

采用高斯波形近似的干涉型光纤光栅法布里-珀罗传感系统的可见度分析

牛嗣亮 饶伟 梁迅 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 两光纤布拉格光栅(FBG)的光谱失配会使其构成的光纤法布里-珀罗(FFP)传感系统的干涉条纹可见度降低,从而影响探测性能。基于弱反射率 FBG 反射谱的高斯波形近似,推导了光谱失配引起的可见度变化表示式。实验测量了干涉型 FFP 传感系统的可见度曲线,对理论分析进行了验证。研究表明,反射谱旁瓣对光谱失配引起的可见度变化有重要影响。从光谱匹配的角度,采用高斯切趾光栅的 FFP 传感系统优于普通均匀光栅的系统。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;法布里-珀罗腔;条纹可见度;高斯波形

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0305006

Visibility Analysis of Interferometric Fiber Bragg Grating Defined Fabry-Perot Sensor System under Gaussian Profile Approximation

Niu Siliang Rao Wei Liang Xun Hu Yongming

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Spectral mismatch between spectral profiles of two fiber Bragg gratings (FBGs) can deteriorate the fringe visibility of the constructed fiber Fabry-Perot (FFP) sensor system. Under the approximation of Gaussian profiles to reflection spectra of weak fiber Bragg gratings, the expression describing fringe visibility variations induced by spectral mismatch is deduced. The curve of fringe visibility is measured in an interferometric FFP sensor system, which is in good agreement with the theoretical analysis. The investigation indicates that, side lobes in reflection spectra of FBGs have a big influence upon visibility variations caused by spectral mismatch. And from the spectral match point of view, the FFP sensor system based on Gaussian apodized gratings is superior compared with that on normal uniform gratings.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Fabry-Perot cavity; fringe visibility; Gaussian profile

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 050.2230; 050.2770; 060.2310; 060.2430; 060.3738

1 引言

光纤法布里-珀罗(FFP)传感器具有结构简单、体积小和灵敏度高等优点^[1],在压力^[2]、温度^[3]、应力^[4]、折射率^[5]和气体^[6]等参量传感中有广泛的应用。FFP腔利用光不同传输介质的交界面构成反射端面,如光纤熔接点^[7]、光纤与空气^[8]和单模光纤与空芯光纤^[9]等。根据反射端面的不同,相应的可

以分为本征型、非本征型和混合型 FFP 腔。光纤布拉格光栅(FBG)作为一种具有本征波分能力的光纤内反射镜,为 FFP 传感器的发展提供了新的技术方案^[10]。用两个 FBG 作为反射镜,可以构成一个基于 FBG 的法布里-珀罗(F-P)腔^[11]。这种双光栅结构较传统 FFP 腔具有更优异的波分复用能力,更好的机械强度和更高的灵敏度^[12,13]。基于 FBG 的 F-P 传感

收稿日期: 2011-07-22; 收到修改稿日期: 2011-12-15

作者简介: 牛嗣亮(1981—),男,博士研究生,主要从事光纤传感、信号处理等方面的研究。

E-mail: liusiliang12345@yahoo.com.cn

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

器的干涉型解调方法具有较高的探测精度,通常采用匹配干涉仪解调动态应力参量。Cranch等^[14]在曲率传感实验中采用6 cm的FFP腔实现了0.6 ne/Hz^{1/2}的探测精度。通常为了增大时分复用系统中传感器数量,采用弱反射率光栅^[15]。

