

文章编号:1004-4213(2011)04-0505-4

# 重构多信道光纤光栅的改进离散层析算法

柏青<sup>1</sup>,冯德军<sup>1,2</sup>

(1 山东大学 信息科学与工程学院,济南 250100)

(2 山东省半导体光电子工程技术研究中心,济南 250100)

**摘 要:**对重构多信道光纤光栅的离散层析算法进行了优化.在各信道加入相移的基础上,运用非线性最小二乘法对耦合系数进行高斯曲线拟合,降低了折射率调制深度的最大值且可以将剧烈变化的折射率调制深度平滑化.仿真表明,较之改进前的折射率调制最大值(0.0013),利用新算法在折射率调制最大值为 0.0005 时成功设计了一个 8 信道光纤光栅,极大地降低了对光纤光敏性的要求.同时,折射率调制曲线的平滑化降低了光栅的实际刻写难度.

**关键词:**离散层析算法;折射率调制;耦合系数;多信道光纤光栅

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114004.0505

## 0 引言

近年来,多信道光纤光栅以其强大的滤波性能和在密集波分复用(Dense Wave Division Multiplexing, DWDM)系统中的色散补偿性能,得到了人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>.其中,多信道光纤光栅的设计<sup>[3]</sup>、重构成为人们研究的热点之一.光栅的重构方法主要分为:傅里叶变换法<sup>[4]</sup>、解耦合 GLM 方程法<sup>[5]</sup>、信号分析法<sup>[6-7]</sup>、层析算法<sup>[8]</sup>等.离散层析(Discrete Layer-peeling, DLP)算法是层析算法的一种,它具有准确度高速度快的优点<sup>[9]</sup>,在解决光栅重构问题时应用比较广泛.然而,对于多信道光纤光栅的重构,离散层析算法却对光纤的光敏性以及机械的准确度等都有着很高的要求,较难实现.

本文在研究了耦合系数的变化对重构光栅反射谱影响的基础上,提出了一种基于离散层析算法的多信道光纤光栅重构的新算法.新算法分为三步:第一步,在各信道加入相移的基础上,运用离散层析算法得到耦合系数;第二步,用非线性最小二乘法对耦合系数进行高斯拟合;第三步,通过调整耦合系数对最终得到的反射谱进行调整,使其符合设计要求.运用该算法,不但使折射率调制深度的最大值减小到约为原来的  $1/\sqrt{N}$ ,而且折射率调制深度沿光栅长度方向上的剧烈振荡现象也得到了很好的抑制,降低了在制作光栅时对光纤光敏性的要求和刻写系统

的机械定位准确度要求.

## 1 离散层析算法基本理论

离散层析算法是基于离散的光栅模型,即前、后向传输光的耦合被认为是在离散的反射点瞬间完成的,而其他地方只有相移;并且当光栅分段数足够多时,每一段的光栅都可以看作是均匀光栅.根据耦合模理论,可以得到光栅的复反射系数  $\rho$ 、耦合系数  $q$ 、以及各段光栅反射系数  $r$  之间的关系式<sup>[9]</sup>.

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

$$q_j = -\frac{\operatorname{arctanh}(|\rho_j|)\rho_j^* A}{|\rho_j|} \quad (2)$$

$$r_{j+1}(\delta) = \exp(-i2\delta A) \frac{r_j - \rho_j}{1 - \rho_j^* r_j(\delta)} \quad (3)$$

$$q_j = \frac{\pi \Delta n_{0j}}{\lambda} \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2} + \theta_j\right)\right] \quad (4)$$

式中  $j$  为第  $j$  段光栅;  $M$  为光波长计算范围内的采样数量;  $A$  为所分割的每小段光栅长度;  $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B}\right)$  为布喇格波长的失谐量;  $\beta$  为传播常量;  $\Lambda$  为光栅周期;  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率;  $\lambda$  为光波波长;  $\lambda_B$  为布喇格光栅的设计波长;  $\Delta n_{0j}$  为光栅的折射率调制深度;  $\theta_j$  为沿光栅长度方向的相位变化.

