

光纤 Bragg 光栅应变测量中啁啾特性的研究*

童 凯¹ 汪梅婷² 李志全¹

(1 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2 燕山大学继续教育学院, 秦皇岛 066004)

摘 要 用光纤 Bragg 光栅进行应变(静态、动态)测量时,由于光栅轴向各部分受到的应变不同,因而产生布喇格中心波长漂移量发生变化. 实际测量中往往忽略此扰动对光纤光栅反射谱中心波长的影响,则必然带来测量误差. 采用耦合模理论,分析并研究了 Bragg 光栅受轴向线性应变、高次应变和非线性周期应变波等情况下的啁啾特性. 根据各自啁啾特性的不同,给出了对光纤光栅反射谱中心的影响,以及测量各种应变时的测量条件和范围.

关键词 光纤光栅;啁啾光栅;应变;反射谱

中图分类号 TN919.11 **文献标识码** A

0 引言

Bragg 光纤光栅传感器由于是波长绝对编码,并不受光强扰动的影响,得到了广泛的应用,特别是光纤光栅应变传感器可以被用来监测桥梁、水坝、高楼、油罐群等大型建筑的应变分布. 这些情况下由于光纤光栅长度远远小于被测对象,因而都忽略了光纤光栅上的应力分布不均的问题. 然而,如果采用光纤光栅测量微型机械梁、杆、轴等的应变分布时,由于实际测量往往不是等强度的,均衡光纤光栅轴向受到的应变分布不同,产生了啁啾现象^[1~3]. 本文根据光纤光栅耦合理论,采用四阶龙格-库塔数值分析方法对光纤光栅受线性及非线性应变时的啁啾特性进行了研究,以提高光纤光栅应变传感器的测量准确度.

1 光纤 Bragg 光栅耦合模及啁啾特性分析

Bragg 光纤光栅受到周期扰动时,光纤纤芯轴向折射率变化为

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中, Λ_0 为光纤光栅周期, $\phi(z)$ 为光栅啁啾函数, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为一个周期内光纤光栅折射率变化平均值, z 为传输方向上的坐标. 由耦合模理论可得光纤光栅模传输一阶微分方程^[4]

$$\frac{dR(z)}{dz} = i\delta R(z) + ikS(z) \quad (2)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} = -i\delta S(z) - ikR(z) \quad (3)$$

Bragg 光纤光栅结构如图 1,两端的轴向坐标分

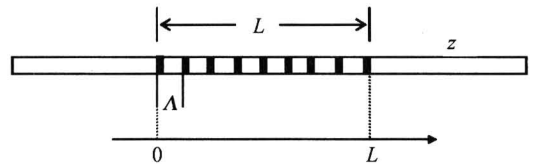


图 1 Bragg 光纤光栅结构图

Fig. 1 The schematic of the fiber Bragg grating

别为 0 和 L,即 $0 < z < L$. 则边界条件为 $R(L) = 1$, $R(0) = 1$ 和 $S(L) = 0$. 设 $\rho(z) = S(z)/R(z)$, 则

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = -ik - 2i\delta\rho(z) - ik\rho(z)^2 \quad (4)$$

因此, Bragg 光纤光栅的反射率为

$$r(\lambda) = \left| \frac{S(0)}{R(0)} \right|^2 = |\rho(0)|^2 \quad (5)$$

对于光纤光栅应变传感器,当受到应变作用时,其反射波长产生漂移,忽略了应变分布不均引起的啁啾对反射波中心波长的影响^[5,6]. 设应变 $\epsilon(z)$ 作用在光纤光栅上,则引起的光纤光栅周期变化为

$$\Lambda(z) = \Lambda [1 + (1 - p_e)\epsilon(z) + (1 - p_e)z\epsilon'(z)] \quad (6)$$

式中, p_e 为有效弹光系数. 若高次应变或周期性应变作用时,应考虑应变的高阶导数^[7,8]. 应变引起光纤光栅的有效啁啾函数为

$$\phi(z) = -\frac{2\pi}{\Lambda} \left[\frac{(1 - p_e)\epsilon(z)}{1 + (1 - p_e)\epsilon(z)} \right] z \quad (7)$$

这些系数确定后,即可解式(2)和式(3),得到包含啁啾特性的反射谱特性^[9,10].