Kim等^[16]分析了采用窄带光纤放大自发辐射(ASE)谱光源的串联干涉仪系统的噪声特性,指出该类系统的探测精度由两干涉仪的臂差匹配程度决定。Shi等^[17]进一步分析了基于FBG的F-P腔的干涉型传感系统的探测精度,从两串联干涉仪臂差失配的角度对文献[18]的传感结构进行了理论分析,指出30 cm长的FFP腔的理论探测精度为3.82 pε/Hz^{1/2},原文献中72.2 pε/Hz^{1/2}的实验结果较差是由Mach-Zehnder解调干涉仪的7.6 mm臂差失配造成的。但是,Christmas等^[18]采用0.2 nm带宽的FBG,在1550 nm波长处光栅反射光相干长度为8.2 mm。因此,7.6 mm臂差失配会造成解调系统的近乎失效,推测的结论与文献实验结果不符。进一步分析可知,上述研究都基于两FBG光谱完全相同的假设,这是造成理论推测存在偏差的原因。实际中,具有几乎完全相同光谱结构的FBG很难制造^[19]。而且,FBG的光谱特性很容易受到外界环境的影响而改变,裸光栅对应变和温度的灵敏度分别为1 pm/με和13 pm/℃^[20]。易知,两个FBG的光谱失配会降低干涉型FFP传感系统中光的干涉强度,从而降低系统探测性能。Guan等^[21]利用该原理采用可变臂差的Michelson干涉仪测量光谱失配引起的FFP腔干涉强度变化,从而实现温度传感。

本文在弱反射率光栅反射谱的高斯波形近似基础上,理论与实验分析由FBG构成的F-P干涉型传感系统中光谱失配对系统干涉条纹可见度的影响。首先分析干涉型FFP传感系统的特性,然后采用高斯曲线近似低反射率FBG的反射谱,推导了基于高斯切趾光栅的FFP传感系统的可见度表达式。进一步考虑反射谱旁瓣的影响,对基于普通均匀FBG

构成的FFP传感系统进行可见度分析。最后,实验测量了归一化光谱偏移引起的可见度变化曲线,对理论分析进行验证。

2 基本理论

基于FBG的F-P腔与普通F-P腔的不同之处在于其只在FBG带宽内反射,并且FBG反射相位谱的影响使其有更丰富的谐振条纹。均匀FBG的振幅反射系数可以表示为^[10]

$$r = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L)}{\sigma \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L) + i\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L)}, \quad (1)$$

式中,直流耦合系数 $\kappa = \pi \Delta n / \lambda$,失谐波矢量 $\sigma = 2\pi n(1/\lambda - 1/\lambda_0)$, λ_0 为中心波长, L 为光栅长度, Δn 为折射率调制深度。低反射FBG由于折射率调制深度较低,光栅各部分反射光的能量均匀,因此其反射相位谱具有线性,可以表示为^[22]

$$\begin{aligned} \phi_r(\lambda) &= \frac{\pi}{2} + \beta L - \beta_0 L \mp k\pi, \\ \frac{k\Delta\lambda_0}{2} &\leq |\lambda - \lambda_0| < (k+1) \frac{\Delta\lambda_0}{2}, \\ (k &= 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,传播常数 $\beta = 2\pi n / \lambda$, $\beta_0 = 2\pi n / \lambda_0$, $\Delta\lambda_0$ 为光栅反射谱零点带宽。当 $\lambda < \lambda_0$ 时,(2)式取负号。此外,由FBG的传输矩阵理论^[10],可以得到反射和透射相位谱的关系式为 $\phi_t(\lambda) = \phi_r(\lambda) + \beta_0 L - \pi/2$,前向和后向透射相位谱关系式为 $\phi_t(\lambda) = \phi'_r(\lambda)$ 。

由FBG构成的FFP干涉型传感系统如图1所示。宽带光源发出的光首先通过起偏器和偏振控制器,经过环形器在FBG_A和FBG_B分别发生反射,然后进入Michelson型解调干涉仪,最后被光电探测器接收。采用弱反射率光栅的F-P腔光谱通常近似为双光束干涉。由于每个干涉仪的光程差(OPD)都远远大于光栅反射光的相干长度,因此Michelson

