

文章编号: 0258-7025(2007)05-0688-06

用遗传算法从时延特性重构光纤光栅参数

穆柯军, 周晓军, 任国荣, 杨健君, 周建华, 兰 岚

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 提出了采用遗传算法(GA)结合传输矩阵法从需要的时延特性对光纤光栅进行参数重构的方法。该方法以时延为目标函数,由光纤光栅参数,包括光栅长度、折射率调制、光栅周期和光栅啾啾,组成种群中的待优化的个体,经过若干代遗传得到最优结果。用实值编码遗传算法实现了对均匀光纤光栅、啾啾光纤光栅和切趾啾啾光纤光栅参数的重构。数值仿真结果表明该方法对光纤光栅的时延特性参数重构十分有效。由斜率为100 ps/nm,最大时延为300 ps,中心波长为1555.2 nm的理想线性时延特性重构出切趾啾啾光纤光栅的参数。此方法可以有效地从时延信息中提取光纤光栅参数,能够应用在利用光纤光栅时延特性的光控相控阵天线设计中。

关键词 光纤光学;参数重构;时延特性;遗传算法;传输矩阵

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Reconstruction of Parameters of Fiber Gratings from Time-Delay Characteristics Using the Genetic Algorithm

MU Ke-jun, ZHOU Xiao-jun, REN Guo-rong,
YANG Jian-jun, ZHOU Jian-hua, LAN Lan

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronics Science and
Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract A new method of parameter reconstruction for fiber gratings from desired time-delay characteristics is presented by genetic algorithm (GA) in conjunction with the transfer matrix method in this paper. The objective function in this method is time-delay of fiber gratings, and the individuals of population are the parameters of fiber gratings, including the grating length, refractive index modulation, grating period and grating chirp. The optimal solution is obtained through many generations calculation. The real-coded genetic algorithm is used for parameter reconstruction of uniform, chirped and apodized fiber gratings. Numerical simulating results show that the method is very effective for parameter reconstruction of fiber gratings according to desired time-delay characteristics. An apodized chirped fiber grating is reconstructed from an ideally linear time-delay characteristics whose slope is 100 ps/nm, maximum time-delay is 300 ps and center wavelength is 1555.2 nm. The method proposed can effectively obtain the parameters of fiber gratings from time-delay figures, and can be applied in the design of optically controlled phased-array antennas based on the time-delay characteristics of fiber gratings.

Key words fiber optics; parameter reconstruction; time-delay characteristics; genetic algorithm; transfer matrix

1 引言

光纤光栅在光纤通信和光纤传感中是极为重要的器件^[1~3]。近年来,光纤光栅也被用在光控相控阵雷达技术中作为光波的时延器件。多个光纤布拉

格光栅(FBG)可组成对多个波长的固定延迟线^[4]。此外,利用啾啾光纤光栅对不同波长反射点不同的特性也可对多个波长产生不同的延迟^[5]。在啾啾光纤光栅上施加适当的调制,还可使不同波长的延迟

收稿日期:2006-09-29;收到修改稿日期:2007-01-05

基金项目:国防预研基金(DZ0242)资助项目。

作者简介:穆柯军(1982—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事光纤光栅理论及应用研究。E-mail:mukejun@sohu.com

导师简介:周晓军(1955—),女,浙江诸暨人,教授,博士生导师,目前主要从事光纤传感与光纤通信、光电器件的数值模拟等方面的研究。E-mail:xjzhou@uestc.edu.cn

