文章编号:1002-2082(2010)03-0418-05

一种FBG重构算法及其应用

李海兰，张兴娇，叶志清
（江西师范大学 物理通信与电子学院，江西 南昌 330022）

摘 要:从耦合模理论和传输矩阵方法出发,介绍了一种设计复杂光纤光栅的有效的简单方法。该方法只考虑光栅内部的一级反射，发现滤波器的反射谱和FBG的耦合函数间存在近似的傅里叶变换关系，能简单快速地对弱反射光栅进行设计。该方法的有效性通过设计光纤通信系统中常用的两种色散补偿器得以体现：第一种色散补偿器的色散值在3 dB带宽内恒为17 ps/nm，另一种则为具有线性色散斜率的色散补偿器。数值仿真结果表明：此方法可以有效地从反射信息中提取光纤光栅参数，能够应用在利用光纤光栅反射特性的复杂滤波器的设计中。

关键词：光纤光学；重构算法；FBG；反射特性；色散补偿器
中图分类号：TN253 **文献标志码**：A

New FBG synthesis algorithm and its application

LI Hai-lan, ZHANG Xing-jiao, YE Zhi-qing
(Institute of Physics and Communication & Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: The approach of inferring the grating profile from its reflection spectrum is referred to as fiber Bragg grating (FBG) synthesis algorithm. Synthesis of FBG is of great significance for the design of special FBG to have desired characteristics. A simple and efficient method based on the coupled-mode theory and transfer matrix method for the design of complex FBG was proposed. The method takes into account only the first reflection, exploiting the approximate Fourier transform relation that exists between the filter spectral response and the coupling function. Its low algorithmic complexity enables the fast synthesis of weak reflection FBG. The method is illustrated by designing two types of dispersion compensators for the applications of optical fiber communication systems, constant dispersion coefficient with 17 ps/nm in its 3dB passband and linear dispersion slope coefficient compensators. Numerical simulation results show that the method is very effective for parameter reconstruction of fiber gratings according to desired reflectivity characteristics and can be applied in the design of complex filter based on the reflectivity characteristics of fiber gratings.

Key words: fiber optics; synthesis algorithm; FBG; reflective characteristics; dispersion compensator

引言

色散补偿技术是未来高速、大容量、长距离光纤通信系统中必不可少的重要技术。布拉格光纤光栅具有体积小、成本低、与光纤系统兼容性很好、插

收稿日期:2009-10-02； **修回日期**:2010-01-23
基金项目:国家自然科学基金(60967002)
作者简介:李海兰(1986－),女,江西吉安人,硕士研究生,主要从事光纤光栅及其应用的研究工作。
E-mail:lihailan0727@sina.com

入损耗低以及光学性能优越等特点,利用它制作的光学器件在光纤传感[1]和光纤通信领域发挥着越来越重要的作用,其优异性能决定了它可做波分复用系统的色散补偿器[2]。长期以来,人们提出了很多基于FBG的光信号处理器件,主要是利用耦合模理论根据光栅的结构来获得和调整反射谱、时延和色散等性质。从光栅结构出发研究光栅性质的过程称为光栅分析,这方面的技术已经相当成熟。光纤光栅分析过程中需要通过不断调整光纤光栅结构参数来获得满足实际要求的光学特性,效率较低,而对于某些实际要求复杂的反射谱和时延色散特性的FBG,设计相当困难甚至无法满足。然而,从已知的反射特性或时延特性来逆向推断光栅结构可以解决这方面的难题,该种方法被称为光栅重构。光纤光栅重构无疑成为这一领域的重要方法,它给出了从FBG复杂反射响应或时延特性等性质出发获得相应的FBG的结构的基本思路,对光栅制作的实际应用具有重要意义。因此,光栅重构成为这一领域的研究热点。

一些文献已经研究了重构各种光纤光栅参数的算法,例如遗传算法(GA)[3]、信号处理算法[4]、模拟退火算法[5]等。但是,这些方法的不足之处在于它们的计算效率偏低,需要反复迭代,寻求最优解。本文将从耦合模理论和传输矩阵方法出发介绍一种最简单的光纤光栅重构算法。该方法只要通过一次傅里叶变换,就可以找到与光栅反射特性相对应的光栅结构参数,计算效率非常高,而且在一定条件下也很精确。应用此方法设计了一种色散为恒定值和另一具有一定色散斜率的色散补偿器。理论上表明,利用此方法甚至可以设计满足任何长距离光纤通信系统实际需求的光纤光栅色散补偿器。

