峰值折变量的高斯切趾光栅得到的折射率交流调制幅度

Fig.2 Reconstructed AC index modulation $n_{ac}(z)$ of 5 Gaussian apodized gratings with different maximum index contrast by layer-peeling (LP) algorithm

3 基于剥层技术的遗传算法

遗传算法(GA)是一种优化算法^[11],它基于自然界的生物进化模型,通过对种群进行选择、交叉、变异操作,使种群的生存能力不断加强。种群就是所有变量值的集合,种群的生存能力通过误差函数值来衡量。重构光栅时,种群可表示为 $q_k = [q_k(0), q_k(1), \dots, q_k(n)]$, $k = 1, 2, \dots, M$, M 为种群规模; $q_k(n)$ 表示当前群体中第 k 个个体的第 n 个变量,它对应于光栅中第 n 点的耦合系数(这里取其幅值), $n = 0, 1, \dots, N$ 。误差函数 E 可表示为

$$E = E(R) + \omega \cdot E(D), \quad (12)$$

其中 $E(R)$ 和 $E(D)$ 分别为反射谱误差和禁带内时延谱误差,两者均可通过传输矩阵法由 q_k 计算得到;

ω 为权重,用以保证 $E(R)$ 和 $\omega \cdot E(D)$ 有着大致相同的数量级,一般可取 $\omega = 5$ 。 $E(R)$ 和 $E(D)$ 可采用以下的形式:

$$E(R) = \sum_i [(R_{\text{target},i} - R_{\text{calc},i})^2], \quad (13)$$

$$E(D) = \sum_{j(\text{in band})} [(D_{\text{target},j} - D_{\text{calc},j})^2], \quad (14)$$

其中 $R_{\text{target},i}$ 和 $R_{\text{calc},i}$ 分别为目标反射谱和计算所得反射谱中第 i 点的值; $D_{\text{target},j}$ 和 $D_{\text{calc},j}$ 分别为目标时延谱和计算所得时延谱中第 j 点的值。误差函数值越小,对应种群的生存能力越强;遗传算法就是根据计算所得的误差函数值,对 q_k 进行择优选择、交叉和变异操作,使其不断接近最优值^[12]。遗传算法重构光栅的流程如图 3 所示。

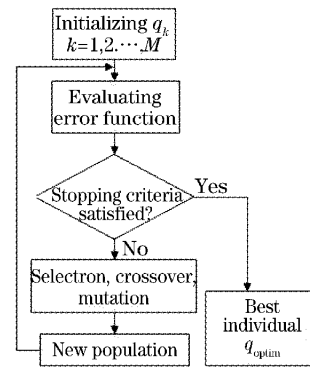


图 3 遗传算法重构光栅的流程

Fig.3 Flow chart of the genetic algorithm for grating reconstruction

使用遗传算法的一个重要优势在于可以利用现有的 Matlab 遗传算法工具箱^[11],只要写出恰当的误差函数并选择好相关的遗传算法参量,就可方便地得到符合目标谱的耦合系数分布。但是,遗传算法的收敛速度和精度与初始种群密切相关^[13],一旦选用的初始种群远离最优值,遗传算法收敛到全局最优解需要很长的时间,甚至可能得不到最优解。采用单一的遗传算法对升余弦切趾的光栅进行重构, $L=1\text{ cm}$, $\lambda_b=1550\text{ nm}$,半峰全宽为 0.5 cm ,峰值折变量为 8.5×10^{-4} ,对应的峰值反射率为 1×10^{-6} 。所选择的遗传算法参量如表 1 所示,同时采用随机初始种群和精英保留的策略,得到了如图 4 中细点线所示的结果。可以看到,重构结果与目标值(由图 4 中的圆圈标记)的差异较大。

基于剥层技术的遗传算法(LPGA)是一种两步重构算法:先使用剥层算法得到光栅耦合系数的初始值,再依据此初始值来构建遗传算法的初始种群及相应的初始种群区间,采用遗传算法重构光栅。

表 1 采用遗传算法重构升余弦切趾光栅所用的参量值
Table 1 Parameters of genetic algorithm (GA) used in raised-cosine apodized grating reconstruction

