

空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究

孟祥娥^{1,2} 江俊峰^{1,2} 刘铁根^{1,2} 刘 琨^{1,2} 尹金德^{1,2} 王少华^{1,2}
王 双^{1,2} 张以谟^{1,2} 吴 凡^{1,2} 秦尊琪^{1,2}
(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
² 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 针对空间扫描型光纤法布里-珀罗(F-P)传感解调系统中 CCD 的光照度分布建立了数学模型,研究了不同帧扫描频率下 CCD 输出信号和信噪比。利用已设计的解调模块进行了 CCD 光照度分布的实验,实验结果表明,当帧扫描频率不同时,CCD 各个像素输出信号电压的实验值与计算值的相对误差均小于 2.5%,同一像素输出信号电压的实验值与计算值的相对误差变化数值均小于 0.005,随实验所用 CCD 帧扫描频率变化,信噪比以 184 Hz 为分界点以两种变化斜率改变,验证了数学分析模型的有效性。

关键词 光纤光学;光纤法布里-珀罗传感器;CCD;光照度;数学模型

中图分类号 TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1128006

Mathematical Model of Illumination of CCD in the Space Scanning Optical Fiber Fabry-Pérot Sensor Demodulation System

Meng Xiang^{1,2} Jiang Junfeng^{1,2} Liu Tiegen^{1,2} Liu Kun^{1,2} Yin Jinde^{1,2}
Wang Shaohua^{1,2} Wang Shuang^{1,2} Zhang Yimo^{1,2} Wu Fan^{1,2} Qin Zunqi^{1,2}

¹ College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A mathematical model of charge coupled device (CCD) illumination distribution for spatial scanning optical Fabry-Pérot (F-P) demodulation system is established, and a research on the output signal of CCD and its signal-to-noise ratio (SNR) is made. CCD illumination-distribution experiment is done using the designed demodulation module. And results show that the relative error between the experimental and calculated values of the CCD output voltage is less than 2.5%, and the change of relative error from the same pixel is less than 0.005 under different frame scan frequencies. The changing rate of SNR is different before and after 184 Hz with the change of frame scan frequency. Experiments are carried out to verify the validity of our established mathematical model.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Pérot sensor; CCD; illumination; mathematical model

OCIS codes 040.1520; 060.2370; 120.2230

1 引 言

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、抗电磁干扰能力强和便于远距离遥测等优点,是获得广泛应用的光纤传感器之一,在

收稿日期: 2012-05-10; **收到修改稿日期**: 2012-06-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(11004150, 61108070)、中国博士后科学基金资助项目(201003298)、教育部博士点新教师基金(200800561020)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目、天津市科技支撑计划(11ZCKFGX01900)、深圳市传感器技术重点实验室开放基金(SST201013)和天津大学自主创新项目(11070561207)资助课题。

作者简介: 孟祥娥(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤 F-P 传感解调方面的研究。E-mail: mx0214@foxmail.com

导师简介: 江俊峰(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感、光电检测和光纤偏振技术等方面的研究。

E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn (通信联系人)

民用基础设施的安全监测、航空航天等领域有很好的应用前景^[1~5]。针对光纤 F-P 传感器,研究人员提出了傅里叶变换解调、双波长解调和低相干干涉解调等多种光纤 F-P 传感解调方法^[6~10]。其中基于低相干干涉的空间扫描型光纤 F-P 解调方法通过光楔实现光程差的空间扫描,并采用线阵 CCD 接收光信号,完成光纤 F-P 传感器的腔长查询。由于没有移动部件,解调系统的稳定性好,可靠性高,非常适合于现场恶劣环境下应用。Chen 等^[11]通过 Michelson 干涉仪倾斜两个反射镜构成虚拟光楔,Dändliker 等^[12]利用 Wollaston 棱镜构成双折射光楔并研究了信号处理算法,Belleville 等^[13]利用 Fizeau 干涉仪构成光楔,Marshall 等^[14]利用 Mach-Zehnder 干涉仪构成虚拟光楔,赵艳等^[15]研究了光楔的互相关数学模型,李磊等^[16]研究了双折射光楔对光程差分布的影响。但关于线阵 CCD 信号的光照度分布和接收分析的研究鲜见报道。CCD 像素输出信号与积分时间和光照度有关,积分时间限制了解调速度,当积分时间一定的条件下,CCD 光敏面上光照度的分布影响 CCD 干涉信号质量和信噪比(SNR),进而影响到解调系统的解调精度和解调范围。对 CCD 逐个设计电路进行实验测试选择将耗时耗力,因此研究分析解调系统的 CCD 光照度模型对于解调系统的 CCD 优化选择和保证解调系统性能非常重要。同时也为灵活构建光纤 F-P 传感解调系统提供了理论指导。