1 FBG重构算法

光纤光栅是根据光纤的光敏特性,用光强随空间周期变化的紫外光照射光纤形成的光波导器件。图1是FBG的一个示意图。

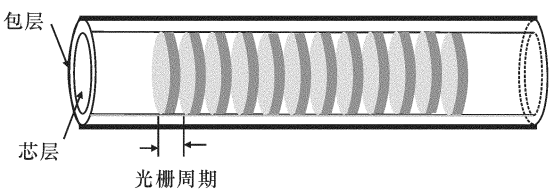

图1 光纤光栅示意图

Fig. 1 The schematic plot of FBG

紫外曝光使得被曝光部分(图中的灰色区域)的光纤折射率变大。下面称FBG中折射率起伏为折射率调制,起伏的周期称为折射率调制的周期,用Λ表示。通常,紫外曝光导致的这种折射率起伏$\Delta n(z)$非常小($\leqslant 10^{-3}$),可以看成是对研究的光纤有效折射率n_{eff}的一种微扰,即$n(z)=n_{\text{eff}}+\Delta n(z)$,且$\Delta n(z)$远小于$n_{\text{eff}}$,于是有:

$$\Delta n(z) = Dc(z) + \sum_k \left[\frac{1}{2}Ac_k(z)\exp[(\mathrm{j}2k\pi z/\Lambda) + c.c\right] \tag{1}$$

式中:Dc(实数,因为折射率是实数)和Ac(复数,幅角表示相位)分别称为折射率调制的直流部分和交流部分;Λ为平均光栅周期。

普通的单模布拉格光纤光栅,模式耦合发生在传输方向相反的模式间。设$R(z)$和$S(z)$分别表示前向、后向传输模的复振幅,则CMT方程可以表示为

$$\begin{bmatrix}R\\S\end{bmatrix}' = -\mathrm{j}\begin{bmatrix}\sigma & \kappa^*\\ -\kappa & -\sigma\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R\\S\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中:

$$\sigma(z) = \Delta\beta + \frac{2\pi}{\lambda}Dc(z) = \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} + \frac{2\pi}{\lambda}Dc(z)$$

$$\kappa(z) = \frac{\pi}{2n_{\text{eff}}\Lambda}Ac(z) = \frac{\pi}{2n_{\text{eff}}\Lambda}T(z)\delta n(z)\exp[\varphi(z)] \tag{3}$$

式中:σ和κ分别称为FBG的直流失谐量和交流耦合系数;$T(z)$为切趾函数;$\delta n(z)$为调制深度;$\varphi(z)$为相位调制;Λ为FBG布拉格中心波长对应的光栅周期;上式中为了简单,记$Ac1$为Ac。

利用传输矩阵方法,可以将(2)式变为

$$\begin{bmatrix}R(L)\\S(L)\end{bmatrix} = F\begin{bmatrix}R(0)\\S(0)\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中F为二维传输矩阵。对于均匀光栅,每个光栅周期的2×2传输矩阵都是一样的。对非均匀光栅,每段光栅i的传输特性可用传输矩阵F_i来描述,表示为

$$F_i = \begin{bmatrix}\cosh(\mathrm{j}\gamma z) - \frac{\sigma}{\gamma}\sinh(\mathrm{j}\gamma z) & \frac{\kappa^*}{\gamma}\sinh(\mathrm{j}\gamma z)\\ \frac{\kappa}{\gamma}\sinh(\mathrm{j}\gamma z) & \cosh(\mathrm{j}\gamma z) + \mathrm{j}\frac{\sigma}{\gamma}\sinh(\mathrm{j}\gamma z)\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:$i=1,2,\cdots,M-1,M$;$F=F_MF_{M-1}\cdots F_2F_1$;

$\gamma^2 = \sigma^2 - |\kappa|^2$;$z \in [0,L]$ 表示每小段光栅的位置。一般我们比较关心FBG对入射光的辐射率,定义反射率:

$$\rho(z) = S(z)/R(z) \tag{6}$$

由CMT方程(2)可得:

$$\rho' = \mathrm{j}\kappa^* \rho^2 + 2\mathrm{j}\sigma\rho + \mathrm{j}\kappa \tag{7}$$