2 数值实验及结果分析

设光纤光栅特性纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$, 布喇格中心波长 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$, 光纤光栅长度 $L = 5 \text{ mm}$, 有效折射率平均变化 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 2.5 \times 10^{-4}$, 有效弹光系数 $p_e = 0.26$, 光纤光栅分割 $M = 400$. 采用四

* 国家自然科学基金资助(6037702)的课题
Tel: 0335-8057041 Email: tongkai0338@sina.com.cn
收稿日期: 2005-04-27

阶龙格—库塔数值分析方法解式(2)和式(3), 计算软件采用 Optigrating.

图 2、3、4、5 分别为 Bragg 光纤光栅受线性分布、周期变化、二次非线性和不同周期幅值相同应变

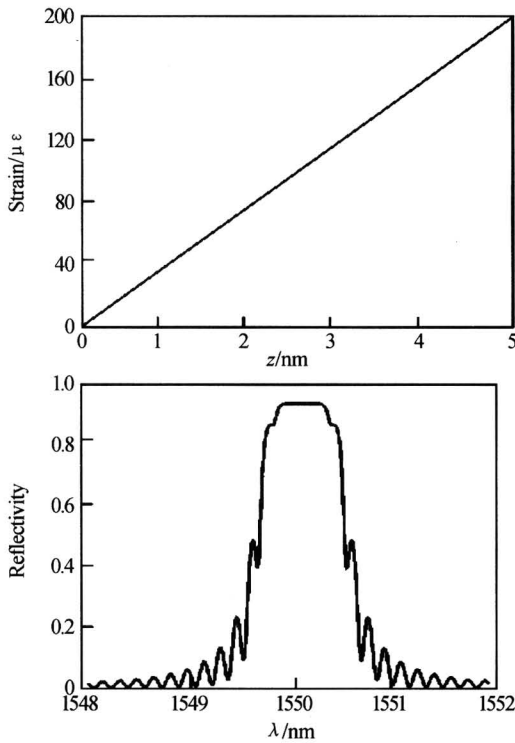


图 2 轴向线性应变(0~200 μϵ)作用及其反射谱
Fig. 2 The applied linear strain(0~200 μϵ) gradient along axis and the reflect spectra of grating

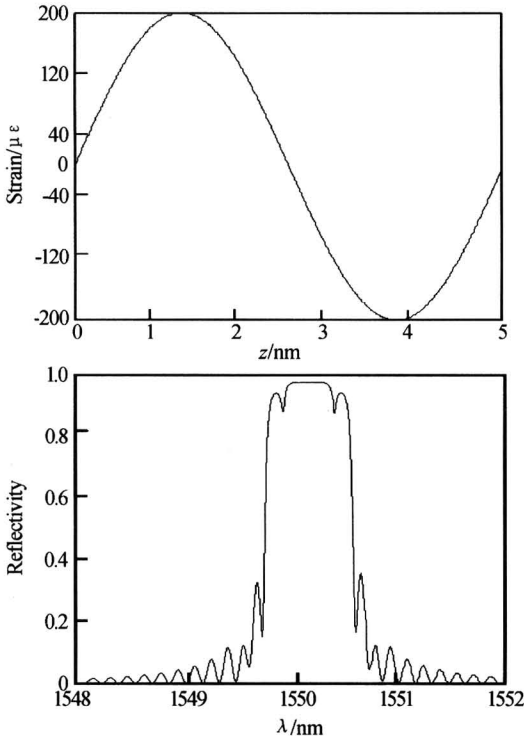


图 3 轴向周期应变(0~200 μϵ)作用及其反射谱
Fig. 3 The applied period strain(0~200 μϵ) along axis and the reflect spectra of grating