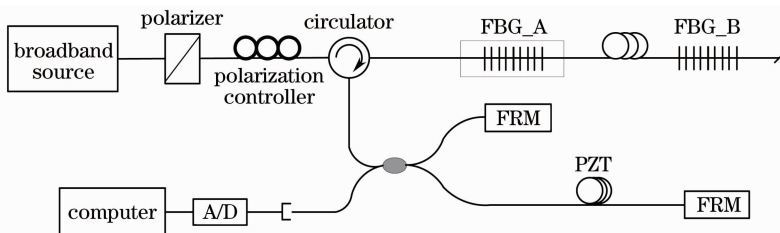


图1 干涉型FFP传感系统
Fig. 1 Interferometric FFP sensor system

解调干涉仪的输出中只有路径匹配的两个光束发生干涉。在输出端的干涉光复振幅可以表示为

$$I(\nu) = r_A + r_A \exp(j2\beta L_M) + t_A t'_A r_B \exp(j2\beta h) + t_A t'_A r_B \exp(j2\beta h) \exp(j2\beta L_M), \quad (3)$$

式中 h 为两光栅间距, L_M 为 Michelson 干涉仪的臂差, 下标 A 和 B 分别表示 FBG_A 和 FBG_B 的相关参量。由(2)式, 在 FBG 零点带宽内的光强可以表示为

$$|I(\nu)|^2 = 2|r_A|^2 + 2|r_B|^2 + 2|r_A r_B| \cos(2\pi\nu\tau + \varphi_0), \quad (4)$$

式中 ν 为光频率, 时延 $\tau = n(2h + L_A + L_B - 2L_M)/c$, c 为真空中光速, L_A 和 L_B 分别为相应光栅的长度。固定相位差由两光栅的非对称性引入, 为 $\varphi_0 = \beta_A L_A - \beta_B L_B$, 其中 $\beta_A = 2\pi n/\lambda_A$, $\beta_B = 2\pi n/\lambda_B$, λ_A 和 λ_B 为两光栅中心波长。

2.1 高斯波形近似

通常, 低反射率 FBG 的反射谱可以近似为高斯曲线, 因此 FBG_A 的反射谱可以表示为^[17]

$$|r_A|^2 = G(\nu_A) = \frac{I_0}{\Delta\nu_0} \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi}} \times \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\nu - \nu_A)^2}{\Delta\nu_0^2}\right], \quad (5)$$

式中 I_0 为 FBG_A 的反射光强度, ν_A 和 $\Delta\nu_0$ 分别为中心光频率和带宽。不失一般性, 假设两个 FBG 具有相同的光谱波形和不同的中心频率。那么, 光谱失配可以表示为两个 FBG 反射谱中心光频率的偏移。此外, 有积分公式

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(\nu_A) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu = I_0 \exp(-j2\pi\nu_A \tau) \exp\left(-\frac{\pi^2 \Delta\nu_0^2 \tau^2}{4\ln 2}\right). \quad (6)$$

利用(6)式描述的积分公式, 对(4)式在全光频段积分可以得到光电探测器接收到的总光强为

$$I_{\text{out}} = 4I_0 + 2I_0 \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\nu_A - \nu_B}{\Delta\nu_0}\right)^2\right] \times \exp\left(-\frac{\pi^2 \Delta\nu_0^2 \tau^2}{4\ln 2}\right) \cos[\pi\tau(\nu_A + \nu_B) + \varphi_0], \quad (7)$$