该方程一般无法解析求解。但是如果FBG满足弱反射条件,则可以忽略上式中的 ρ^2[6]。利用其边界条件是 $\rho(L) = 0$。解这个微分方程,有:

$$\int_0^L \kappa(z)\exp(-\mathrm{j}2\pi\sigma z)\mathrm{d}z = -\rho(0,\sigma) - \mu(\sigma) \tag{8}$$

式中 $\rho(0,\sigma)$ 表示在 $z = 0$ 处的反射率;

$$\mu(\sigma) = \int_0^L \mathrm{d}z' \int_0^{z'} \mathrm{d}z'' \kappa(z')\kappa^*(z'') \times \rho(z'',\sigma)\exp[+\mathrm{j}2\pi\sigma(z'' - z')] \tag{9}$$

对(8)式进行傅里叶逆变换,可以得到:

$$\kappa(z) = F^{-1}[-\rho(0,\sigma)] - F^{-1}[\mu(\sigma)] = \kappa_0(z) - u(z) \tag{10}$$

对于弱光栅上式右边第二项为微小量,若忽略不计,则 $\kappa_0(z)$ 近似等于耦合系数 $\kappa(z)$,因此可以得到:

$$\rho(0,\sigma) = -\int_0^L \kappa(z)\exp(-\mathrm{j}2\pi\sigma z)\mathrm{d}z \tag{11}$$

如果在FBG之外的地方 $\kappa = 0$,则反射谱为

$$\rho(0,\sigma) = -K(2\sigma) \tag{12}$$

式中 $K(2\sigma)$ 为 κ 的傅里叶变换,

$$K(2\sigma) = \int \kappa(z)\exp(-\mathrm{j}2\sigma z)\mathrm{d}z \tag{13}$$

可以看出FBG的结构和性质之间要满足严格的傅里叶变换关系,就要满足弱反射条件。给定FBG的反射谱,通过傅里叶变换,就可以得到耦合函数 $\kappa(z)$,包括其模和相位信息,再根据(14)式,就可以得到光栅结构参数,

$$\kappa(z) = \frac{\pi}{2n_{\mathrm{eff}}\Lambda}Ac(z) = \frac{\pi}{2n_{\mathrm{eff}}\Lambda}T(z)\delta n(z)\exp[\varphi(z)] \tag{14}$$

实际上,弱反射条件就是CWR中的一次反射假设[6]。不管是TMM还是傅里叶变换,都是通过FBG的结构求其性质;从设计角度上讲,人们更希望从性质得到其结构,这个问题被称为FBG的重构。目前,已经有很多文献对光栅重构方法做了具体的研究[3-8]。很显然,傅里叶变换可以作为弱FBG近似下的重构方法(实际中发现,如果FBG含有较大的色散时傅里叶变换重构即使在不是很弱的反射下也比较精确)。

2 设计实例

2.1 恒定色散3 dB带宽反射谱的滤波器

首先,利用本文提出的傅里叶变换方法设计出一个二阶色散补偿器,用以补偿工作在1.0 μm、长度为30 km的标准单模光纤。光栅长度限制为12 cm。

1) 该器件具有恒定的色散。首先定义该器件的反射响应,反射谱为高斯型:

$$R(\Delta\lambda) = \mathrm{sqrt}(R)^* \exp[-(\Delta\lambda/B)^2] \tag{15}$$

式中:R 为峰值反射率,$R = 0.95$;B 是反射谱的3 dB带宽,这里取 $B = 2$ nm。

2) 群时延谱线为 $\tau(\Delta\lambda) = D\Delta\lambda$,其中 D 表示该器件的二阶色散。$D = 17$ ps/nm,表示每传输1 km,该器件其3 dB带宽内部色散值恒为17 ps/nm。相位谱线是时延谱线的积分。

首先,通过傅里叶变换方法,从目标反射谱中获得光栅耦合函数的振幅 $|\kappa(z)|$ 和相位信息 $\varphi'(z)$,如图2(a)所示。再根据 $T(z) = |\kappa(z)| \times 2n_{\mathrm{eff}}\Lambda/\pi\delta n$ 可得到切趾函数 $T(z)$。而啁啾一般定义为FBG周期随空间位置的变化:$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \sum_m C_m z^m$,啁啾实际上就是对FBG进行的一种相位调制。利用 $\Delta\Lambda$ 来描述FBG的相位调制,根据它和FBG相位调制 $\varphi(z)$ 之间的关系(15)式,就可以得到光栅的啁啾[6]:

$$\Delta\Lambda(z) = \Lambda(z) - \Lambda_0 = -\Lambda_0^2\varphi'(z)/2\pi \tag{16}$$