Length of q_k	12
Population size	240
Generations	400
Coding	Real
Selection	Stochastic uniform
Crossover	Scattered, fraction 0.7
Mutation	Gaussian, fraction 0.3 Scale 0.25, shrink 0.8

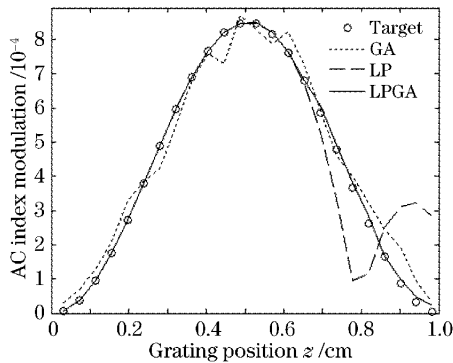


图 4 采用遗传算法(点线)、剥层算法(破折线)以及基于剥层技术的遗传算法(实线)重构升余弦切趾光栅所得到的折射率交流调制幅度;圆圈对应目标值

Fig. 4 Reconstructed AC index modulation $n_{ac}(z)$ of a raised-cosine apodized grating by GA (dotted line), LP (dashed line) and LPGA (solid line); circles stand for target value

由于剥层算法重构强反射光栅时得到的耦合系数只在光栅末端变得不精确,所以遗传算法只需要对光栅后半段的耦合系数值进行优化即可。此外,剥层算法所采用的光栅分段数 N 较大,为了提高遗传算法的运行效率,必须对剥层算法的结果进行重新采样,记采样后的分段数为 N' 。事实证明^[14],当光栅长度小于 10 cm 时,取分段数为 50 进行计算已经能获得很好的精度。

初始种群的构建采用如下方法:产生 M 个长度为 $N'/2$ 的高斯分布随机向量,每个随机向量内的元素按绝对值大小作升序排列,将这 M 个随机向量与耦合系数的初始值相加,就得到了规模为 M 的初始种群。将当前耦合系数的最大值表示为 q_{max} ,则初始种群区间可设为 $[0, q_{max}]$,由于该范围较大,使用高斯变异方式时应选取较小的方差,以减小变异值的分布范围。

采用基于剥层技术的遗传算法对前文中的升余弦光栅进行重构。首先使用剥层算法得到光栅中

96 个点上的耦合系数值,每 4 点取样一次,共 24 点,所得结果如图 4 中的破折线所示(已转化为折射率交流调制幅度)。然后使用遗传算法对光栅后半段的耦合系数进行优化重构,采用的各种参量分别为: q_k 长度 12,种群规模 240,进化代数 400,交叉概率 0.7,变异概率 0.3,变异方差 0.25,收缩因子 0.8,其他参量与表 1 中的相同。从图 4 中可以看到,由基于剥层技术的遗传算法得到的结果与目标值非常接近,大大改善了剥层算法得到的结果,而且明显优于单一的遗传算法得到的结果。图 5 是由基于剥层技术的遗传算法计算所得的各代最佳个体的误差函数值,显示了算法的收敛过程。最后的误差主要是光栅分段产生的,当光栅分段数上升时,误差可进一步缩小,但同时会增加遗传算法的运算复杂度。

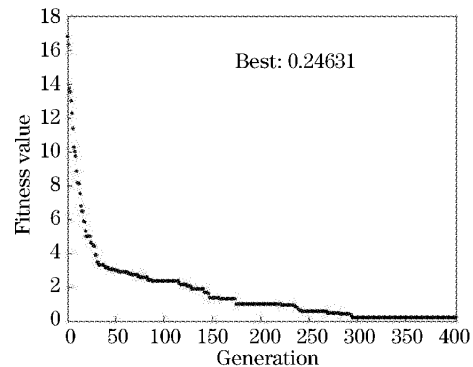


图 5 采用基于剥层技术的遗传算法重构升余弦切趾光栅得到的各代最佳个体对应的误差函数值

Fig. 5 The corresponding error function values of best individuals in every generation derived from the raised-cosine apodized grating reconstruction by LPGA

