

用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究

赵 艳^{1,2} 王代华^{1,2}

(¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)
(²重庆大学光电工程学院精密与智能实验室, 重庆 400044)

摘要 光楔是实现光纤法布里-珀罗(F-P)传感器互相关解调的重要光学元件。根据互相关解调的原理分析了造成光楔和光纤 F-P 传感器 F-P 腔的反射光相位不同的因素,进而建立了光楔的干涉光强的数学模型,在此基础上对具有不同反射率的光楔的干涉光强进行了数值仿真,和相同反射率的光纤 F-P 传感器 F-P 腔的干涉光强对比之后建立了光楔的简化数学模型。对光楔的简化数学模型进行的误差分析表明:当光楔的楔角小于 0.1° 且两端面反射率乘积不大于 9% 时,光楔的简化数学模型引入的误差小于 0.6%。光楔的数学模型为建立基于互相关解调的光纤 F-P 传感系统以及进一步提高系统的解调精度奠定了理论基础。

关键词 物理光学;光楔;数学模型;光纤法布里-珀罗(F-P)传感器;互相关解调

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0106007

Mathematical Model of Optical Wedges for Cross-Correlation Demodulation of Cavity Length of Optical Fiber Fabry-Pérot Sensors

Zhao Yan^{1,2} Wang Daihua^{1,2}

(¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)
(²Precision and Intelligence Laboratory, Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract The optical wedge plays a vital role in the cross-correlation demodulation system of optical fiber Fabry-Pérot(F-P) sensors. A mathematical model for the light intensity reflected from the optical wedge is established based on analyzing results of the factors that cause the interference optical phase differences between the optical wedge and the F-P cavity of optical fiber F-P sensors according to the cross-correlation demodulation principle. The light intensity reflected from the optical wedges with different reflectivity combinations are numerically simulated and a simplified mathematical model for the light intensity reflected from the optical wedge is established by comparing the light intensity reflected from the optical wedge with those from the F-P cavity with the same reflectivity combinations. The analysis results of errors between the simplified mathematical model and the mathematical model indicate that the error of the simplified mathematical model for optical wedges is less than 0.6% when the optical wedge angle is less than 0.1° and the product of two surfaces' reflectivity is not more than 9%. The simplified theoretical model of the optical wedges lays a theoretical foundation for establishing optical fiber F-P sensor systems

收稿日期: 2010-04-06; **收到修改稿日期**: 2010-09-13

基金项目: 重庆市科委自然科学基金(2009BA5072)和高等学校科技创新工程重大项目(706048)资助课题。

作者简介: 赵 艳(1976—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感和光学仪器等方面的研究。

E-mail: zyantumn@cqu.edu.cn

导师简介: 王代华(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事智能结构与系统、传感技术及系统、光纤传感技术、多维精密定位/振动控制和微装配技术等方面的研究。E-mail: dhwang@cqu.edu.cn(通信联系人)

based on the cross-correlation demodulation principle and further improving the accuracy of the demodulation system.

Key words physical optics; optical wedge; mathematical model; optical fiber Fabry-Pérot (F-P) sensor; cross-correlation demodulation

OCIS codes 060.2370; 260.3160; 120.2230

1 引 言

与传统传感器相比,光纤法布里-珀罗(F-P)传感器具有体积小、重量轻、动态范围大、抗电磁干扰能力强、便于远距离遥测和复用等优点,是目前技术较为成熟并在测量和控制方面应用普遍的一种光纤传感器^[1]。光纤 F-P 传感器主要由两个高反射膜层相对平行放置构成的具有一定腔长的 F-P 腔组成^[2~4]。当外界参量(力、形变、位移和液压等)以一定方式作用于 F-P 腔引起腔长变化时导致其干涉输出信号也发生相应变化^[5~7]。如何从干涉信号的变化导出 F-P 腔的长度,进而推算出外界参量的变化,从而实现各种参量的传感是光纤 F-P 传感器解调的关键。