可调,提供满足光控相控阵雷达发射单元要求的时延。

要实现光控相控阵雷达的延迟线功能,需要根据系统的时延特性设计特殊性能的啁啾光纤光栅。根据需要设计光纤光栅参数称为光纤光栅参数重构。一些文献已经研究了重构各种光纤光栅参数的方法,例如:信号处理的方法^[6]、模拟退火算法^[7]、遗传算法(GA)^[8]等。这些方法都是从光纤光栅反射谱进行参数重构的。光控相控阵雷达利用各个阵元有不同的时间延迟实现扫描而不使用机械扫描,可以用多个布拉格光栅级联或啁啾光纤光栅作为延迟线。对光控相控阵应用来说,光纤光栅的时延特性十分重要。因此,从时延特性重构所需光纤光栅的参数具有极为重要的意义。本文提出了一种利用遗传算法结合传输矩阵法由时延特性重构光纤光栅参数的方法,并分别对均匀光纤光栅、啁啾光纤光栅和切趾啁啾光纤光栅进行了参数重构,数值模拟的结果表明该方法是可行的。

2 用遗传算法重构光纤光栅参数的方法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。遗传算法具有群体搜索的特点,它将待求解的参数进行编码得到基因个体,然后采用同时处理群体中多个个体的方法寻优,这种同时对搜索空间中的多个解进行评估的方法比其他寻优方法具有更好的全局搜索性能,不易于陷入局部最优,所以用遗传算法作为光纤光栅参数重构问题的寻优方法。它的基本步骤为编码产生初始种群,并从中通过随机选择、交叉和变异操作,产生一群更适应环境的个体,使群体进化向搜索空间的最优值所在区域逼近,这样一代代不断繁衍进化,最后求得问题的最优解。

编码包括二进制编码和实值编码两种方式。Skaar等^[9]用二进制编码方式从光纤光栅反射谱对其参数进行重构。对于高精度、多维的连续函数优化问题,二进制编码表示个体时存在映射误差、不能直接反映问题的结构特征^[10]。本文采用实值编码方式对包含光纤长度、周期、折射率调制和啁啾参数的个体进行编码,以提高运算效率。

作为延迟线光纤光栅的时延特性极为重要。从光纤光栅时延特性重构其参数,以设计符合系统时延要求的光纤光栅。实现方法是,首先将个体的目标函

数定义为

$$F = \sum_{\lambda} (\tau_{\text{obj}} - \tau_{\text{cal}})^2, \quad (1)$$

式中 τ_{obj} 为已知的(需要的)时延, τ_{cal} 为从种群中的某个个体计算出的时延。对随机产生的一组包含 H 个个体初始种群,用(1)式分别计算每个个体的目标函数值。然后对个体的目标值进行适应度评价,将 F 最小化(即使得 τ_{cal} 和 τ_{obj} 之间的差最小)得到的就是具有已知时延特性的光纤光栅的参数,因此目标函数值小的个体对应的适应度就大。再将每个个体的适应度按照从大到小排列,适应度值大的个体被选择的概率大,适应度值小的个体被遗传到下一代种群中的概率较小。实验采用基于降序的适应度分配和随机遍历抽样来进行适应度的排序和个体的选择^[11]。

其次,采用中间重组进行交叉产生新的个体。从群体中选择两个父代 I_1, I_2 按照公式

$$\begin{aligned} O_1 &= I_1 + \alpha_1(I_2 - I_1), \\ O_2 &= I_2 + \alpha_2(I_1 - I_2), \end{aligned} \quad (2)$$

产生两个子代 O_1, O_2 。根据经验,交叉率 $\alpha_i (i = 1, 2)$ 选在区间 $[-0.25, 1.25]$ 内,是随机选择产生的标量因子^[11]。

最后,将个体染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其他等位基因替换,从而形成一个新的个体。采用实值种群的变异(遗传算法育种器的变异算子),变量的变异由变异概率决定。变异概率 P 定义为

$$P = 1/N, \quad (3)$$

N 为每个个体包含的变量数^[11]。

经过选择、交叉、变异以后产生新的种群,将新的种群进行适应度评价,在设定的代数范围内,反复循环,这样就使得群体中个体的适应度值不断接近最优解,最后输出的最优个体就是满足时延特性的光纤光栅的参数。

3 光纤光栅的传输矩阵

遗传算法中各个个体的特性由正反向传输的耦合模方程描述^[12]