由图2(a)中的黑色实线可见,啁啾 $\Delta\Lambda$ 为光栅位置 z 的线性函数,即通过傅里叶变换方法可知该FBG具有一阶线性啁啾 $\Lambda(z) = \Lambda_0 + Cz$,并可求得啁啾系数 C。虚线 $|\kappa(z)|$ 可表示切趾系数(未归一化),近似为升余弦函数。再利用TMM仿真,得到该FBG的反射谱如图2(b)所示,图中虚线代表重构得到的反射率,带点实线代表群时延,黑色实线代表传播30 km过程中的色散值。仿真过程中取最大折射率调制为 3×10^{-4}。由图(b)可知仿真得到的 D 约为17 ps/nm,与理论值很接近。可见利用傅里叶变换方法重构具有色散的FBG,即使反射率比较高,其结果也比较接近。

2.2 具有线性色散的三阶色散补偿器

该器件具有非零的色散斜率,可以用于可调谐色散补偿。首先定义该器件的反射响应:

1) 反射谱为四阶超高斯形,$R(\Delta\lambda) = \mathrm{sqrt}$

$(R)^{*}\exp[-(\Delta\lambda/B)^{8}]$,其中 B 是反射谱 3 dB 带宽,这里取 $B=0.2$ nm。

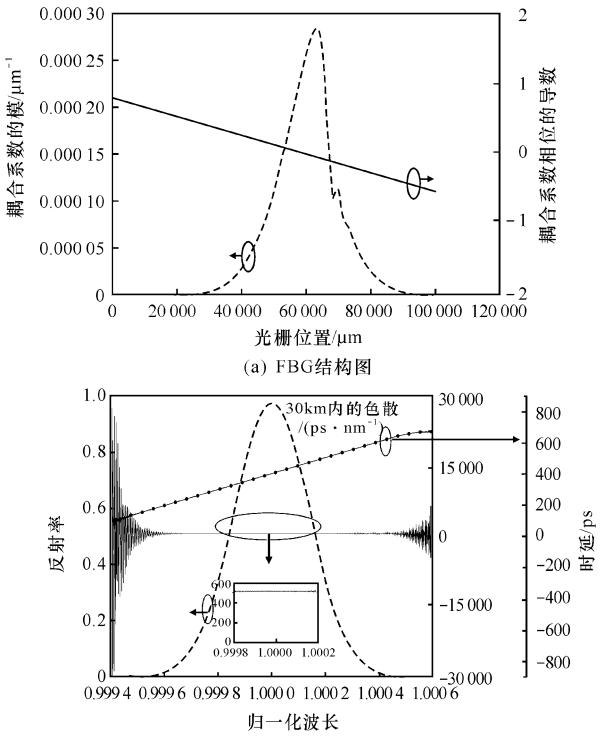

图 2　重构得到的恒定色散补偿器的 FBG 结构图和反射谱

Fig. 2　The constructional parameter spectrum and reflectivity of the synthesized constant dispersion compensator

2) 群时延谱线为 $\tau(\Delta\lambda)=1/2\times D_2(\Delta\lambda)^2$,其中 D_2 表示该器件三阶色散。这里取 $Lf=30$ km,$D_2=130$ ps/nm^2,表示该器件其 3 dB 带宽内部色散值从−130 ps/nm 线性变化到130 ps/nm。相位谱线是群时延谱线的积分。

采用本文提出的傅里叶变换方法,得到上述线性色散补偿器对应的 FBG 耦合系数,如图 3(a)所示:黑色实线代表耦合系数相位的导数,带点实线代表耦合系数的模。根据(15)式,图 3(a)中的黑色实线表明本地周期呈现非线性变化,即该 FBG 具有非线性啁啾。由带点实线,根据 $T(z)=|\kappa(z)|\times 2n_{\mathrm{eff}}\Lambda/\pi\delta n$,同样可以得到光栅的切趾函数。由图可知,在中心位置右半部分会出现多个小量切趾。利用TMM 得到的该FBG 的反射谱如图3(b)所示,其中黑色实线代表传播30 km 中色散的变化,虚线代表仿真得到的反射率,仿真时最大折射率调制取 7×10^{-4}。在反射谱通带带宽内,由图(b)可知,仿真得到的近似为从−120 ps/nm 线性变化到 120 ps/nm,虽然色散具有抖动,但是和目标值很接近。可见利用傅里叶变换方法重构具有较大色散的FBG,即使反射率比较高,其结果也比较接近。