光纤 F-P 传感器的相位解调是通过光纤 F-P 传感器输出信号的强度、相位和腔长的关系解调出腔长,解调较为复杂,但是比较精确,是目前应用较为普遍的解调方法^[8]。相位解调法主要有条纹计数法^[9]、傅里叶变换解调法^[10,11]、离散腔长变换解调法^[12]和相关解调法^[13~15]等。采用光楔和光纤 F-P 传感器的光强输出进行互相关运算的互相关解调法不需要贵重的光谱接收装置,同时又避免使用高重复性的机械运动,具有结构紧凑、精密与快捷的优点,可以实现解调系统长期的稳定性和较高的精度。但是在以往文献^[11~15]仅提到了互相关解调的基本原理和相应的实验结果,未见关于互相关解调的理论研究工作的报道,而且在采用光楔互相关原理解调的系统中,光楔是实现光纤 F-P 传感器互相关解调的重要光学元件,目前并没有对光楔的数学模型进行研究与分析。

本文根据互相关解调的原理,通过研究光楔各个反射光的振幅和相位之间的关系,分析造成光楔和光纤 F-P 传感器 F-P 腔的反射光相位不同的因素,进而建立了光楔的干涉光强的数学模型。在此基础上对具有不同反射率的光楔的干涉光强进行了数值仿真,并与具有相同反射率的光纤 F-P 传感器 F-P 腔的干涉光强对比之后建立了光楔的简化数学模型。研究和分析了光楔的端面反射率和楔角变化时光楔的简化数学模型引起的误差。

2 基于光楔互相关解调的光纤 F-P 传感器系统结构及原理

基于光楔互相关解调的光纤 F-P 传感器系统结构原理如图 1 所示。根据图 1,光纤 F-P 传感器系统由宽带光源、光纤 F-P 传感器、解调装置和信号处理四部分组成,其中解调装置包括准直透镜、光楔和线阵 CCD。

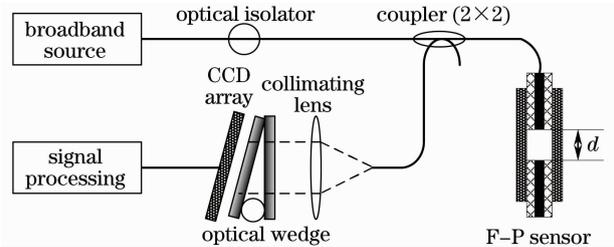


图 1 基于光楔互相关解调的光纤 F-P 传感器系统原理
Fig. 1 Schematic of the optical fiber F-P sensor based on the cross-correlation demodulation with the optical wedge

在采用互相关原理解调的系统中,宽带光源发出的光经耦合器传输至光纤 F-P 传感器,在传感器的 F-P 腔被外界参量调制形成的反射光准直后入射到光楔,调制光通过光楔的输出光相当于对 F-P 传感器 F-P 腔的反射光强进行了互相关运算后呈空间分布的光强,输出光强经过 CCD 进行光电转换,CCD 的转换输出信号经过信号处理得到互相关峰值处所对应的光楔楔厚,此处光楔的楔厚即是光纤 F-P 传感器 F-P 腔的腔长,而由 F-P 腔的腔长与外界参量的关系进而得到外界参量的变化值。

光楔是互相关解调法中与光纤 F-P 传感器 F-P 腔的输出进行相关运算的关键元件,因此光楔在与 F-P 腔腔长相等的楔厚处的输出光强与光纤 F-P 传感器的输出光强是否相似就至关重要。