基金项目: 山东自然科学基金(No. Q2007G03)和山东大学自主创新基金(No. 2010TS014)资助

第一作者: 柏青(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅及光纤传感器. Email: bbs4750@hotmail.com

导师(通讯作者): 冯德军(1973-),男,副教授,博士后,主要研究方向为光纤传感器、光纤放大器及全息光栅. Email: dejunfeng@sdu.edu.cn

收稿日期: 2010-11-22; 修回日期: 2010-12-10

式(3)表述了每段光栅反射系数的迭代公式,其初始值  $r_1$  为物理可实现的目标光谱反射系数. 在给定光栅的设计要求谱与光栅长度前提下,通过式(1)~(3)的迭代可以得到每段光栅的耦合系数  $q_j$ , 然后通过式(4)得到光栅的折射率调制深度  $\Delta n_0$ . 随光栅长度的变化,之后就可以通过相位掩膜技术来制作所需的光纤光栅. 例如,要求设计一个八信道的梳状滤波器,其峰值反射率 0.92,  $-3$  dB 带宽 0.2 nm,  $-30$  dB 带宽 0.3 nm, 信道间隔 0.8 nm(100 GHz). 根据要求,可以将其理想谱用超高斯函数形式表示为

$$r(\delta) = \sqrt{0.92} \sum_{k=1}^8 \exp \left\{ - \left[ 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_k} \right) / 465 \right]^6 \right\}$$

式中,  $\lambda_k = (1546 + 0.8k) \text{ nm}$  为第  $k$  个信道的中心波长. 在此取光栅长度 10 cm, 用离散层析算法进行重构可以得到其折射率调制深度沿光栅长度方向的变化情况以及重构光栅的反射谱,如图 1.

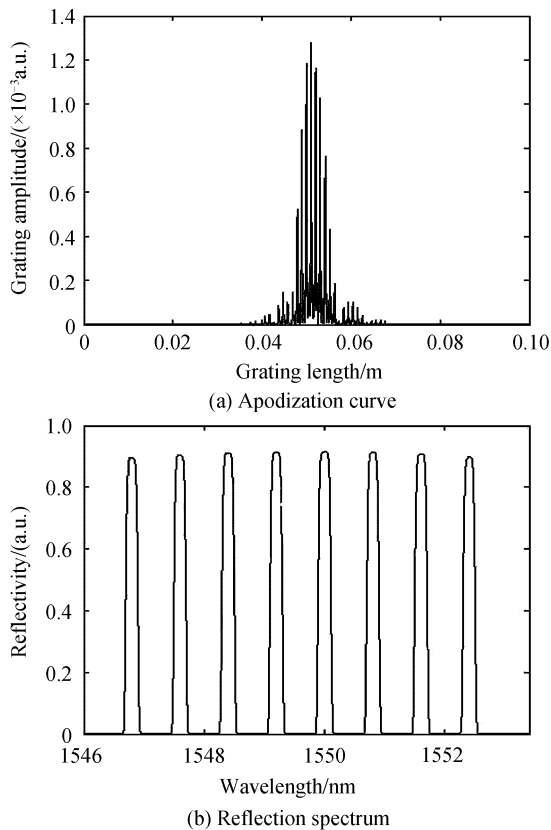


图 1 基于离散层析算法的 8 信道光纤光栅滤波器  
Fig. 1 Eight-channel FBG filter based on discrete layer-peeling method

可见,重构光栅的反射谱各信道比较均匀,反射率与带宽能够达到设计要求. 但其折射率调制深度的最大值比较大,约为  $1.3 \times 10^{-3}$ ; 且幅度上存在剧烈震荡.

## 2 耦合系数对光栅重构谱的影响

由于耦合系数  $q$  的计算是光栅重构的关键,  $q$  的模与相位直接对应着所设计光栅折射率调制深度的模与相位变化. 同时  $q$  的相位可以通过相位掩膜技术写入光栅,在此只考虑  $q$  模的变化对重构光栅反射谱的影响. 分别取  $q$  模值为原值的 1 倍、0.6 倍和 1.2 倍,得到的重构光栅反射谱如图 2. 可见,在整体改变  $q$  模值的时候,光栅反射谱在整个光波长范围内并没有产生新的信道以及信道间的干扰,只是各信道出现幅度和带宽上的变化,并且这种变化呈现一种正比的关系. 因此可以通过对  $|q|$  的调整来调整重构光栅各信道反射谱的幅度和带宽.