考虑到实际中的啁啾光栅大多为线性啁啾或平方啁啾形式,采用基于剥层技术的遗传算法可以直接对啁啾参量 C 进行拟合, C 的初始值可从剥层算法得到的本地周期中提取。采用该算法对超高斯切趾的线性啁啾光栅进行重构。 $L=3$ cm, $\lambda_0=1550$ nm,半峰全宽为 2.4 cm, $C=-0.4$ nm/cm,峰值折变量 7×10^{-4} ,对应的峰值反射率为 $1 \sim 10^{-5}$,其反射谱和时延谱如图 6 所示。首先由剥层算法计算得到光栅中 240 个点的耦合系数及本地周期的初始值,如图 7 所示;对耦合系数每 6 点取样一次,共 40 点,取后 20 点作为遗传算法耦合系数的初始值;由本地周期的变化可以判定光栅为线性啁啾光栅,利用公式 $\Delta(z)=\Delta+C \cdot z$ 计算得到 C 的初始值为 -0.4134 。使用遗传算法对光栅后半段的耦合系数及啁啾系数

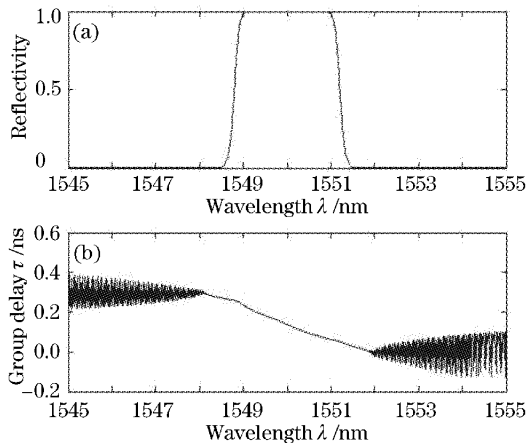


图 6 超高斯啁啾光栅反射谱的(a)及时延谱(b)

Fig. 6 Reflection spectrum (a) and group delay curve of the chirped super-Gaussian grating

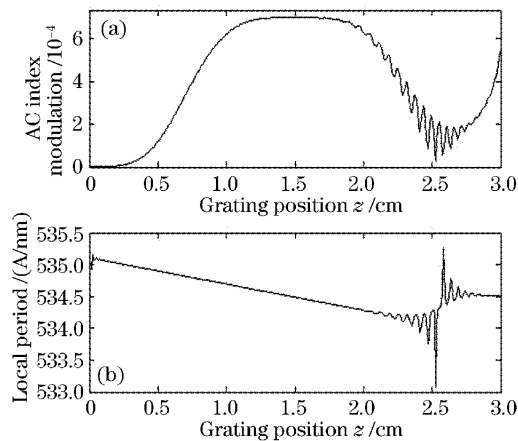


图 7 采用剥层算法重构超高斯啁啾光栅得到的折射率交流调制幅度(a)及本地周期(b)

Fig. 7 Reconstructed AC index modulation (a) and local period (b) of the chirped super-Gaussian grating by using LP algorithm

进行重构,采用的各种参量分别为:变量个数 21,种群规模 420,进化代数 600,变异方差 0.3,其他参量与前例相同。如图 8 所示,由基于剥层技术的遗传算法得到的结果与目标值很好的吻合,最后拟合的啁啾参量为 -0.4004 ;图 9 为对应的误差函数收敛图。

当光栅的啁啾形式变得不规则时,就需要对光栅后半段耦合系数的相位进行优化重构,这将使计算量倍增,基于剥层技术的遗传算法的运行效率将大为下降。至于重构强反射的均匀光栅,由于优化变量少,单一的遗传算法已经能很好地解决问题,基于剥层技术的遗传算法对运行效率和结果的改善并不明显。另外,由于基于剥层技术的遗传算法对光栅耦合系数的优化重构是通过迭代减小误差函数值进行的,如果测量得到的目标谱本身含有噪声,基于