3 光楔的数学模型

如图 2 所示,光楔 S_1OS_2 由楔角为 θ (小于 0.1°) 的上下平面 S_1 和 S_2 组成。

当光楔界面反射率比较高时,光在光楔内进行多次反射的反射点发生移动导致相邻两次反射光的相位差不再是常数。考虑波长为 λ 的单色光垂直入

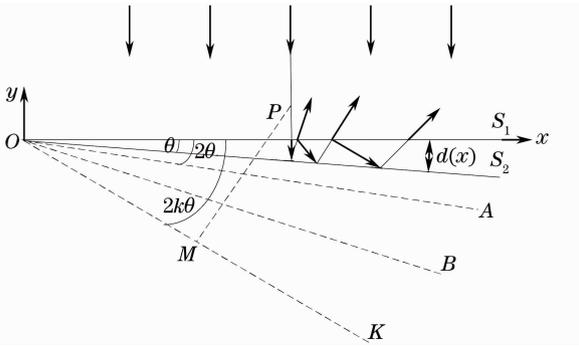


图2 入射光在光楔中的多次反射

Fig. 2 Multiple reflections of the incident light in the optical wedge

射到光楔 S_1OS_2 (图2), 光楔反射光的光强 I_r 为各个反射光复振幅矢量之和的模的平方^[16], 可表示为

$$I_r = \left[\left(\sum_{k=0}^{\infty} E_k \cos \varphi_k \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{\infty} E_k \sin \varphi_k \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中 E_k 和 φ_k 分别是第 $k+1$ 次反射光的振幅和相位。下面先分别分析光楔各反射光振幅之间的关系和光楔各反射光相位之间的关系, 在此基础上得到光楔的数学模型。

3.1 光楔各反射光的振幅之间的关系

设 r 和 t 分别为光束从周围介质入射到光楔时在界面处振幅的反射系数和透过系数, r' 和 t' 分别为光束从光楔入射到周围介质时的振幅反射系数和透过系数, 反射系数和透过系数的下标 1 和 2 分别代表界面 S_1 和 S_2 , 入射光的振幅为 E_0 , 从光楔反射的各束光振幅分别为

$$r_1 E_0, t_1 t'_1 r'_2 E_0, t_1 t'_1 r'_1 r'_2 E_0, t_1 t'_1 r'_1 r'_2 r'_3 E_0, \dots$$

反射的各束光的振幅除第一项外, 其余振幅则是初项为 $t_1 t'_1 r'_2 E_0$ 公比为 $r'_1 r'_2$ 的等比级数。

假设反射面上没有吸收, 利用菲涅耳公式容易证明各界面的振幅反射系数和透过系数间满足: $r = -r', t' = 1 - r^2$, 并且界面的反射率 $R = r^2$, 考虑到能量守恒则透射率 $T = 1 - R$ 。将各反射光的振幅关系代入(1)式得到反射光的光强为

$$I_r = I_0 \left[\left(-r'_1 + \sum_{k=1}^{\infty} T_1 r_1^{k-1} r'_2{}^k \cos \varphi_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{\infty} T_1 r_1^{k-1} r'_2{}^k \sin \varphi_k \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 I_0 为光楔入射光的光强。

3.2 光楔各反射光的相位之间的关系

为了研究光楔各反射光的相位之间的关系, 建立如图2所示的坐标系: 以构成光楔的两界面的延长线的交点为坐标原点, 沿着光楔界面 S_1 的方向为 x 轴, 与 S_1 面垂直的方向为 y 轴。在坐标系中研究与 x 轴的

夹角为 $2k\theta$ ($k = 1, 2, \dots$) 的镜面 $OA, OB \dots OK \dots$ 。当光垂直入射时, 面 $OA, OB \dots OK$ 依次是第 2 次, 第 3 次 \dots 第 $k+1$ 次反射光的等效波面^[13]。各反射光在观测点 $P(x, y)$ 的光程差 l_k 为

$$l_k = x \sin(2k\theta) + y [\cos(2k\theta) - 1]. \quad (3)$$

对(3)式进行级数展开, 由于 θ 很小忽略 θ^4 及以上的高次项, 令 $x\theta = d$ (d 是观察点处的光楔厚度), 反射点移动引起的多次反射的光程差 l_k 和相位差 φ_k 为

$$l_k = 2kd \left[1 - \frac{2k^2}{3} \theta^2 \right] - 2yk^2 \theta^2, \quad (4)$$

$$\varphi_k = \frac{4\pi kd}{\lambda} \left(1 - \frac{2k^2}{3} \theta^2 \right) - \frac{4\pi}{\lambda} yk^2 \theta^2. \quad (5)$$