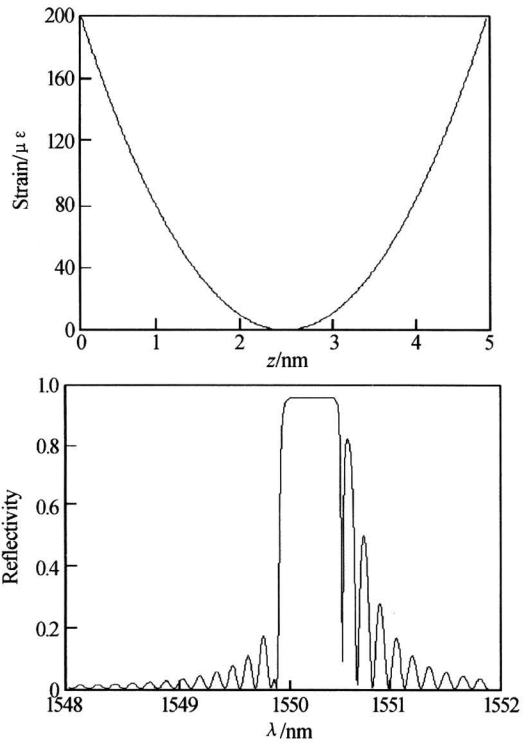


图 4 轴向二次应变(0~200 μϵ)作用及其反射谱
Fig. 4 The applied quadratic strain(0~200 μϵ) along axis and the reflect spectra of grating

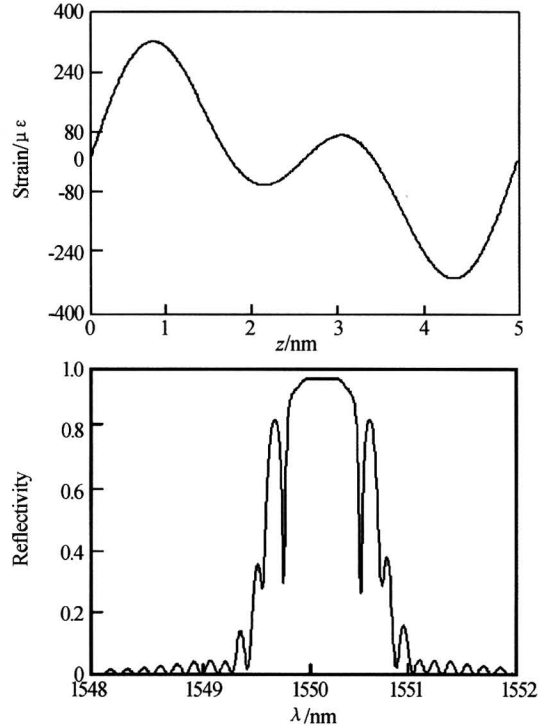


图 5 轴向不同周期同幅值应变(0~200 μϵ)同时作用及其反射谱
Fig. 5 The applied two different period and same amplitude strain(0~200 μϵ) and the reflect spectra of grating
(应变范围 0~200 μϵ)作用及各条件下的反射特性谱图. 在线性应变和周期应变作用时光栅反射谱的啁啾现象不明显, 此时, 采用 Bragg 光纤光栅测量应变是完全可行的. 然而, 在二次应变和不同周期同

幅值应变作用下,有较为明显的啁啾现象,即出现了几个不同的中心波长,此时,采用波长方法解调时,必须注意解调波长的范围.

当 Bragg 光纤光栅受应变范围 $0\sim 1000\mu\epsilon$ 的线性分布、周期变化、二次及不同周期应变作用时,其

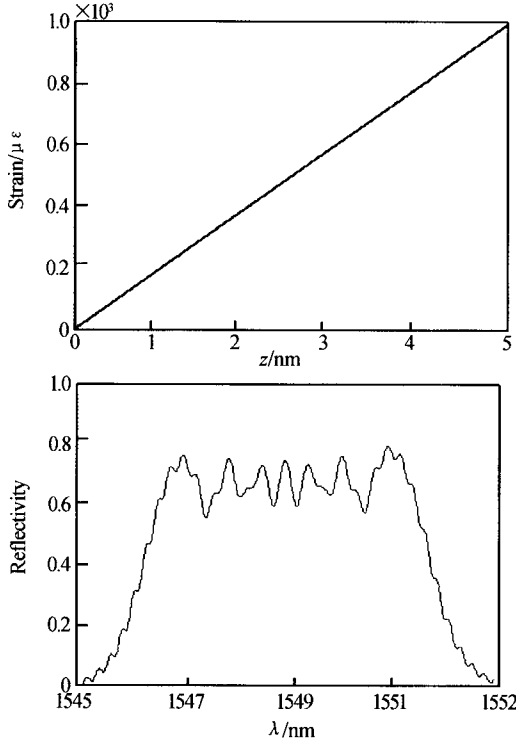


图 6 轴向线性应变($0\sim 1000\mu\epsilon$)作用及其反射谱
Fig. 6 The applied high strain($0\sim 1000\mu\epsilon$) gradient along axis and the reflect spectra of grating