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dz} &= -i\hat{\omega}R(z) - ik_{ac}^*S(z), \\ \frac{dS}{dz} &= i\hat{\omega}S(z) + ik_{ac}R(z), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $R(z)$ 和 $S(z)$ 分别表示正向和反向传输模式, k_{ac} 为交流耦合系数, $\hat{\omega}$ 为平均自耦合系数

$$\hat{\omega} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (5)$$

式中 σ 为直流耦合系数, $d\varphi/dz$ 为光栅的啁啾。对于单模布拉格反射光栅

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n, \quad (6)$$

$$k_{ac} = k_{ac}^* = \frac{\pi}{\lambda} \nu \Delta n, \quad (7)$$

式中 Δn 为折射率调制, ν 为光栅条纹可见度。

对于均匀布拉格光栅, 耦合模方程(4)有解析解, 可以直接分析光栅反射谱和时延特性。而对于非均匀光栅, 可以用传输矩阵法进行数值求解: 首先将非均匀光栅等效为 M 段均匀光栅, 然后用一个 2×2 的传输矩阵表征第 i 段光纤光栅的传输特性, 如图 1 所示。非均匀光栅的传输特性可以用 M 段均匀光栅的级联表示, 因此把 M 个矩阵乘起来就可以得到整个光

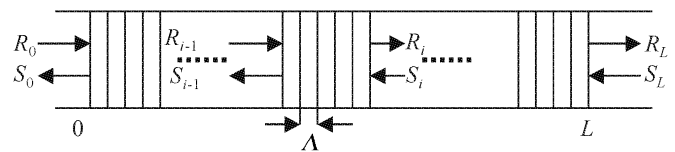


图 1 光纤光栅传输矩阵模型

Fig. 1 Fiber grating transfer matrix model

栅的传输方程。

图 1 中 R_i 和 S_i 表示通过第 i 段光纤光栅的前向波和后向波的振幅。 F_i 表示第 i 段光纤光栅传输特性的 2×2 的矩阵, R_i, S_i 可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

对于反射式光纤光栅^[13]

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{k_{ac}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{k_{ac}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\gamma_B = \sqrt{k_{ac}^2 - \hat{\sigma}^2}, \quad (10)$$

式中 $k_{ac}, \hat{\sigma}, \gamma_B$ 分别为在第 i 段均匀光栅中的值, Δz 为第 i 段光栅的长度。整个光栅的传输方程为

$$\begin{bmatrix} R_L \\ S_L \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $F = F_M \cdot F_{M-1} \cdots F_i \cdots F_1$ 。由(11)式, 可以得出光栅反射系数

$$\rho = \frac{S_L}{R_L}, \quad (12)$$

根据反射系数的相位 $\theta \equiv \text{phase}(\rho)$ 可求得光纤光栅的时延

$$\tau = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda}, \quad (13)$$

c 为光在真空中的速度。

需要注意的是, 把长度为 L 的光纤光栅分为 M 段, M 的大小必须折中选择。 M 越大, 对每一段非均匀光栅来说, 近似为均匀光栅的程度越高。但 M 的取值不能无限大, 因为当均匀光栅段包含的空间周期个数太少时, 耦合模理论失效。因此每一段光栅长度应满足 $\Delta z \gg \Lambda$, 即

$$M \ll \frac{2n_{\text{eff}} L}{\lambda_D}, \quad (14)$$

式中 n_{eff} 为光纤光栅有效折射率, λ_D 为对应于光栅周期 Λ 的反射波长。

4 光纤光栅参数的重构

遗传算法的运行参数设定为: 初始种群包含 40 个个体, 进化代数 200 代。增加个体数量与进化代数会使优化结果更加精确, 但是会大大增加计算时间, 折中选择了计算精度与计算时间后, 设定了以上两个运行参数。对交叉的每一对个体在区间 $[-0.25, 1.25]$ 内随机产生新的交叉率 α_i 。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 , $N = 3$, 变异率为 $P = 1/3$; 啁啾光纤光栅包含的变量为: 啁啾系数 C , $N = 4$, 变异率为 $P = 1/4$ 。以已知光纤光栅产生的时延作为目标函数中的 τ_{obj} , 分别对均匀光纤光栅、啁啾光纤光栅、切趾啁啾光纤光栅进行了参数重构。参数重构结果如表 1~表 3 所示, 由已知参数的光纤光栅产生的时延曲线和反射谱与遗传算法重构出的光纤光栅产生的时延曲线和反射谱如图 2~图 4 所示。