根据(5)式, 在相同的入射条件下, 与 F-P 腔的相位差 $4\pi kd/\lambda$ 相比较, 光楔的相位差中多了两项附加项, 不再是等差数列。但是如果观察点 P 在 x 轴上或者光源为扩展光源(干涉条纹定域在光楔面上)时, 第二个附加相位项为零。根据(4)式和(5)式, 在这种情况下光楔的光程差和相位差分别为

$$l_k = 2kd \left[1 - \frac{2k^2}{3} \theta^2 \right], \quad (6)$$

$$\varphi_k = \frac{4\pi kd}{\lambda} \left(1 - \frac{2k^2}{3} \theta^2 \right). \quad (7)$$

根据(5)式, 光楔的相位差中第一个附加项与楔厚 d 和反射次数 k 有关, 随着楔厚 d 和反射次数 k 的增加, 此附加项对反射光强的影响也越来越大。如果第一个附加项引起的相位差不大于 π 则可以忽略此项^[16], 即

$$\frac{8\pi k^3 d \theta^2}{3\lambda} \leq \pi. \quad (8)$$

由(8)式可知, 当忽略相位差第一附加项时楔厚需满足

$$d \leq \frac{3\lambda}{8k^3 \theta^2}. \quad (9)$$

根据(9)式, 反射次数以 3 次方的形式影响楔厚, 反射次数越多满足(9)式的楔厚越小, 而楔面的反射率越高, 反射次数就越多。因此对高反射率的光楔在从 0 到满足(9)式的极小楔厚情况下才可用于 F-P 腔的解调。在光楔面上进行观察并且楔厚满足(9)式的前提下, 光楔的第 k 次反射光所对应的光程差和相位差表达为

$$l_k = 2kd, \quad (10)$$

$$\varphi_k = \frac{4\pi kd}{\lambda}. \quad (11)$$

当对光楔面处的反射光进行观测, 反射光的相位差可以用(7)式描述。将(7)式代入(2)式, 光楔反

射光的光强的数学模型为

$$I_r = I_0 \left\{ \left\{ -r_1' + \sum_{k=1}^{\infty} T_1 r_1'^{k-1} r_2'^k \cos \left[\frac{4\pi kd}{\lambda} \left(1 - \frac{2k^2 \theta^2}{3} \right) \right] \right\}^2 + \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} T_1 r_1'^{k-1} r_2'^k \sin \left[\frac{4\pi kd}{\lambda} \left(1 - \frac{2k^2 \theta^2}{3} \right) \right] \right\}^2 \right\}. \quad (12)$$

对(12)式进行数值运算就可得到光楔反射光的光强。由于在不考虑吸收损耗的理想情况下光楔透射光的光强与反射光的光强成互补关系,由入射光光强 I_0 减去光楔反射光的光强 I_r 即可得到光楔透射光的光强 I_t 的数学模型,可表示为

$$I_t = I_0 - I_r. \quad (13)$$

4 光楔数学模型的仿真分析

为了分析光楔在与 F-P 腔腔长相同的楔厚处的输出光强与光纤 F-P 传感器 F-P 腔的输出光强是否相似,需要得到 F-P 腔的输出光强表达式。(2)式同样适用于 F-P 腔的反射光光强计算,其中反射光的相位差由(11)式确定。将(11)式代入(2)式可以得到平行光垂直入射时 F-P 腔的反射光光强表达式为

$$I_{\text{FPr}} = I_0 \frac{r_1'^2 + r_2'^2 - 2r_1' r_2' \cos \frac{4\pi d}{\lambda}}{1 + r_1'^2 + r_2'^2 - 2r_1' r_2' \cos \frac{4\pi d}{\lambda}}. \quad (14)$$

考虑光源波长 λ 为 $0.55 \mu\text{m}$,输入为单位光强 $I_0=1$,采用(12)式和(14)式对光楔和 F-P 腔的光强进行仿真输出和对比分析,在此基础上简化光楔的数学模型并对简化模型进行误差分析。