式中 ν_B 为 FBG_B 反射谱的中心光频率。(7)式中的干涉条纹可见度包含两项, 分别为两个 FBG 光谱失配和两个串联干涉仪臂差非平衡的影响。当 $\nu_A = \nu_B$ 和 $\tau = 0$ 时, 系统可以得到最大可见度 $V = 50\%$ 。进一步, 可见度函数可以表示为

$$V = 0.5 \exp(-\ln 2 \Delta\nu^2) \exp(-3.56 \Delta L^2), \quad (8)$$

式中, 归一化中心光频偏移 $\Delta\nu = (\nu_A - \nu_B)/\Delta\nu_0$, 以反

射光相干长度归一化的臂差失配 $\Delta L = \tau\Delta\nu_0$ 。归一化的光谱失配和臂差失配分别引起的可见度变化对比如图 2 所示。可见, 光谱失配会引起干涉条纹可见度的强烈变化, 从而系统信噪比 (SNR) 降低引起探测精度变差。当两 FBG 光谱中心波长偏移为光栅零点带宽时, 即两光栅光谱完全不重合, $\Delta\nu = 2$, 由(8)式计算得到可见度约为 0, 理论结果与实际情况相符。

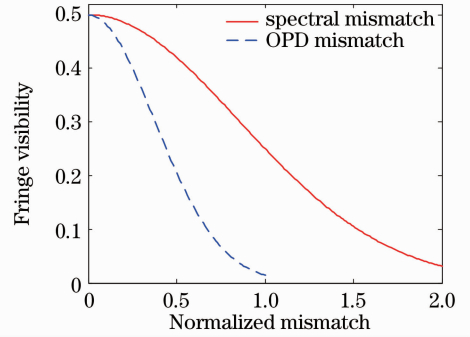


图 2 光谱和臂差失配引起的可见度变化曲线

Fig. 2 Fringe visibility variations induced by spectral mismatch and OPD mismatch respectively

2.2 带旁瓣的高斯波形近似

(5)式具体地描述高斯切趾光栅的光谱特性。对于采用普通均匀光栅的 FFP 传感系统, FBG 反射谱的旁瓣和相应频段的相位谱都需考虑。通常, 低反射率 FBG 的 ± 1 阶旁瓣的中心光频率约为 $\nu_{A\pm 1} = \nu_A \pm 3\Delta\nu_A/2$, 峰值约为光栅反射率的 $1/20$ ^[23]。因此, 带旁瓣的高斯波形近似的光栅反射谱可以表示为

$$|r_A(\nu)|^2 = G(\nu_A) + \frac{1}{20} G\left(\nu_A + \frac{3\Delta\nu_A}{2}\right) + \frac{1}{20} G\left(\nu_A - \frac{3\Delta\nu_A}{2}\right). \quad (9)$$

此时, FBG_A 反射的总光强为 $1.1I_0$ 。由于每个 FBG 反射光谱可分为 3 个光谱成分, 因此两光栅反射光的总干涉强度含有 9 项, 可以分为主瓣反射光之间的干涉 A_1 、旁瓣反射光之间的干涉 A_2 和主瓣与旁瓣反射光的干涉 A_3 三个部分。令 $\nu_{A\pm 1}$ 和 $\nu_{B\pm 1}$ 分别表示 FBG_A 和 FBG_B 反射光谱的 ± 1 阶旁瓣的中心光频率。 A_1 和 A_2 为 5 对光谱 $G(\nu_{A-1})$ 和 $G(\nu_{B-1})$, $G(\nu_A)$ 和 $G(\nu_B)$, $G(\nu_{A+1})$ 和 $G(\nu_{B+1})$, $G(\nu_{A-1})$ 和 $G(\nu_{B+1})$, $G(\nu_{A+1})$ 和 $G(\nu_{B-1})$ 的干涉结果。由(2)和(7)式易知, 这 5 对反射光谱的干涉结果具有与(7)式相同的干涉相位项, 因此光谱失配引起的可见度变化表示为

$$A_1 + A_2 = \exp(-\ln 2\Delta\nu^2) \times \left\{ 1 + \frac{1}{11264} [\exp(6\ln 2\Delta\nu) + \exp(-6\ln 2\Delta\nu)] \right\}, \quad (10)$$