表 1 均匀光纤布拉格光栅的参数遗传算法重构结果

Table 1 GA reconstruction result of uniform fiber Bragg grating

Parameter	L / mm	Λ / nm	Δn
Real	10	535.5909	0.0001
Reconstructed	9.9989	535.59	0.000099315
Error	0.011%	$1.64 \times 10^{-4} \%$	0.69%

表 2 啾啾光纤光栅的参数遗传算法重构结果

Table 2 GA reconstruction result of chirped fiber grating

Parameter	L / mm	Λ / nm	Δn	$C / (\text{nm}/\text{cm})$
Real	10	535.5909	0.0004	2
Reconstructed	10.029	535.57	0.0004338	2.0232
Error	0.29%	$3.9 \times 10^{-3} \%$	8.45%	1.16%

表 3 切趾啾啾光纤光栅的参数遗传算法重构结果

Table 3 GA reconstruction result of apodized chirped gratings

Parameter	L / mm	Λ / nm	Δn	$C / (\text{nm}/\text{cm})$
Real	10	535.5909	0.0004	2
Reconstructed	9.9964	535.59	0.00038074	2.0284
Error	0.036%	$1.64 \times 10^{-4} \%$	4.82%	1.42%

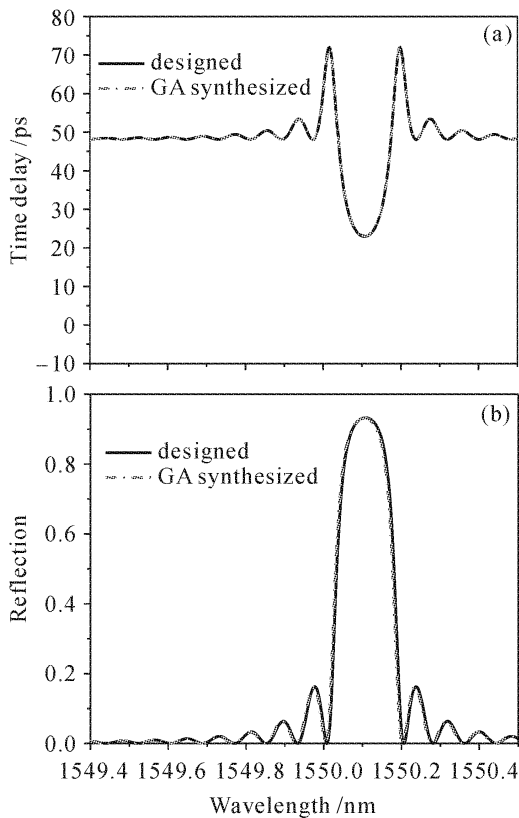


图 2 均匀光纤布拉格光栅参数重构

(a) 时延曲线; (b) 反射谱

Fig. 2 Parameter reconstruction of uniform fiber Bragg grating

(a) time delay; (b) reflection

对于均匀光纤光栅(表 1), 重构结果与已知的参数几乎相同, 三个参数的误差均小于 1%。图 2 显示的曲线也表明重构的时延和反射谱与已知的基本重合。对于啾啾光纤光栅(表 2), 折射率调制 Δn 的误差较大, 可达 8.45%。这是因为对于啾啾光纤光栅, 折射率调制 Δn 对其反射率的影响较大, 而对时延曲线的影响较小, 当以时延作为目标函数中的 τ_{obj} 时, 较小