4.1 光楔的光强输出

考虑光楔楔角 $\theta=0.06^\circ$,当光楔和 F-P 腔的端面均为低反射率($r_1 = r_2 = 0.20, R = 4\%$)和高反射率($r_1 = r_2 = 0.95, R = 90\%$)时仿真得到的光束干涉的反射光强输出随楔厚和腔长的变化曲线分别如图 3 和图 4 所示,当光楔和 F-P 腔两端面有不同反射率(一个面为 90% ,另一个面 4%)时仿真得到的光束干涉的反射光强输出随楔厚和腔长的变化曲线如图 5 所示。根据图 3 和图 4,两端面均为低反射率时光楔的楔厚和 F-P 腔的腔长为几毫米处光楔和 F-P 腔反射光强的输出仍然相同,当两端面的反射率均很高时光楔与 F-P 腔仅在楔厚和腔长很小处反射光强输出相同,在楔厚和腔长为几微米处的反射光强值不再相同,用图 4 中光楔光强极值处的楔厚 $2.750 \mu\text{m}$ 表示 F-P 腔对应极值处的腔长将

会有 0.2% 的误差,并且此误差将会随楔厚和腔长的增加而变化。根据图 5,两端面的反射率不同时光楔和 F-P 腔在较长楔厚和腔长下的反射输出光

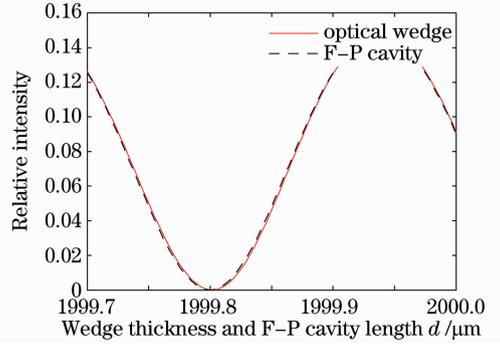


图 3 低反射率时光楔和 F-P 腔的反射光强
Fig. 3 Light intensity reflected from the optical wedge and the F-P cavity with low reflectivity

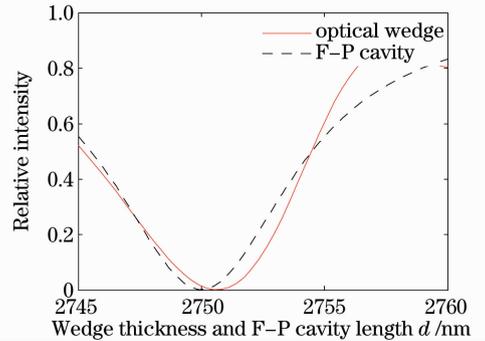


图 4 高反射率时光楔和 F-P 腔的反射光强
Fig. 4 Light intensity reflected from the optical wedge and the F-P cavity with high reflectivity

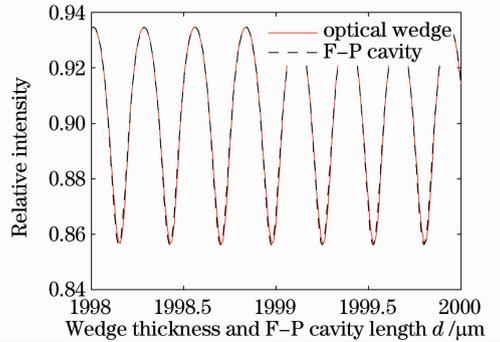


图 5 反射率为 90% 和 4% 时光楔和 F-P 腔的反射光强
Fig. 5 Light intensity reflected from the optical wedge and the F-P cavity with reflectivity of 90% and 4%

