

文章编号:1001-5078(2007)06-0552-03

取样布拉格光纤光栅的谐振方程

张自嘉,王昌明

(南京理工大学机械学院仪器系,江苏 南京 210049)

摘要:利用傅里叶变换和耦合模理论得到了取样布拉格光纤光栅的谐振方程,确定了其多谐振峰的位置。这一方程与光栅的周期和取样周期有关,它们共同确定了各反射峰的中心波长,与取样时的占空比、光栅长度和耦合系数没有关系。将谐振方程确定的谐振峰位置和传输矩阵得到的结果进行了比较,二者是一致的。利用谐振方程可以方便地得到取样布拉格光纤光栅的反射峰间隔。本文的结论对研究、设计和制作取样布拉格光纤光栅具有参考意义。

关键词:纤维光学;取样布拉格光纤光栅;谐振方程;梳状光谱

中图分类号:TN929;TN713

文献标识码:A

Resonance Equation of Sampled Fiber Bragg Gratings

ZHANG Zi-jia, WANG Chang-ming

(Department of Instrument of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210049, China)

Abstract: The resonance equation of the sampled fiber Bragg gratings is derived through the Fourier's transform and the coupled-mode theory, which determine the wavelengths of the resonance peaks. The equation is related to both of the grating period and the sampled period, which have no relation to the duty ratio, the length of the gratings and the coupling coefficient. Both of the result calculated from the resonance equation and the transmission matrix are compared and they are approximately equal. The interval of the neighboring peaks can be derived conveniently by the resonance equation. The result is useful to the investigation and design and the fabrication of the sampled fiber Bragg gratings.

Key words: fiber optics; sampled fiber Bragg gratings; resonance equation; comb spectrum

1 引言

光纤光栅在光通信与传感中起着重要作用,除了均匀光纤光栅外,还有各种不同结构的光纤光栅,如相移、啁啾、变迹、取样(超结构)光栅等,它们都有不同的反射谱,可以用于不同的目的。光纤光栅相当于光学滤波器,取样布拉格光纤光栅(sampled fiber Bragg grating)相当于电子技术与数字信号处理中的梳状滤波器,也和物理学中的平面光栅相类似,取样布拉格光纤光栅可用于多波长光纤激光器和色散补偿^[1-5]等,不少文献对这种光栅进行了研究^[1-10],研究取样布拉格光纤光栅的主要工具是傅里叶变换和耦合模理论,利用模耦合理论还可以得

到一个传输矩阵。已有文献对取样布拉格光纤光栅梳状光谱的研究,都是通过传输矩阵和折射率调制的傅里叶系数计算得到的,没有一个类似于均匀光栅的谐振方程(条件),用一个简单而确定的方程来描述。

利用傅里叶变换和耦合模理论得到了取样布拉格光纤光栅的谐振方程,该方程与光栅周期、取样周期有关。通过该方程可以方便确定梳状光谱的谱间

基金项目:江苏省博士后科研基金资助。

作者简介:张自嘉(1964-),男,博士学位,副教授,主要从事传感与测试技术研究。E-mail:zhzjia@126.com

收稿日期:2006-10-21; **收稿日期:**2007-03-06

隔。取样布拉格光纤光栅的多谐振峰的位置与光栅的周期和取样周期有关,与取样时的占空比、光栅长度和耦合系数没有关系。本文的结论对设计和制作取样布拉格光纤光栅具有参考意义。

2 取样布拉格光纤光栅的谐振方程

取样光纤光栅也叫超结构光纤光栅。它是对均匀光纤光栅按照一定的规律在空间上进行采样得到的,其折射率调制如图1所示。周期为 Λ ,长为 L 的均匀光栅,被矩形取样函数取样,矩形取样函数的周期为 d ,取样得到的每一段光栅的长度为 a ,两段光栅之间的正常光纤的长度为 b ,则 $d = a + b$,通常引入占空比 $t = a/d$,取样总个数为 $K = L/d$ 。

设均匀光栅的折射率为正弦调制,其改变量可表示为:

$$\begin{aligned} f(z) &= \Delta n(z) = n\sigma(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \right] \\ &= \overline{\Delta n}(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, n 为纤芯的折射率; $\overline{\Delta n}(z) = n\sigma(z)$ 为纤芯折射率的平均变化量,是 z 的慢变函数。