式中 A_1 和 A_2 分别对应前 3 对和后 2 对光谱的结果。另外 4 对光谱是主瓣与旁瓣反射光之间的干涉,分别为 $G(\nu_{A-1})$ 和 $G(\nu_B)$, $G(\nu_A)$ 和 $G(\nu_{B-1})$, $G(\nu_A)$ 和 $G(\nu_{B+1})$, $G(\nu_{A+1})$ 和 $G(\nu_B)$ 。由(2)式易知,其单独的干涉相位项与(5)式不同。但是通过数学推导,4 项干涉结果的和值具有与(5)式相同的干涉相位,因此与光谱失配相关的可见度变化表示为

$$A_3 = -\frac{1}{11.7} \exp(-\ln 2\Delta\nu^2) [\exp(3\ln 2\Delta\nu) + \exp(-3\ln 2\Delta\nu)] \cos\left(\frac{3}{2}\pi\Delta L\right). \quad (11)$$

式中负号是由旁瓣频带与主瓣频带的反射相位差 π 弧度引入的。显然,干涉条纹可见度随光谱失配的变化是对称的,假设 $\nu_A \geq \nu_B$, 可得与光谱失配有关的可见度函数为

$$A_1 + A_2 + A_3 = \exp(-\ln 2\Delta\nu^2) \left[1 + \frac{1}{11264} \times \exp(6\ln 2\Delta\nu) - \frac{1}{11.7} \exp(3\ln 2\Delta\nu) \cos\left(\frac{3}{2}\pi\Delta L\right) \right]. \quad (12)$$

式中的三项相对强度随归一化中心光频偏移的变化曲线如图 3 所示。 A_1 为主瓣频带反射光相干结果,与(8)式相同。 A_2 描述旁瓣频带反射光的干涉结果,其幅度很小可近似忽略。 A_3 为主瓣频带和旁瓣频带反射光之间的干涉结果。理论上,由于主瓣反射光和旁瓣反射光在彼此频带的强度很小,其干涉强度应该为 0。但在图 2 中当 $\nu_A = \nu_B$ 时, A_3 不等于 0。这主要是由于(9)式对反射光谱的近似误差引起

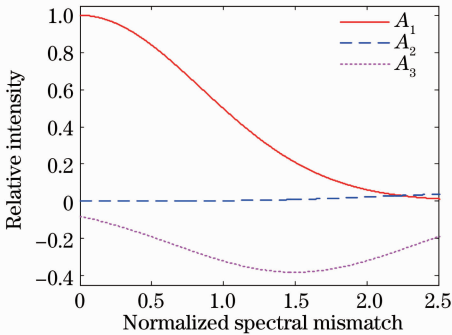


图 3 干涉条纹可见度中与光谱失配有关 3 项的相对强度

Fig. 3 Relative intensities of the three terms in the expression of the fringe visibility related to spectral mismatch

的。此外, A_3 具有较大的幅值,表明 FBG 反射谱的旁瓣会对传感系统的可见度有重要影响。

2.3 改进的高斯波形近似

由于(9)式在光栅反射谱近似中,使得旁瓣与主瓣反射光在彼此频带内有较大的强度,这一近似误差造成了(11)式中对 A_3 的计算偏差。对前述带旁瓣的高斯近似反射谱进行改进,考虑在不增加旁瓣高度的情况下减小旁瓣带宽为 $\Delta\nu_0/2$, 改进的高斯波形近似光栅反射谱表示为

$$|r_A(\nu)|^2 = G(\nu_A) + \frac{1}{40} G\left(\nu_{A+1}, \frac{\Delta\nu_0}{2}\right) + \frac{1}{40} G\left(\nu_{A-1}, \frac{\Delta\nu_0}{2}\right). \quad (13)$$