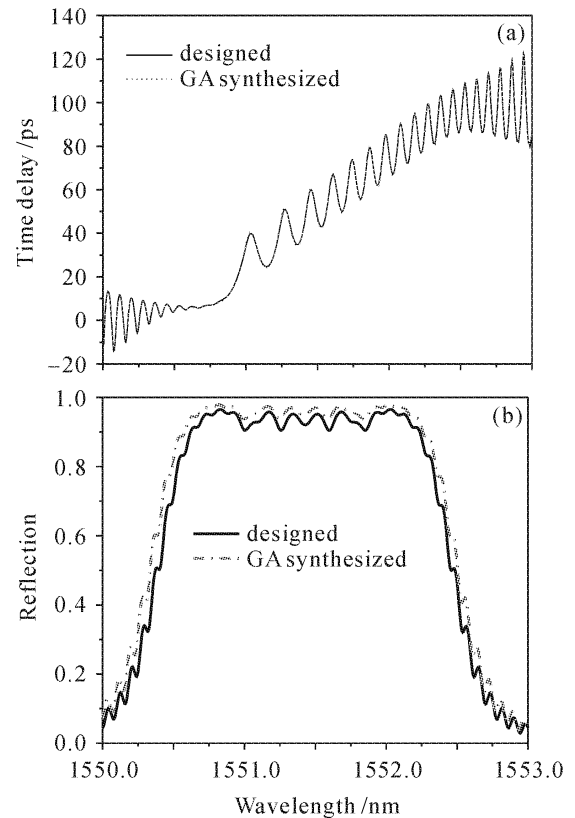


图 3 啾啾光纤光栅参数重构

(a) 时延曲线; (b) 反射谱

Fig. 3 Parameter reconstruction of chirped fiber grating

(a) time delay; (b) reflection

的时延误差可能会引入较大的折射率调制 Δn 的误差, 从图 3(a)看出虽然重构的时延曲线与已知的重合较好, 但图 3(b)反射谱上反射率有较大的差异。

为了抑制反射谱的旁瓣, 获得较高的旁瓣抑制比, 通常采用切趾啾啾光纤光栅^[14], 切趾啾啾光纤光栅不但可以抑制反射谱的旁瓣, 在时延特性上也可减小线性时延的抖动, 因此也对切趾啾啾光纤光栅进行参数重构, 采用 $\alpha = 16$ 的高斯切趾函数