强的图样仍然相同,并且输出光强的强度相对两端面均为低反射率时的强度有所改善。

根据以上仿真分析,当光楔的两端面均具有高反射率时,光楔的光强输出与 F-P 腔的光强输出在相同的楔厚和腔长处有较大的差别,不适合用来解调 F-P 传感器。当光楔两端面均具有较低反射率或端面反射率的乘积较低时,光楔与 F-P 腔的输出在较长楔厚和腔长处均相同,可以近似用(14)式 F-P 腔的输出光强作为光楔的输出光强,即在这种情况下光楔的反射光强为

$$\bar{I}_r = I_0 \frac{r_1'^2 + r_2'^2 - 2r_1'r_2' \cos \frac{4\pi d}{\lambda}}{1 + r_1'^2 r_2'^2 - 2r_1'r_2' \cos \frac{4\pi d}{\lambda}}, \quad (15)$$

在不考虑光楔的吸收损耗时光楔的透射光强与反射光强互补,光楔的透射光强 I_t 可近似为

$$\bar{I}_t = I_0 \frac{(1 - r_1'^2)(1 - r_2'^2)}{1 + r_1'^2 r_2'^2 - 2r_1'r_2' \cos \frac{4\pi d}{\lambda}}, \quad (16)$$

(15)式和(16)式分别为光楔的反射光强和透射光强的简化数学模型。根据光纤 F-P 传感器的光楔互相关解调原理,光楔的简化数学模型[由(15)式和(16)式确定]相对于光楔的数学模型[由(12)式和(13)式确定]清晰地、直观地反映出互相关峰值处的光楔楔厚即是光纤 F-P 传感器 F-P 腔的腔长。除此之外,光楔的简化数学模型与 F-P 腔的输出进行互相关运算的仿真时,程序运行时间较短,有利于对基于光楔的光纤 F-P 传感器互相关的理论研究和分析。

4.2 光楔简化数学模型的误差分析

用光楔的简化模型(15)式或(16)式和光纤 F-P

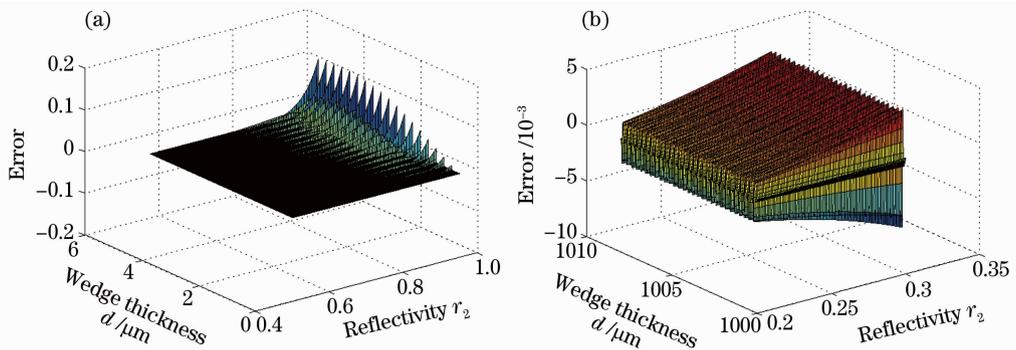


图6 光楔 S_1 面的反射率为 90% 时光楔简化模型的误差。(a) S_2 面具有高反射率, (b) S_2 面具有低反射率

Fig. 6 Errors of the simplified mathematical model for optical wedges with 90% reflectivity of the surface S_1 and

(a) high reflectivity of the surface S_2 and (b) low reflectivity of the surface S_2

4.2.2 光楔楔角对误差的影响

考虑到光楔楔面反射率乘积在不大于 9% 时光楔简化模型引入的误差比较小,并且当 F-P 腔两反

传感器 F-P 腔光强输出(14)式实现互相关运算,会引入误差。以(12)式给出的 I_r 与(15)式给出的 \bar{I}_r 之间的差值作为光楔简化模型引入的误差($E = I_r - \bar{I}_r$, 其中 $I_0 = 1$)。下面对光楔简化模型引入的误差与光楔面的反射率、楔角、楔厚和光源波长之间的关系进行分析。