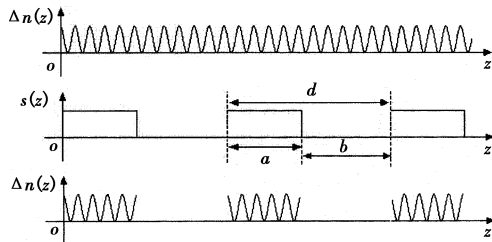


图1 取样布拉格光纤光栅的折射率变化示意图

Fig.3 modulation of the refractive of the sampled fiber Bragg gratings

图1中的取样函数可表示为 $s(z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} g_a \cdot (z - md)$,其中 $g_a(z)$ 为宽度为 a ,高为1的矩形脉冲函数(见图2)。于是总的折射率调制函数为 $f_s(z) = \Delta n_s(z) = \Delta n(z) \cdot s(z) = f(z) \cdot s(z)$ 。

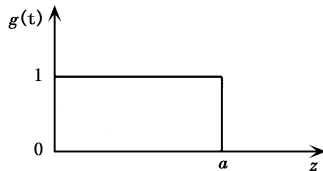


图2 矩形脉冲函数

Fig.2 function of rectangle pulse

根据傅里叶变换, $f_s(z)$ 的频谱等于 $f(z)$ 和 $s(z)$ 的傅里叶变换 $F(\omega)$ 和 $S(\omega)$ 的卷积。 $s(z)$ 的频谱为:

$$S(\omega) = 2\pi \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S_m \delta(\omega - m \cdot 2\pi/d) \quad (2)$$

其中, δ 为 δ -函数, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$; S_m 为

$s(z)$ 的傅里叶系数:

$$S_m = \frac{p}{d} \frac{\sin(m\pi p/d)}{m\pi p/d} e^{-j\frac{m\pi p}{d}} \quad (3)$$

$f(z)$ 的频谱为:

$$F(\omega) = \overline{\Delta n} \{ 2\pi \delta(\omega) + \pi [\delta(\omega + 2\pi/\Lambda) + \delta(\omega - 2\pi/\Lambda)] \} \quad (4)$$

于是, $f_s(z)$ 的频谱为:

$$\begin{aligned} F_s(\omega) &= \frac{1}{2\pi} F(\omega) \times S(\omega) \\ &= \overline{\Delta n} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{a}{d} \frac{\sin(m\pi a/d)}{m\pi a/d} e^{-j\frac{m\pi a}{d}} \{ 2\pi \delta(\omega - m \cdot 2\pi/d) + \\ &\quad j\pi [\delta(\omega - m \cdot 2\pi/d + 2\pi/\Lambda) + \delta(\omega - m \cdot 2\pi/d - 2\pi/\Lambda)] \} \end{aligned} \quad (5)$$

未取样光栅包含的空间频率为 $2\pi/\Lambda$,其谐振条件为 $2\beta - 2\pi/\Lambda = 0$ 。

从式(5)可见,经过取样后的光栅的折射率调制,包含的空间频率有 $m \cdot 2\pi/d$ 和 $m \cdot 2\pi/d \pm 2\pi/\Lambda$,于是取样光栅的相位匹配条件应为 $2\beta - m \cdot 2\pi/d = 0$,或 $2\beta - (m \cdot 2\pi/d \pm 2\pi/\Lambda) = 0$,但根据光栅的实际情况,通常考虑的是在满足 $2\beta - 2\pi/\Lambda = 0$ 附近的光模式,由于 d 远大于 Λ ,实际上第一个条件只有在 m 很大时才能满足,而此时其前面的系数已很小,所以并不能形成有效的反射峰。而对第二个条件中的 $\pm$,只有取 $+$ 时,才能满足,于是得有取样布拉格光纤光栅的谐振方程为:

$$2\beta - 2\pi/\Lambda - m \cdot 2\pi/d = 0, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

或用有效折射率表示为:

$$\lambda_m = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{1 + m \frac{\Lambda}{d}}, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