此时,FBG_A 反射光强为 $1.05I_0$ 。与前述分析相同,可以得到与光谱失配相关的可见度函数表示为

$$A_{1\text{mod}} + A_{2\text{mod}} + A_{3\text{mod}} = \exp(-\ln 2\Delta\nu^2) + \frac{1}{10} \cdot \exp(-4\ln 2\Delta\nu^2) - \frac{1}{735} \cdot \exp\left(\frac{-16\ln 2\Delta\nu^2}{5}\right) \times \exp\left(\frac{48\ln 2\Delta\nu}{5}\right) \cos\left[\frac{12\pi\Delta L}{5} + \frac{3\pi\tau(\nu_B - \nu_A)}{5}\right]. \quad (14)$$

式中 3 项的相对强度比较如图 4 所示。 $A_{3\text{mod}}$ 描述旁瓣与主瓣频带的反射光干涉结果,可以看到,当 $\nu_A = \nu_B$ 时 $A_{3\text{mod}} = 0$, 消除了(9)式对 FBG 反射谱的近似误差。

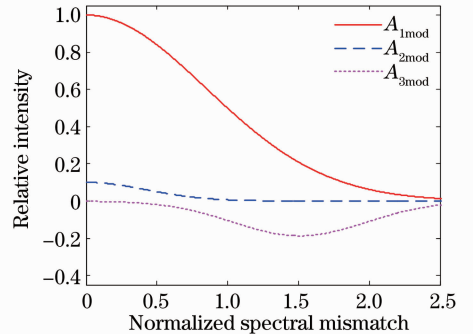


图 4 改进高斯近似光谱的干涉条纹可见度中 3 项的相对强度

Fig. 4 Relative intensities of the three terms in the expression of the fringe visibility based on modified Gaussian spectral approximation

3 实 验

采用两个反射率为 5.1% 的均匀 FBG 构成一个腔长约 4 m 的 FFP 干涉仪。两个 FBG 的折射率调制深度为 1×10^{-5} , 带宽为 63 pm, 中心波长分别为 1549.355 nm 和 1549.378 nm。FBG_A 的反射谱如图 5 所示。相比而言,高斯波形具有稍大的零点带宽。带旁瓣的高斯波形在反射谱 ± 1 阶零点处

有较大的值,这是由(6)式的近似误差引起的,导致图2中当 $\nu_A = \nu_B$ 时, $A_3 \neq 0$ 。改进的高斯波形与测量的反射谱拟合程度最好。

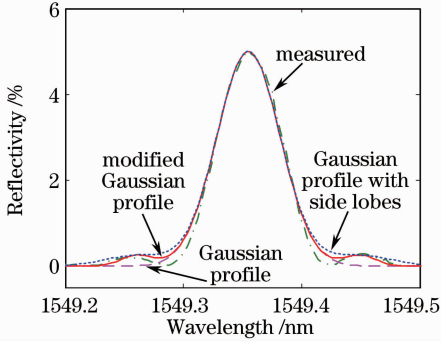


图5 FBG_A的反射谱和拟合的高斯光谱曲线

Fig. 5 Reflection spectrum of FBG_A and corresponding fitted Gaussian profiles

实验装置如图1所示。宽带光源由一个 ASE 光源、频带为 1549.1~1549.6 nm 的带通滤波器和一个掺铒光纤放大器(EDFA)组成。采用起偏器和偏振控制器实现输入偏振态控制方法,减小串联干涉仪的偏振衰落^[24,25]。对实验系统进行屏蔽,通过设置偏振控制器得到的系统最优可见度可以在相当长一段时间内保持稳定。FBG_A 被固定在一个金属框架上,通过框架对光栅施加应力使其中心波长增大,从而改变两光栅光谱失配程度。把 Michelson 干涉仪一个臂缠绕在压电陶瓷(PZT)晶体上,利用信号源在 PZT 晶体上加载正弦调制信号。光谱失配引起的干涉条纹可见度变化由如下方法测量:首先,在 F-P 腔中引入较大的弯曲损耗,通过光纤光栅解调干涉仪(Micron Optics sm125)同时测量两个 FBG 的反射谱,计算两光谱中心波长偏移量;然后,去掉弯曲损耗,把 F-P 腔连接到干涉系统中,通过调整偏振控制器测量系统最大的干涉条纹可见度;最后,通过金属框架改变施加在 FBG_A 上的应力,重复上述实验步骤。测量得到的光谱失配引入的可见度变化曲线如图6所示。