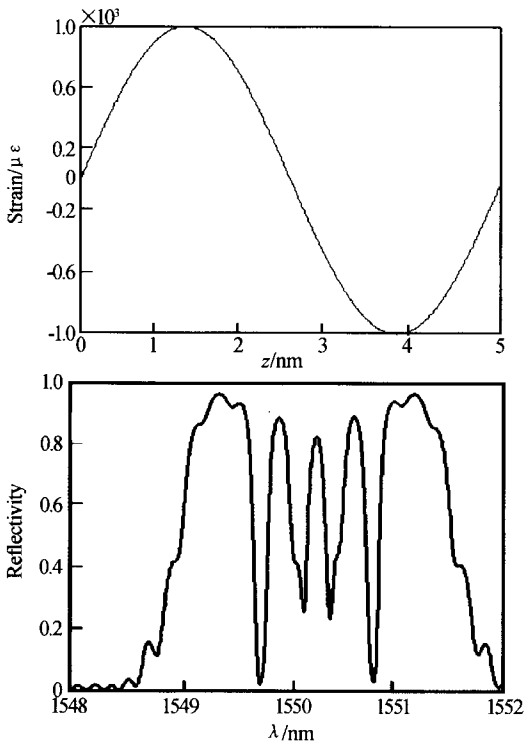


图 7 轴向周期应变作用($0\sim 1000\mu\epsilon$)及其反射谱
Fig. 7 The applied period strain($0\sim 1000\mu\epsilon$) along axis and the reflect spectra of grating

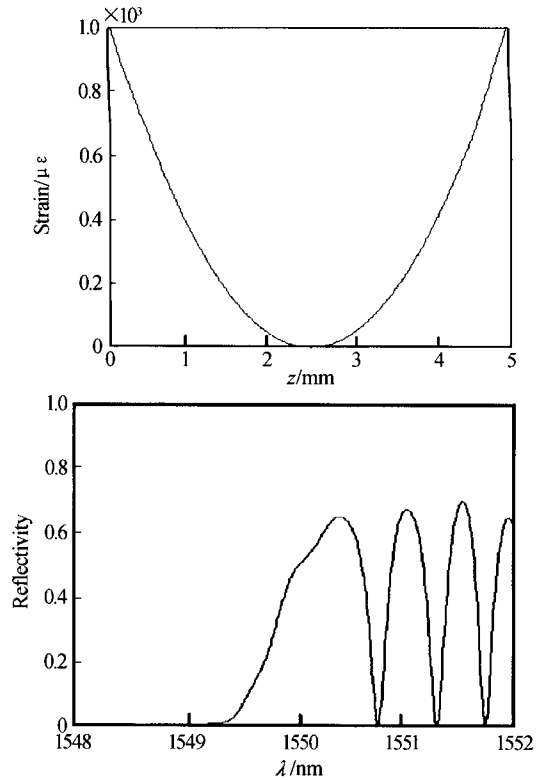


图 8 轴向二次应变($0\sim 1000\mu\epsilon$)作用及其反射谱
Fig. 8 The applied quadratic strain($0\sim 1000\mu\epsilon$) along axis and the reflect spectra of grating

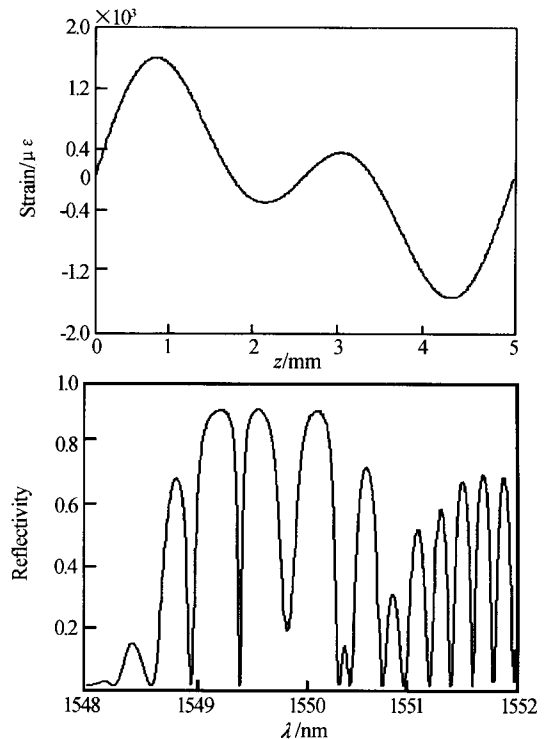


图 9 轴向双周期同幅值应变($0\sim 1000\mu\epsilon$)作用及其反射谱
Fig. 9 The applied two different period and same amplitude strain($0\sim 1000\mu\epsilon$) and the reflect spectra of grating

反射特性分别如图 6、7、8、9. 此时, Bragg 光纤光栅反射谱存在明显的啁啾现象, 出现了数目众多的中心波长, 且各波长段的宽度也不相同, Bragg 光纤光栅已不适合测量应变.