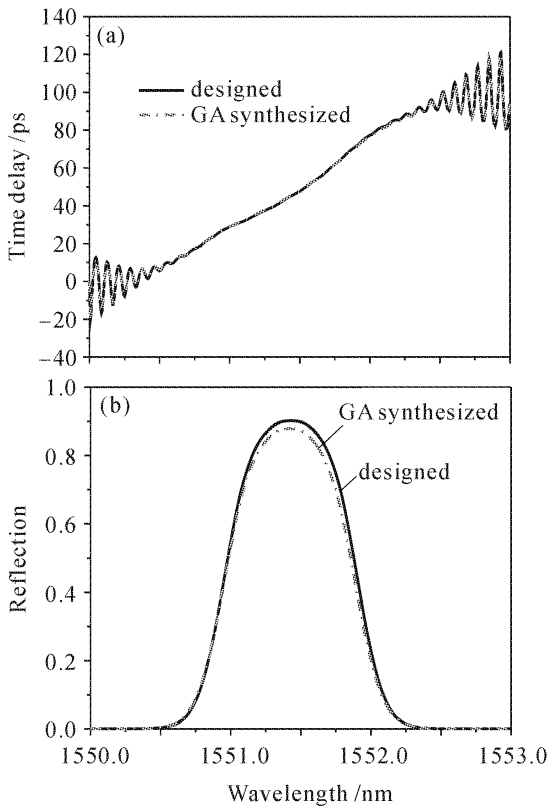


图 4 切趾啁啾光纤光栅参数重构

(a) 时延曲线; (b) 反射谱

Fig. 4 Parameter reconstruction of apodized chirped gratings

(a) time delay; (b) reflection

$$f(z) = \exp\left[-\alpha\left(\frac{z-L/2}{L}\right)^2\right], \quad (15)$$

从表 3 与图 4 可以看出,切趾光纤光栅的时延抖动得到有效抑制,参数重构结果也优于未切趾的啁啾光纤光栅。

为了在光控相控阵中设计波长寻址的啁啾光纤光栅延迟线,对中心波长为 1555.2 nm,最大时延为

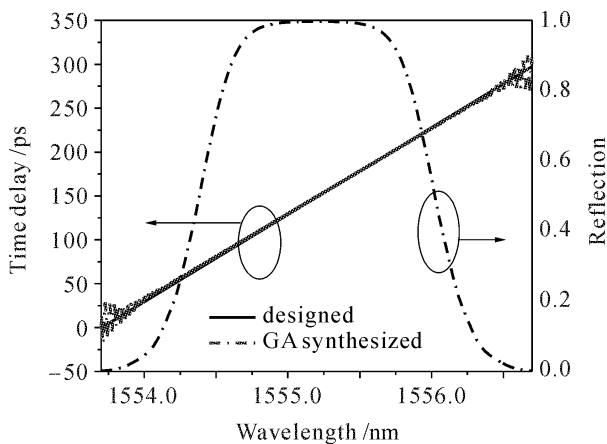


图 5 需要的时延曲线和遗传算法重构的时延曲线

Fig. 5 Desired time delay and calculated time delay using GA method

300 ps,时延斜率为 100 ps/nm 的理想线性时延曲线(图 5 中实线),采用 $\alpha = 16$ 的高斯切趾进行了参数重构,得到的结果为: $L = 30.94$ mm, $\Delta n = 0.00043$, $\Lambda = 535.59$ nm, $C = 0.99$ nm/cm。图 5 中虚线是遗传算法重构的光纤光栅产生的时延曲线以及根据重构出的参数绘出的反射谱。

由图 5 可知,重构的反射谱 3 dB 带宽为 1.64 nm (1554.384~1556.022 nm),在 3 dB 带宽内重构的与设计时的延是重合的。

5 实验结果与分析

按照以上方法,设计了一个用于延迟线的啁啾光纤光栅,其谱宽为 30 nm,起始波长为 1530.2 nm,时延斜率为 10 ps/nm,重构的光栅参数为: $L = 33$ mm, $\Delta n = 0.0004$, $\Lambda = 527.67$ nm, $C = 9$ nm/cm。由合肥正阳光电有限公司制作出的光纤光栅参数为: $L = 33$ mm, $C = 9.51$ nm/cm,起始波长为 1530.25 nm,终止波长为 1561.62 nm,带宽为 31.37 nm。用光谱仪与宽带光源测得的光纤光栅反射谱与重构的反射谱如图 6 所示。图 6(b)是重构的时延曲线。由图可知反射谱带宽基本相同,在带宽内反射率稍有差异,这是由于在实际制作过程中由于模板

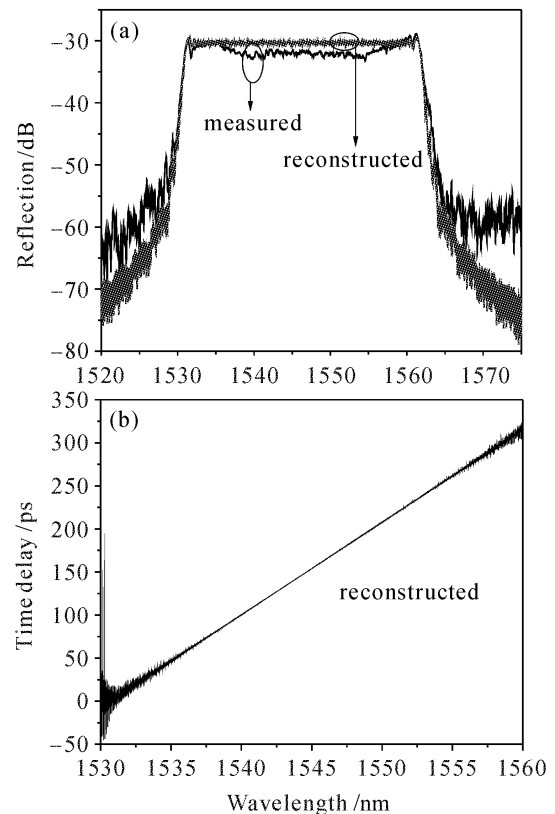


图 6 实测反射谱与重构反射谱(a)和重构的时延曲线(b)