当中心波长偏差为 2 pm 时,系统得到最大的干涉条纹可见度为 47%。由(7)式可得两个串联干涉仪臂差匹配误差约 1 mm。图中理论曲线采用测量的 FBG 参数由(7)式计算得到,可见实验结果与理论曲线符合很好。显然,基于高斯切趾光栅和采用普通均匀光栅的干涉系统可见度受光谱失配影响的程度不同。由(8)式计算的可见度曲线具有单峰值特性,并且随光谱失配的变化较平缓。考虑旁瓣的高斯近似光谱的结果由(12)式计算得到,通过前

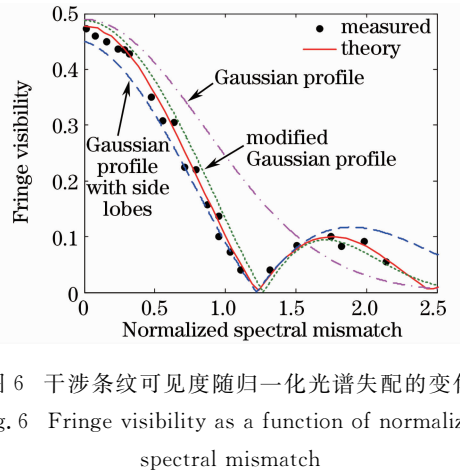


图6 干涉条纹可见度随归一化光谱失配的变化
Fig. 6 Fringe visibility as a function of normalized spectral mismatch

述分析,可知由于在反射谱±1阶零点处有较大的近似误差,使得图6中相应可见度曲线在光谱匹配时(即 $\nu_A = \nu_B$)与理论曲线有较大计算偏差。通过优化旁瓣带宽,基于改进高斯近似光谱的可见度曲线由(14)式计算得到,其与理论曲线符合很好。通过对采用均匀 FBG 的 F-P 干涉系统的可见度分析,可知虽然旁瓣的峰值只有光栅反射率的 1/20,其对光谱失配造成的可见度变化有重要影响。当归一化中心光频偏移达 2.5 时,可见度曲线具有双峰值特性,并且其对光谱失配变化更加敏感。由于基于高斯切趾光栅的传感系统可见度受光谱失配影响更小,且变化具有单峰值特性。因此从相位谱匹配的角度,不论是在静态参量还是在动态应力测量中高斯切趾光栅较采用普通均匀光栅的传感系统更优异。

此外,通过可见度分析易知,文献[18]中探测精度比理论值差 1 个数量级是由于两光栅光谱失配造成的。如果其采用的 Mach-Zehnder 型解调干涉仪匹配误差为 1 mm(实际操作较易实现),那么采用高斯切趾光栅的归一化光谱失配约 2.1,采用普通均匀光栅的失配量约 1.17 或 2.3。进一步分析,由于 Christmas 等^[18]在复合板中埋置 FBG 对振动传感,复合板制作需要高温冷却,其内部的内各向异性形变造成了两光栅较大的反射谱偏移,较合理地推测为 Christmas 采用带宽为 0.2 nm 的普通均匀 FBG 构成的 FFP 传感系统,在 1 mm 臂差匹配误差条件下两光栅光谱偏移约为 234 pm。基于上述分析,对采用埋置 FBG 的传感系统需要改进安装方法,减小各向异性形变引起的光谱失配程度,从而提高系统的传感性能。