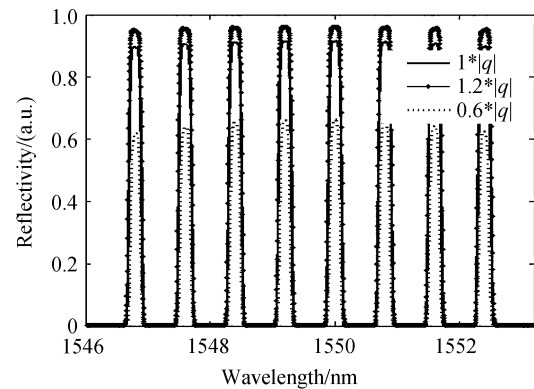
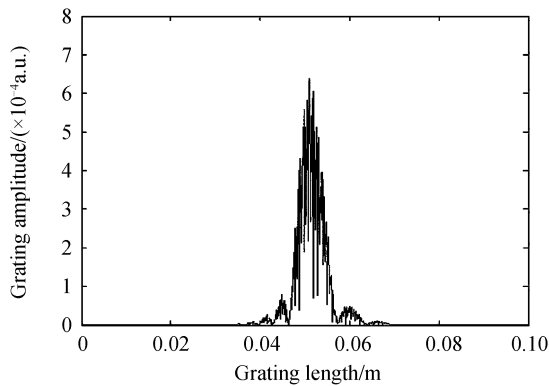


图 2  $|q|$  与重构光栅反射谱的关系  
Fig. 2 Relationship between  $|q|$  and reflection spectrum

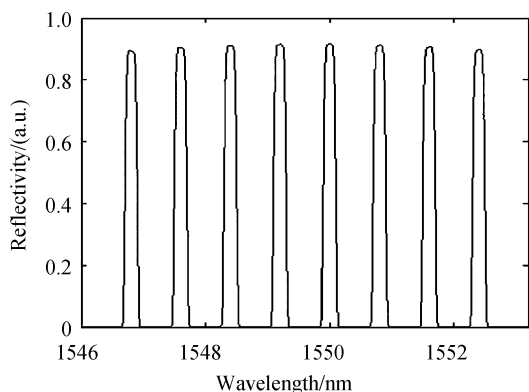
## 3 对离散层析算法的改进

离散层析算法效率高、速度快,但是在设计多信道光纤光栅时,得到的折射率调制深度最大值比较大,而且存在剧烈振荡,在实际应用中较难以实现. Hongpu Li<sup>[10]</sup> 与邓芳<sup>[11]</sup> 等人分别运用模拟退火 (Simulated Annealing Algorithm, SAA) 算法以及遗传 (Genetic Algorithm, GA) 算法,在设计光栅过程中通过在各信道引入相移,使得折射率调制深度约变为原来的  $1/\sqrt{N}$ , ( $N$  为设计光栅的信道数目). 根据他们的方法在上例中各信道引入相移量 ( $0, 2\pi/3, -3\pi/4, \pi/4, -\pi/2, -3\pi/4, -\pi/2, -\pi/2$ ),可以得到新的折射率调制深度和重构光栅的反射谱(图 3).

比较图 1(b)和图 3(b)可以看到:各信道加入相移后,光纤光栅反射谱跟不加相时光栅的反射谱谱型差别不大;但如图 3(a),其折射率调制深度最大值变小为  $6 \times 10^{-4}$ ,在光栅制作时对种子光纤的光敏性要求变低、更容易实现.