这里的 n_{eff} 是波长为 λ_m 的光的有效折射率。折射率调制的频谱为:

$$\begin{aligned} F_s(\omega) &= \overline{\Delta n} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{a}{d} \frac{\sin(m\pi \frac{a}{d})}{m\pi \frac{a}{d}} e^{-j\frac{m\pi a}{d}} \cdot \\ &\quad j\delta(\omega - m \cdot 2\pi/d - 2\pi/\Lambda) \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)可知,取样光栅的反射谱,是由多个峰构成的,对应 $m = 0$ 的反射峰为光栅未取样时的中心谐振波长 λ_0 ,称为0级反射峰,其他 $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ 时称为 $\pm 1, \pm 2, \dots$ 级反射峰, $\lambda > \lambda_0$ 时取 $-$, $\lambda < \lambda_0$ 时取 $+$ 。

由式(8)可以看出,若 d/a 为整数,则当 $m\pi a/d = \pm\pi$ 即 $m = \pm d/a$ 时,耦合系数为0,构成了反射谱轮廓两侧的零点。

3 取样布拉格光纤光栅的谱间隔和轮廓峰宽度

取光纤轴的方向为 z 轴, 设光栅的周期为 Λ , 取样后共有 K 个长度相等的光栅段, 设前向和后向模的振幅分别为 A^+ 和 A^- , 则输入输出关系为:

$$\begin{bmatrix} A_K^+ \\ A_K^- \end{bmatrix} = F_K F_{K-1} \cdots F_k \cdots F_1 \begin{bmatrix} A_0^+ \\ A_0^- \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} A_0^+ \\ A_0^- \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0^+ \\ A_0^- \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, F_k 为传输矩阵; $k=1, 2, \dots, K$ 。可以利用均匀光栅的传输矩阵^[11]求出表达式为:

$$F_k = \begin{bmatrix} (\cosh sa + j \frac{\delta}{s} \sinh sa) e^{j\delta a} & -j \frac{\kappa}{s} \sinh(sa) e^{j\delta[2(k-1)d+a]} \\ j \frac{\kappa}{s} \sinh(sa) e^{-j\delta[2(k-1)d+a]} & (\cosh sa - j \frac{\delta}{s} \sinh sa) e^{-j\delta a} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, κ 为耦合系数, $\delta = \beta - \pi/\Lambda$, $s^2 = \kappa^2 - \delta^2$ 。

利用 $A_K^- = 0$, 可以得到反射率为 $R = |s_{21}/s_{11}|^2$, 由此可计算出反射谱。图3给出了 $kL = 8$, $L = 20\text{mm}$, $d = 2\text{mm}$, $t = 1/5$ 和 $t = 1/3$ 时的反射谱。图中曲线 p 是反射谱的轮廓分布, 它是一个取样周期内的一段光栅所产生的反射谱, 其长度为 $a = t \cdot d$ 。

两个相邻峰的间隔可以从式(3)估计出来。设两个相邻峰的传播常数分别为 β_m 和 β_{m+1} , 则由式(6)可得 $\beta_{m+1} - \beta_m = \pi/d$, 由于它们的波长和有效折射率相差很小, 而且和中心波长 λ_0 的有效折射率 n_{eff} 相差也很小, 并且有 $\lambda_{m+1} \lambda_m \approx \lambda_0^2$, 因此可以得到邻峰之间的波长间隔为:

$$\Delta\lambda = \lambda_{m+1} - \lambda_m \approx \frac{\lambda_{m+1} \lambda_m}{2n_{\text{eff}} d} \approx \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{eff}} d} = \frac{\Lambda}{d} \lambda_0 \quad (11)$$

式(11)和已有文献上的结果是相同的, 利用该式可以计算出图3中的 $\Delta\lambda = 0.417\text{nm}$ 。和物理学中的平面透射光栅类似, 单个缝的衍射形成了光谱

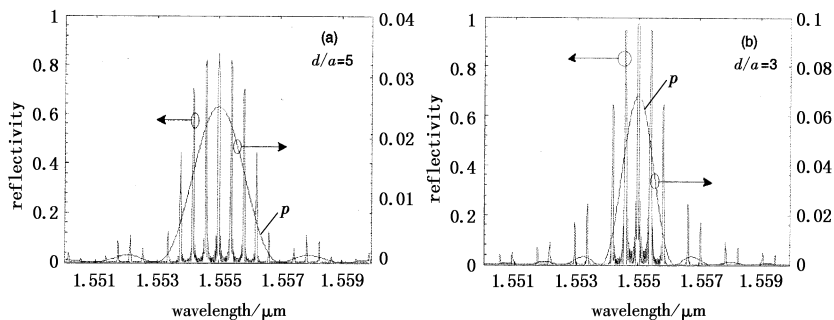


图3 计算得到的反射谱

Fig. 3 calculated reflection spectrum

的轮廓, 这里一个取样周期内的光栅长度对应了平面光栅中的一个狭缝。轮廓的宽度和长为 a 的一小段均匀光栅产生的谱宽度相同:

$$\Delta\lambda_s \approx 2 \frac{\Lambda}{a} \lambda_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa a}{\pi}\right)^2} \approx 2 \frac{\Lambda}{a} \lambda_0 \quad (12)$$

利用该式可以计算出图3(a)中的轮廓主峰宽度为 4.17nm , 图3(b)的宽度为 2.5nm , 这和图3中的结果吻合。对比式(11)可见, $\Delta\lambda_s/\Delta\lambda = d/a = 1/t$, 也就是说, 占空比越小, 主轮廓峰内的条纹越多。

图4给出了实验上得到的取样布拉格光纤光栅的透射谱^[8], 其中光栅长度为 20mm , 取样周期为 $d = 2\text{mm}$, $t = 1/5$, 测得相邻峰间隔为 0.4nm , 和理论值较为接近。对单个峰的宽度, 理论值要比实验小。

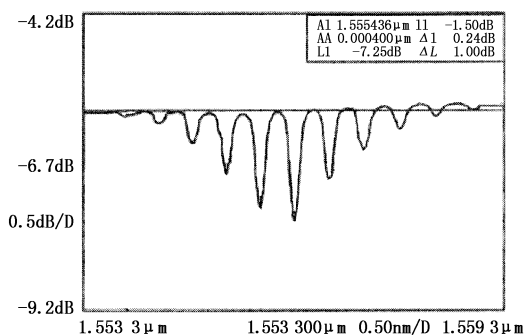


图4 实验得到取样布拉格光纤光栅的透射谱

Fig. 4 transmission spectrum of sampled fiber Bragg grating

由式(6)、(11)和(12)可知, 通过适当控制 d , a 和 Λ 的值, 可以控制各谐振峰的位置、间距和宽度。

4 总结

均匀布拉格光纤光栅的反射峰由其谐振条件 $2\beta - 2\pi/\Lambda = 0$ 或 $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 确定, 而取样布拉格光纤光栅的多反射峰是利用传输矩阵计算得到的。本文利用傅里叶变换得到了取样布拉格光纤光栅的谐振方程 $2\beta - 2\pi/\Lambda - m \cdot 2\pi/d = 0$, 或 $\lambda_m = 2n_{\text{eff}}\Lambda/(1 + m\Lambda/d)$ 。因此可以不必利用传输矩阵即可利用这一简单的关系确定出各反射峰的位置。可见取样布拉格光纤光栅的多谐振峰的位置是由光栅周期和取样周期共同确定的, 与取样时的占空比、光栅长度和耦合系数没有关系(不考虑平均折射率变化)。本文的结论对研究和设计制作取样布拉格光纤光栅具有参考意义。

(下转第557页)

其驱动信号包括扫描时钟 Φ_1 、 Φ_2 、复位时钟 RS 和帧同步脉冲 SH。系统中采用 TSM320LF2407 定时器 1 的 PWM 输出作为复位时钟 RS, 采用 I/O 口来产生扫描时钟 Φ_1 、 Φ_2 和帧同步脉冲 SH, 时钟周期由定时器来控制。

实验采用 TSM320LF2407 的 A/DC 数据采集电路通过 DSP 仿真器在显示器上观察输出信号, 得到系统的输出信号如图 5 所示。

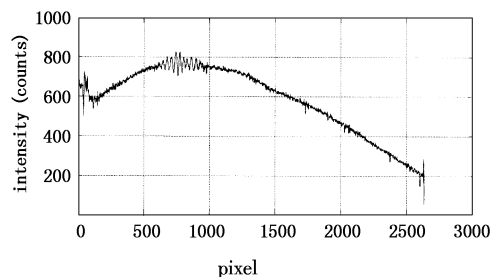


图5 ADC 数据采集结果

图 5 所示的输出信号包含由光源所引起的低频信号以及高频噪声。因此, 必须对输出信号进行滤波, 实验中采用了三阶巴特沃斯数字带通滤波器来对输出信号进行滤波, 滤波结果如图 6 所示。