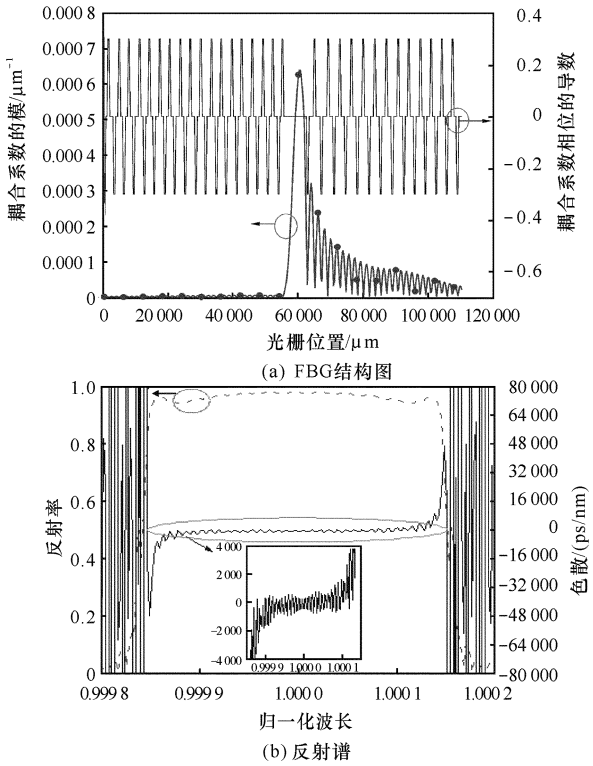

图 3　重构得到的三阶色散补偿器的 FBG 结构图和反射谱

Fig. 3　The constructional parameter spectrum and reflectivity of the synthesized linear dispersion compensator

3　结论

本文详细介绍了一种简单的光栅重构方法及其应用实例。通过耦合模理论与传输矩阵法的结合,导出了一种傅里叶变换的光栅重构方法。该方法给出了利用FBG 复杂反射响应获得FBG 的结构参数的基本思路和基础理论。利用此重构算法,通过数值模拟,设计了色散值恒为 17 ps/nm 的色散补偿器和具有三阶色散补偿的 FBG 三阶色散补偿器。数值仿真得到的反射谱和色散特性和目标值相当接近,表明本文提出的重构方法可以有效地应用于色散补偿器和光纤光栅滤波器的设计中,对光栅的制作具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] RAO Y J. In-fiber Bragg grating sensors[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(355): 1442-1462.

[2] OUELLETTE F, KRUG P A, STEPHENS T, et

al. Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fiber Bragg gratings [J]. Electronics Letters, 1995, 31(11):899-901.

[3] CHENG H C, LO Y L. The synthesis of multiple parameters of arbitrary FBGs via a genetic algorithm and two thermally modulated intensity spectra[J]. Lightwave Technology, 2005,23(6):2158-2168.

[4] 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.
CHEN Cong, ZHOU Jun, GONG Shen-guang. Phase reconstruction of fiber gratings based on Kolmogoroff method[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2004,15(2):160-164. (in Chinese with an English abstract)

[5] DONG P, AZANA J, KIRK A G. Synthesis of fiber Bragg grating parameters from reflectivity by means of a simulated annealing algorithm [J]. Optics Communications, 2003,228(4-6):303-308.

[6] 戴一堂. 新型光纤布拉格光栅的研究与应用[D]. 北京:清华大学,2006.
DAI Yi-tang. Research on the theory and application of novel fiber Bragg gratings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)

[7] YIN Yu-zhe, CHEN Xiang-fei, DAI Yi-tang, et al. A novel method for inverse fiber Bragg grating structure design[J]. Optics Communications, 2003, 228(1-3):79-84.

[8] 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.
MU Ke-jun, ZHOU Xiao-jun, REN Guo-rong, et al. Reconstruction of parameters of fiber gratings from time-delay characteristics using the genatic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5):688-693. (in Chinese with an English abstract)