(a) Apodization curve



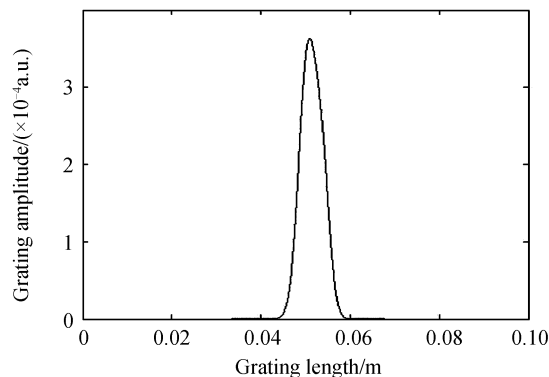
(b) Reflection spectrum

图3 离散层析算法各信道中加入相移量( $0, 2\pi/3, -3\pi/4, \pi/4, -\pi/2, -3\pi/4, -\pi/2, -\pi/2$ )之后的8信道光纤光栅滤波器

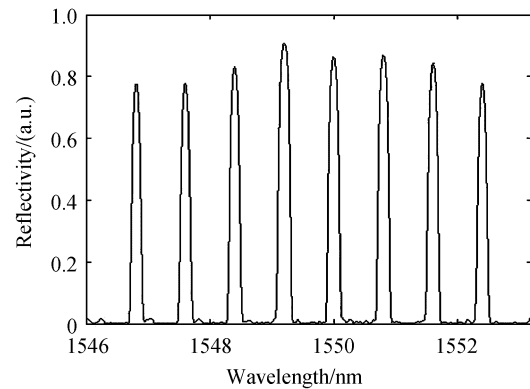
Fig. 3 Eight-channel FBG filter based on discrete layer-peeling method with channel phase changes ( $0, 2\pi/3, -3\pi/4, \pi/4, -\pi/2, -3\pi/4, -\pi/2, -\pi/2$ )

然而可以看到,其折射率调制深度在幅度上还是存在明显的振荡,为了减小这种振荡,在上述基础上,采用非线性最小二乘法对重构光栅的耦合系数  $q$  模值进行高斯拟合.拟合后的折射率调制深度和以此重构的光栅反射谱如图4.

图4中,经过拟合后,光纤光栅的折射率调制深度变的平滑且其最大值进一步降低为  $3.6 \times 10^{-4}$ ;各信道基本保持原来谱型.但是拟合后的反射谱各信道峰值反射率降低,带宽变窄.这是因为拟合改变了折射率调制深度,使得光栅变弱所致,在保证折射



(a) Apodization curve

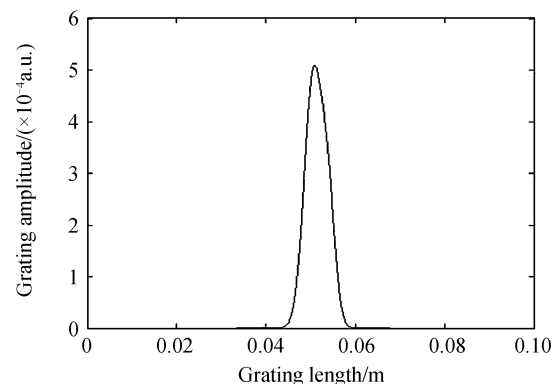


(b) Reflection spectrum

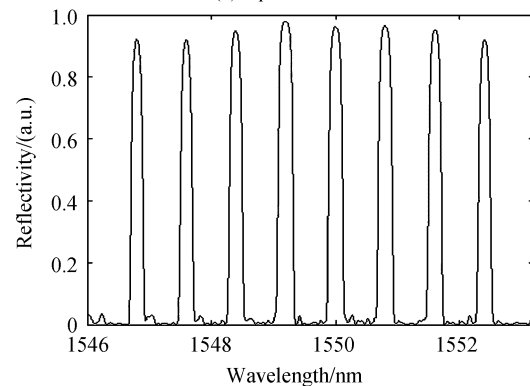
图4 对耦合系数进行高斯拟合后的8信道光纤光栅滤波器  
Fig. 4 Eight-channel FBG filter with the Gaussian fitting of  $|q|$

率调制深度足够小的情况下,可以适当增大耦合系数的值,来增加光栅各信道的峰值反射率.

图5为耦合系数增大为原来1.4倍后所得的光栅折射率调制深度(a)与重构光栅的反射谱(b).由此方法得到的光栅,其反射谱达到了设计要求,但是折射率调制深度平滑且最大值只有  $5.0 \times 10^{-4}$ ,比图1(a)用离散层析算法得到的折射率调制深度 ( $1.3 \times 10^{-3}$ )有了很大改善.