4.2.1 光楔反射率对误差的影响

考虑光楔的楔角 $\theta = 0.06^\circ$ 。当 S_1 面的反射率为 90%, S_2 面的反射率分别为高反射率和低反射率时光楔简化模型引入的误差随楔厚和 S_2 面的反射率变化的仿真结果如图 6(a)和图 6(b)所示。当 S_1 面的反射率为 4% 时光楔简化模型引入的误差随楔厚和 S_2 面的反射率变化的仿真结果如图 7 所示。根据图 6(a),当光楔两端面均为高反射率时,仅在楔厚小于 $1 \mu\text{m}$ 处光楔简化模型引入的误差小于 1%,在楔厚等于 $5 \mu\text{m}$ 处引入的误差已接近 10%。根据图 6(b),当 S_1 面的反射率为 90% 而 S_2 面的反射率低于 10% 时,在楔厚等于 1 mm 左右处引入的误差仍小于 0.6%。根据图 7,当光楔 S_1 面为低反射率 4% 且 S_2 面的反射率低于 25% 时光楔简化模型引入的误差几乎不随腔长变化,而仅随 S_2 面反射率的增加而变化,引入的最大误差小于 0.3%。

因此从误差角度来看,两端面均为高反射率的光楔不适于 F-P 腔的解调。但是当光楔面的反射率比较低且两端面反射率的乘积不大于 9%,测量腔长不大于 1 mm 的 F-P 腔时,用(15)式来描述光楔的反射输出光强引入的误差小于 0.6%。

楔角从 0.01° 到 0.9° 之间变化(楔厚为 $100\ \mu\text{m}$)时,光楔简化模型引入的误差随楔角和反射率的变化情况,仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知,光楔简化模型的误差随楔角的增加逐渐增大,但其值不大于 0.08% ,与反射率引入的误差相比可以忽略不计。

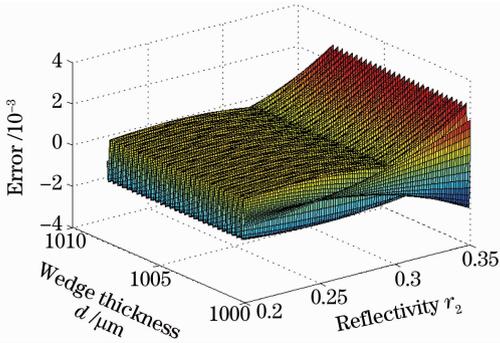


图 7 光楔 S_1 面的反射率为 4% 时光楔简化模型的误差
Fig. 7 Error of the simplified mathematical model for optical wedges with 4% reflectivity of the surface S_1

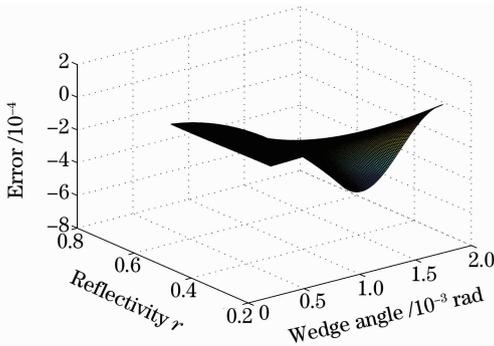


图 8 不同楔角时的光楔简化模型的误差
Fig. 8 Error of the simplified mathematical model for optical wedges with different wedge angles

4.2.3 光源波长对误差的影响

根据光纤 F-P 传感器的互相关解调原理,系统的光源为宽带光源,并且光源带宽越宽越有利于信号的解调^[8]。图 9 是光楔两端面反射率为 30% ,楔角为 0.06° ,波长从 $0.4\ \mu\text{m}$ 到 $1.5\ \mu\text{m}$ 之间变化时,光楔简化模型引入的误差随波长和楔厚的变化情况的仿真结果。根据图 9 光楔简化模型的误差随波长的增大逐渐减小,误差不大于 0.6% 。