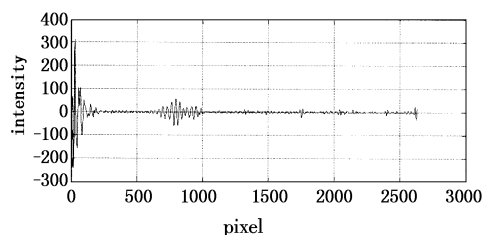


图6 带通滤波结果

(上接第 554 页)

参考文献:

- [1] Xiufeng Yang, Xinyong Dong, Shumin Zhang. Multiwavelength erbium-doped fiber laser with 0.8nm spacing using sampled Bragg grating and photonic crystal fiber[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(12): 2538-2540.
- [2] Chinhua Wang, Azana J Chen L R. Efficient technique for increasing the channel density in multiwavelength sampled fiber Bragg grating filters[J]. Photonics Technology Letters, 2004, 16(8): 1867-1869.
- [3] Junqiang Sun, Ying Zhang, Xinliang Zhang. Multiwavelength lasers based on semiconductor optical amplifiers[J]. Photon. Technol. Lett., 2002, 14(5): 750-752.
- [4] Xi-Hua Zou, Wei Pan, Bin Luo, et al. Periodically chirped sampled fiber bragg gratings for multichannel comb filters

由图 6 可以看出, 解调系统输出的实验结果与图 3 所示的仿真结果极为相似。证明利用光楔来实现光线法-珀传感器解调的原理是完全正确的。

4 结论

理论研究和实验结果表明, 采用基于光楔的光纤法-珀应变传感器的解调系统在原理是全完可行的, 能够实现光纤法-珀传感器的解调。此解调系统没有运动部件, 具有很好的长期可靠性; 它不需要昂贵的光谱接收器件, 成本非常低, 将是今后光纤法-珀解调的发展方向。

参考文献:

- [1] 章鹏, 等. 光纤法-珀传感器并联复用的互相关解调[J]. 光电工程, 2004, 31(11): 70-72.
- [2] 章鹏. 光纤法-珀传感器变换解调原理研究及嵌入式系统实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2003, 6: 9-23.
- [3] 孙吉勇. 可调法-珀腔解调的光纤法珀应变传感器的技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002, 6: 3-7.
- [4] J W Berthold, L A Jeffers, R L Lopushansky. Fiber optic sensors for the refinery of the future[R]. Sensors for Industry Conference, USA: Houston, Texas, 2002, 12: 19-21.
- [5] Claude Belleville, Gaetan Dupalin. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. Optics Letters, 1993, 18: 78-80.
- [6] M 波恩, F 沃耳夫. 光学原理(上)[M]. 杨葭荪, 译. 北京: 科学出版社. 1978: 422-424.
- [7] 孙吉勇, 等. 基于可调谐法-珀腔解调的光纤法-珀应变传感系统[J]. 激光杂志, 2002, 23(4): 49-50.
- [8] [J]. Photon. Technol. Lett., 2006, 18(12): 1371-1373.
- [5] 李春斌, 孙成城, 曹京, 等. 用于 10GbsWDM 系统色散补偿的波长取样啁啾光纤光栅[J]. 激光与红外, 2001, 31(5): 318-320.
- [6] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. Journal of the Lightwave. Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [7] 贾宝华, 盛秋琴, 冯丹琴, 等. 超结构光纤布喇格光栅的理论研究[J]. 中国激光, 2003, 20(3): 247-251.
- [8] 张东升, 姜莉, 开桂云, 等. 取样光纤光栅的理论分析及其写入技术[J]. 南开大学学报, 2006, 39(1): 79-83.
- [9] 贾宝华, 冯丹琴, 盛秋琴. 矩形取样 Bragg 光纤光栅研究[J]. 南开大学学报, 2003, 36(2): 41-46.
- [10] 金宏发, 董孝义, 刘志国, 等. 光纤布喇格光栅的理论分析[J]. 光子学报, 1996, 25(9): 809-813.
- [11] 张自嘉, 王昌明. 光纤光栅传输矩阵研究[J]. 光子学报(已录用, 近期刊出)