3 结论

在采用 Bragg 光纤光栅测量应变(静态/动态)时,由于绝大多数的测量对象不是等强度物体,即被测对象各点的应变分布不均匀,导致光纤光栅轴向应变分布也不均匀,产生了啁啾现象.特别是当大应变、高次应变及不同周期应变波作用时,光栅反射谱产生了明显的啁啾特性.分析可知,Bragg 光纤光栅适用于小应变或单周期应变作用时的应变测量,而对于大应变、高次应变或不同周期应变作用时由于存在啁啾现象,反射谱存在多个反射峰,相应产生了多个 Bragg 中心波长.此时,测量得到的中心波长与理论分析得到的中心波长存在明显的测量误差.本文仅对几种简单应变进行分析,若采用 Bragg 光纤光栅测量低频振动信号,对于振动信号的复杂性及多频率应变在光栅上同时作用,应进一步进行分析讨论.

参考文献

- 1 Erdogan T. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 2 张霞,夏月辉,黄永清,等.有限包层半径光纤 Bragg 光栅的理论研究. *光子学报*, 2003, **32**(2):222~224
Zhang X, Xia Y H, Huang Y Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):222~224
- 3 Skaar J, Waagaad O H. Design and characterization of finite-length fiber gratings. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(10):1238~1245
- 4 Matsuhara M, Hill K O, Watanabe A. Optical-waveguide filters; Synthesis. *J Opt Soc Am*, 1975, **65**(7):804~809
- 5 叶志清,邹道文,邹柳娟,等.变迹啁啾 Bragg 光纤光栅的矩阵分析. *光子学报*, 2001, **30**(2):184~187
Ye Z Q, Zou D W, Zou L J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2):184~187
- 6 金晓峰,张仲先.非均匀光纤光栅相应特性的研究. *光学学报*, 1999, **19**(6):722~727
Jin X F, Zhang Z X. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6):722~727
- 7 叶志清,邹道文.线性啁啾光纤 Bragg 光栅的实验研究. *光子学报*, 2002, **31**(1):71~73
Ye Z Q, Zou D W. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1):71~73
- 8 柳春郁,余有龙,张昕明,等.基于悬臂梁调谐技术的光纤光栅无源振动监测. *光子学报*, 2003, **32**(9):1067~1069
Liu C Y, Yu Y L, Zhang X M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1067~1069
- 9 贾振安,乔学光,李明,等.光纤光栅温度传感的非线性现象. *光子学报*, 2003, **32**(7):844~847
Jia Z A, Qiao X G, Li M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7):844~847
- 10 位恒政,张志刚,王淮生,等.飞秒脉冲制作啁啾光纤光栅的理论研究. *光子学报*, 2004, **33**(9):1050~1053
Wei H Z, Zhang Z G, Wang W S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1050~1053

Study on the Chirp Characteristic in Strain measurement by Fiber Bragg Grating

Tong Kai¹, Wang Meiting², Li Zhiquan¹

1 College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

2 College of Continue Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

Received date: 2005-04-27

Abstract Due to different strain of different components along the grating axis when Bragg grating is employed to measure strain (statically, dynamically), central FBG wavelength shift changes accordingly. However effect of this strain difference on central wavelength shift of fiber Bragg grating is often ignored in practical application. With coupled mode theory, as well as grating segment and transfer matrix method, chirp characterizations of fiber Bragg grating are studied when axial linear and high-order strain, non-linear periodic strain-wave are applied. Based on different chirp characterizations, measurement condition and measurement range under various kinds of strain are determined.

Keywords Fiber Bragg grating; Chirp grating; Strain; Transfer matrix

Tong Kai was born in 1973. He is an instructor in Yanshan university. Now he is a doctoral student and engaged in the research on nonlinear photoelectric sensing.