Fig. 6 Reflection of measured and reconstructed (a) and calculated time delay using GA method (b)

的误差等因素造成的。

用单工作波长为 1551 nm 的激光器作光源,用网络分析仪测得系统时延为 97.2457 ns,然后用压电陶瓷拉伸啁啾光纤光栅使其反射谱平移了 1 nm 以后,测得此时系统时延为 97.2554 ns,该波长处的时延变化量为 9.7 ps,与理论上 10 ps 的时延变化基本一致。

6 结 论

以光纤光栅的参数作为计算个体,设计的时延曲线作为目标函数,利用遗传算法,重构出满足目标函数的最优个体,即能够产生所需时延的光纤光栅的参数。分别对已知参数的均匀光纤光栅,啁啾光纤光栅和切趾啁啾光纤光栅进行参数重构,计算结果表明该方法对均匀光纤光栅的参数重构精度高,速度快,结果准确。对于啁啾光纤光栅和切趾啁啾光纤光栅,折射率调制参数误差略大。由于参数重构的基础是时延曲线,而不是反射谱,所以重构的时延曲线与需要的时延曲线重合得很好。以中心波长为 1555.2 nm,最大时延为 300 ps,时延斜率为 100 ps/nm 的线性时延为目标,重构出满足要求的啁啾光纤光栅的参数。最后,设计了一个谱宽为 30 nm,起始波长 1530.2 nm,时延斜率 10 ps/nm 的啁啾光纤光栅,将重构的啁啾光纤光栅与实际光纤光栅比较,实验结果证明参数重构方法可以应用于利用光纤光栅延迟线的系统设计。

参 考 文 献

- Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):631~635
饶云江,周昌学,冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):631~635
- Zhongwei Tan, Yan Liu, Yong Chen *et al.*. 8×10 -Gb/s transmission system over 1500 km on G. 652 fiber dispersion compensated by chirped fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8):441~443
- Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):326~330
徐艳平,顾铮,陈家璧等. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):326~330
- D. T. K. Tong, M. C. Wu. Programmable dispersion matrix using Bragg fibre grating for optically controlled phased array antennas [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(17):1532~1533
- Yunqi Liu, Jianliang Yang, Jianping Yao. Continuous true-time-delay beamforming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8):1172~1174
- Chen Cong, Zhou Jun, Gong Shenguang. Phase reconstruction of fibre gratings based on Kolmogoroff method [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(2):160~164
陈聪,周骏,龚沈光. 基于 Kolmogoroff 方法重构光纤光栅相位响应[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(2):160~164
- 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**:303~308
- H. C. Cheng, Y. L. Lo. The synthesis of multiple parameters of arbitrary FBGs via a genetic algorithm and two thermally modulated intensity spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6):2158~2168
- 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
- Zhou Ming, Sun Shudong. Genetic Algorithms: Theory and Applications [M]. The 2nd edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 36~37
周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 第2版. 北京:国防工业出版社, 2000. 36~37
- Lei Yingjie, Zhang Shanwen. Matlab Genetic Algorithm Table and Applications [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. 62
雷英杰,张善文. 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. 62
- Ramman Kashyap. Fiber Bragg Gratings [M]. America: Academic Press, 1999. 143
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- Huang Wen, Han Yishi, He Sailing. A study on the optimal apertization function for a fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(12):1247~1250
黄雯,韩一石,何赛灵. 光纤光栅最佳切趾函数的研究[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(12):1247~1250