(a) Apodization curve



(b) Reflection spectrum

图5 对耦合系数进行调整后的8信道光纤光栅滤波器  
Fig. 5 Eight-channel FBG filter with the revised  $|q|$

## 4 结论

本文提出了一种改进的重构多信道光纤光栅的

新算法. 通过实例设计, 对比了新算法与离散层析算法的优势. 新算法不但将多信道光纤光栅设计时所需的折射率调制深度的最大值约降低为原来的  $1/\sqrt{N}$ , 而且对折射率调制深度沿光栅长度方向上的剧烈振荡进行了平滑. 通过这样设计的多信道光纤光栅在实际制作过程中对材料以及设备的要求都有了很大程度的降低, 更有利于制作应用.

#### 参考文献

- [1] DONG Xin-yong, LI Lan, SHUM Ping, *et al.* Hybrid fiber grating-based optical comb filters with changeable channel numbers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 234-242.  
董新永, 李岚, 沈平, 等. 一种通道数可变的光纤光栅梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 234-242.
- [2] CHEN Jin-lin, SUN Jun-qiang, XIA Li, *et al.* A phase-shifted chirped fiber Bragg grating with dual-wavelength transmission[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1776-1779.  
陈金林, 孙军强, 夏利, 等. 双波长啁啾相移光纤光栅[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1776-1779.
- [3] WU Qiang, YU Chong-xin, WANG Kui-ru, *et al.* Research of chirped-sinc-sampled fiber Bragg gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 404-408.  
吴强, 余重秀, 王葵如, 等. 啁啾 sinc 取样光纤光栅研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 404-408.
- [4] KIM A W, JOSE E R. Design of corrugated waveguide filters by Fourier-Transform techniques [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, **26**(11): 1918-1929.
- [5] EVA P, JOSE C, JAVIER M. Iterative solution to the Gel'fan-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(12): 2078-2084.
- [6] MIGUEL A M, JOSE A, ALEJANDRO C. Time-frequency representation applied to fiber gratings synthesis[J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(12): 1526-1528.
- [7] JOSE A, MIGUEL A M, LAWRENCE R C. Fiber Bragg grating period reconstruction using Time-Frequency signal analysis and application to distributed sensing[J]. *IEEE/OSA J Lightwave Technol*, 2001, **19**(5): 646-654.
- [8] RICARDO F, MICHALIS N Z, MURIEL A M. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, **35**(8): 1105-1115.
- [9] JOHANNES S, WANG L G, TURAN E. On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, **37**(2): 165-173.
- [10] LI Hong-pu, SHENG Yun-long. Direct design of multi-channel fiber Bragg grating with discrete layer peeling algorithm[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(9): 1252-1254.
- [11] DENG Fang, YU Zhen-hong, GAO Zhi-peng, *et al.* A hybrid design method for multi-channel fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(5): 630-633.  
邓芳, 余震虹, 高志鹏, 等. 一种重构多信道布喇格光栅的混杂算法[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(5): 630-633.

## Improved Discrete Layer-peeling Method for the Reconfiguration of Multi-channel Fiber Bragg Grating

BAI Qing<sup>1</sup>, FENG De-jun<sup>1,2</sup>

(1 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

(2 Semiconductor Optoelectronics Engineering Technology Center of Shandong Province, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The discrete layer-peeling method for designing multi-channel fiber Bragg grating was optimized. Through the new method, after inserting different phase changes at different channels, the coupling coefficients was then fitted by Gaussian function to get a lower and more smooth refractive index modulation. The simulation results show that a 8-channel fiber Bragg grating is successfully designed using the proposed method with the maximum refractive index modulation of 0.000 5, much lower than that of traditional DLP method (0.001 3), which decreases the requirement of fiber's optical sensitivity. And, the difficulty of inscribing a fiber grating was reduced by smoothing the refractive index modulation.

**Key words:** Discrete Layer-peeling method; Refractive index modulation; Coupling coefficient; Multi-channel fiber Bragg grating