从以上的仿真分析可知,当光楔的楔角小于 0.1° 且两端面反射率乘积在不大于 9% 时光楔简化数学模型引入的误差小于 0.6% ,可以用于光纤 F-P 传感器的互相关解调。当光楔的参数不满足以上限制条件,光楔简化数学模型引入的误差急剧增加,光楔不适合用于光纤 F-P 传感器的互相关解调。

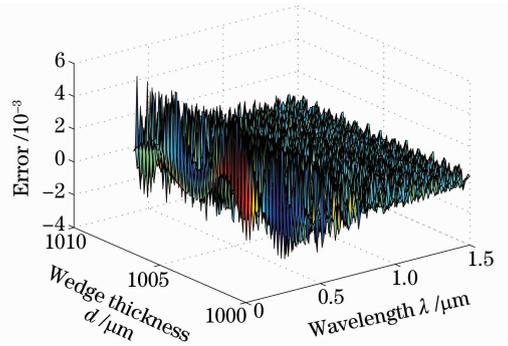


图 9 不同波长时的光楔简化模型的误差
Fig. 9 Error of the simplified mathematical model for optical source with different wavelength

5 结 论

建立了光楔的干涉光强的数学模型,并对其进行数值仿真,在此基础上得到了光楔的简化数学模型。重点分析了光楔用于光纤 F-P 传感器的互相关解调时,光楔端面反射率和楔角对解调精度的影响。仿真分析结果表明:当光楔的楔角小于 0.1° 且两端面反射率乘积不大于 9% 时,光楔的简化数学模型引入的误差小于 0.6% 。光楔的数学模型为建立基于互相关解调的光纤 F-P 传感系统以及进一步提高系统的解调精度奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Lee B.. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57~79
- 2 Li Wenbo, Zhou Wangmin, Wei Zhiwu *et al.*. Analysis of edge characteristics of grating and cavity of fiber grating-based Fabry-Pérot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2355~2360
李文博, 周王民, 魏志武 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔的腔、栅边缘特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2355~2360
- 3 Yang Minghong, Sun Yan, Li Xiaobin *et al.*. Optical fiber sensors based on Fabry-Pérot multilayer coatings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(S1): 189~191
- 4 Tang Caijie, Jiang Yi. High-finesse micro-lens optical fiber Fabry-Pérot Interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1062~1065
唐才杰, 江毅. 高精细度微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1062~1065
- 5 Wang Qiaoyun, Yu Qingxu. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Pérot acoustic sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 266~269
- 6 Bi Weihong. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical Fabry-Pérot interferometric cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 873~878
毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 873~878
- 7 Lü Tao, Liu Desen, He Kaihua. Output characteristics of high-precision optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic and sensitive Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1614~1618

- 吕 涛, 刘德森, 何开华. 非本征敏感法布里-珀罗腔高精度光纤液位传感器输出特性[J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1614~1618
- 8 Jin Wei, Ruan Shuangchen. Progress of Optical Fiber Sensing Technology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 257~279
- 靳 伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 257~279
- 9 Chang C. C., Sirkis. J.. Absolute phase measurement with extrinsic Fabry-Pérot optical fiber sensors[C]. *SPIE*, 1996, **2839**: 111~121
- 10 Liu T., Frenando G. F.. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Pérot sensor system for strain and displacement measurements[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(3): 1275~1287
- 11 Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(2): 75~77
- 12 Chen Yusen. Algorithms and Multiplexing of Fiber Fabry-Pérot Strain Sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. 16~20
- 陈雨森. 光纤法珀应变传感器的解调算法改进和复用技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003. 16~20
- 13 Chung E. Lee, Henry F. Taylor. Fiber-optic Fabry-Pérot temperature sensor using a low-coherence light source[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(1): 129~134
- 14 Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 78~80
- 15 Hanying Liu, Don W. Miller. System model identification of a Fabry-Pérot fiber optic sensing system [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2002, **51**(3): 413~419
- 16 Kubota Guang. Physical Optics [M]. Liu Ruixiang Transl. Beijing: Science Press, 1983. 78~82
- 久保田广. 波动光学[M]. 刘瑞祥译. 北京: 科学出版社, 1983. 78~82