4 结 论

本文采用高斯曲线近似光栅反射谱,理论与实

验分析了两光栅光谱失配引起的干涉型 FFP 传感系统的干涉条纹可见度变化。通过对高斯切趾光栅和普通均匀光栅反射谱分别建立理论模型,推导了可见度随光谱失配程度变化的表达式,理论分析与实验结果一致。研究表明,虽然反射谱中旁瓣峰值只有光栅反射率的 1/20,但其使系统干涉条纹可见度对光谱失配更加敏感,当两光栅光谱偏移一个零点带宽时可见度函数具有双峰值特性。由于基于切趾光栅的传感系统的可见度函数受光谱失配影响较小,且具有单峰值特性,因此从 FBG 光谱匹配的角度,其优于采用普通均匀光栅的传感系统。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. Recent progress in fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- 2 Wu Jing, Wang Ming. Application of radial basis function network in demodulation of Fabry-Perot pressure sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1145~1149
吴 婧, 王 鸣. 径向基函数神经网络在光纤法布里-珀罗传感器解调中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1145~1149
- 3 J. Wang, B. Dong, E. Lally *et al.*. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(5): 619~621
- 4 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Optical fiber Fabry-Perot strain sensor fabricated by using laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2202~2207
徐富国, 饶云江, 冉曾令. 激光微加工的光纤法布里-珀罗应变传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2202~2207
- 5 Y. Gong, T. Zhao, Y. J. Rao *et al.*. A ray-transfer-matrix model for hybrid fiber Fabry-Perot sensor based on graded-index multimode fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15844~15852
- 6 J. Liu, Y. Sun, X. Fan. Highly versatile fiber-based optical Fabry-Perot gas sensor[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2731~2738
- 7 S. C. Kaddu, S. F. Collins, D. J. Booth. Multiplexed intrinsic optical fibre Fabry-Perot temperature and strain sensors addressed using white-light interferometry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**(5): 416~420
- 8 Q. Wang, Q. Yu. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. *Chinese Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 266~269
- 9 H. Y. Choi, K. S. Park, S. J. Park *et al.*. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(21): 2455~2457
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixing *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1525~1531
樊 帆, 赵建林, 文喜星 等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1525~1531
- 12 Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanqing *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Perot interferometric sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1490~1495
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1490~1495
- 13 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张 乐, 吴 波, 叶 雯 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- 14 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson *et al.*. Ultra-high-sensitivity two-dimensional bend sensor[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(9): 520~521
- 15 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, C. K. Kirkendall. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Perot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3798~3806
- 16 H. S. Kim, R. P. H. Haaksman, T. P. Newson *et al.*. Noise properties and phase resolution of interferometer systems interrogated by narrowband fiber ASE sources[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2327~2335
- 17 C. Z. Shi, H. L. Ho, W. Jin *et al.*. Noise limit in heterodyne interferometer demodulator for FBG-based sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10): 2287~2295
- 18 S. P. Christmas, D. A. Jackson, P. J. Henderson *et al.*. High-resolution vibration measurements using wavelength-demultiplexed fibre Fabry-Perot sensors[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 901~905
- 19 A. V. Buryak, D. Y. Stepanov. Correction of systematic errors in the fabrication of fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13): 1099~1101
- 20 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~238
- 21 Z. G. Guan, D. Chen, S. He. Coherence multiplexing of distributed sensors based on pairs of fiber Bragg gratings of low reflectivity[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2143~2148
- 22 Niu Siliang, Rao Wei, Jiang Nuan *et al.*. Investigation on phase spectra of fiber Bragg gratings and the constructed Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806007
牛嗣亮, 饶 伟, 姜 暖 等. 光纤布拉格光栅及其构成的法布里-珀罗腔的相位谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806007
- 23 R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*[M]. London: Academic, 2010. 149~151
- 24 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge *et al.*. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10): 1599~1609
- 25 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, C. K. Kirkendall. Polarization properties of interferometrically interrogated fiber Bragg grating and tandem-interferometer strain sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1787~1795