剥层技术的遗传算法的结果与实际值的误差将随噪声水平的上升而增大。

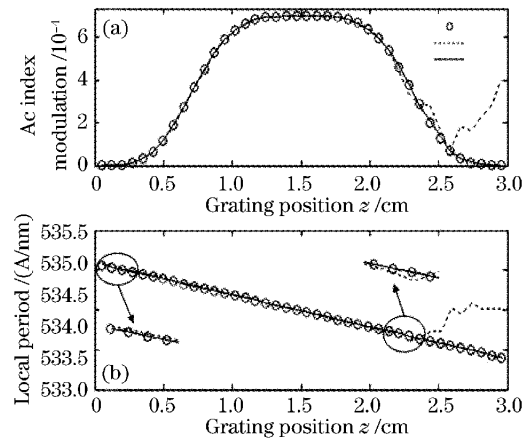


图 8 采用基于剥层技术的遗传算法(实线)重构超高斯啁啾光栅得到的折射率交流调制幅度(a)及本地周期(b);圆圈和细点线分别代表目标值和采样后的剥层算法结果

Fig. 8 Reconstructed AC index modulation (a) and local period (b) of the super-Gaussian grating by using LPGA (solid line); the circles and dotted line stand for target values and sampled result of LP algorithm respectively

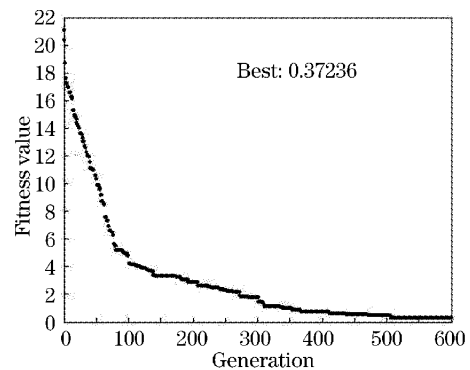


图 9 采用基于剥层技术的遗传算法重构超高斯啁啾光栅得到的各代最佳个体对应的误差函数值

Fig. 9 The corresponding error function values of best individuals in every generation derived from the chirped super-Gaussian grating reconstruction by LPGA

4 结 论

本文从剥层算法重构光栅的理论出发,指出了剥层算法在重构强反射光纤布拉格光栅时的缺陷,同时阐明了单一的遗传算法重构光栅时存在较大误差。提出了一种基于剥层技术的遗传算法,该算法首先由剥层算法重构光栅得到耦合系数的初始值,

再使用遗传算法对此初始值进行部分优化。由于待优化的变量数减少,而且剥层算法的结果为遗传算法提供了较好的出发点,使得这种基于剥层技术的遗传算法具有很高的精度和较快的收敛速度,很好地解决了强反射光纤布拉格光栅的重构问题。

参 考 文 献

- 1 Luo Aiping, Emmanuel Marin, Jean-Pierre Meunier *et al.*. All-fiber wavelength selection filter based on UV-written Bragg grating in conventional fused coupler[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1491~1494 (in Chinese)
罗爱平, Emmanuel Marin, Jean-Pierre Meunier 等. 光纤耦合器上写入光栅制作滤波器的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1491~1494
- 2 Tangjun Li, Muguang Wang, Cao Diao *et al.*. Compensating large PMD by a fiber grating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3): 138~140
- 3 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 4 K. A. Winick, J. E. Roman. Design of corrugated waveguide filters by Fourier transform techniques [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(11): 1918~1929
- 5 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. Quant. Electron.*, 1996, **32**(12): 2078~2084
- 6 R. Feced, M. N. Zervas, M. A. Muriel. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(8): 1105~1115
- 7 J. Skaar, L. Wang, T. Erdogan. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer-peeling[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(2): 165~173
- 8 A. Rosenthal, M. Horowitz. Inverse scattering algorithm for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(8): 1018~1026
- 9 Huang Zhangyong. *Novel Passive Components for Optical Fiber Communication* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003. 24~25 (in Chinese)
黄章勇. 光纤通信用新型光无源器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003. 24~25
- 10 J. Skaar. *Synthesis and characterization of fiber Bragg gratings* [D]. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2000. 5~9
- 11 Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu *et al.*. *Matlab Genetic Toolboxes and Their Applications* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. 1~10
雷英杰, 张善文, 李续武 等. *Matlab 遗传算法工具箱及应用* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 1~10
- 12 Huang Rui, Chen Gang, Dong Zuoren *et al.*. Synthesis and fabrication of fiber Bragg gratings with triangular and broad bandwidth reflection spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 179~182 (in Chinese)
黄 锐, 陈 刚, 董作人 等. 三角形大带宽反射光谱光纤光栅的设计和制备[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 179~182
- 13 P. L. Swart, A. P. Kotze, B. M. Lacquet. Effects of the nature of the starting population on the properties of Rugate filters designed with the genetic algorithm[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 853~858
- 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