2 空间扫描型光纤 F-P 传感解调原理

光纤 F-P 传感器将待测物理量转变成 F-P 腔长并由光纤 F-P 传感解调系统求取腔长信息。空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统基于低相干干涉原理构建,其结构如图 1 所示,由宽带光源、解调光路和数据采集电路三部分组成。其中解调光路包括

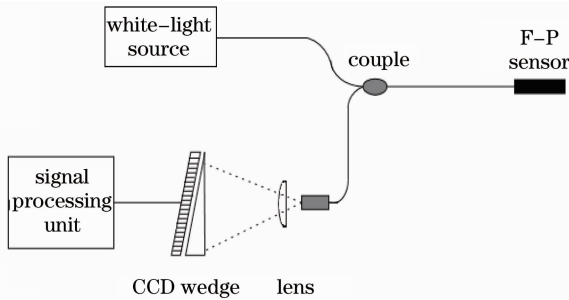


图 1 空间扫描型光纤 F-P 传感解调原理
Fig. 1 Schematic diagram of spatial scanning fiber F-P sensor demodulation principle

柱面镜、光楔和线阵 CCD。

宽带光源输出的光通过耦合器入射到光纤 F-P 传感器,经过光纤 F-P 传感器的两个端面反射后干涉,可近似成双光束干涉,光程差是 F-P 腔长的 2 倍。被调制过的光再次通过耦合器入射到柱面镜,柱面镜将入射光沿光楔宽度汇聚成长条线状,以提高光照度。光楔实现光程差的空间分布,当光楔引起的光程差与光纤 F-P 传感器引起的光程差相匹配时,在线阵 CCD 相应的局部位置产生低相干干涉条纹,通过搜寻低相干干涉条纹的峰值位置可推断出光纤 F-P 腔长。

3 解调光路中 CCD 的光照度模型

含有被测信息的调制光经过光纤 F-P 传感系统的解调光路,形成空间分布的低相干干涉光信号,经线阵 CCD 转换为电信号,线阵 CCD 是空间扫描型光纤 F-P 传感系统中重要的光电转换元件,因此需要建立 CCD 的光照度模型以及分析 CCD 输出信号的信噪比。

3.1 CCD 光照度的数学模型

解调光路中光从光纤出射,经柱面镜后汇聚成线型光带投射到 CCD 光敏面上,如图 2 所示,以线型光带投射面 ABCD 为 xOy 面建立直角坐标系,投射面 ABCD 的中心作为原点 O , z 轴方向为投射面 ABCD 的法线方向,光纤出射端面距原点 z_0 处。 $A'B'C'D'$ 为线阵 CCD 光敏面, θ 为光纤的发散角。

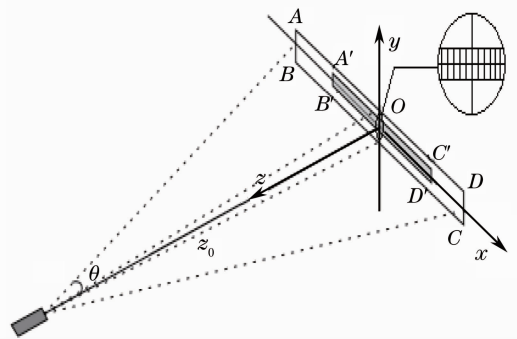


图 2 CCD 的光照度几何模型

Fig. 2 Geometric model of illumination of CCD

当 z_0 较大时,入射光经过柱面镜汇聚后的线型光带在 xOy 面可近似为矩形。设 $AD = 2l, AB = 2d$,忽略光纤直径时,线型光带投射面的半长为

$$l = z_0 \tan \theta. \quad (1)$$

式中光纤的发散角 θ 由 $NA = n \sin \theta$ 确定, NA 为光纤的数值孔径。

设入射光的光功率为 P_i ,则光通量 Φ 为^[17]

$$\Phi = 683 \int P_{\lambda} G(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 $G(\lambda)$ 为光谱光效率函数, 设解调光路的损失参数为 η , 线型光带投射面 $ABCD$ 的面积 $S_{ABCD} = 4ld$, 则投射面 $ABCD$ 上的平均照度 E_0 为

$$E_0 = \frac{\eta\Phi}{S_{ABCD}}. \quad (3)$$

投射面 $ABCD$ 上光照度并不是均匀分布的, 与光纤出射端面的距离有关。由于光纤直径非常小, 可近似看成点光源, 依据点光源的光照度传播规律, 则入射面 $ABCD$ 上任意一点的照度 E 可以表示为

$$E = E_0 \frac{Kz_0}{(z_0^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

式中 $-l \leq x \leq l, -d \leq y \leq d$, 因投射面 $ABCD$ 上接收到的光通量是一定的, 故 $\Phi = \iint E dS_{ABCD}$, 联立 (1) ~ (3) 式可获得 K ,

$$K = z_0^2 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}. \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (4) 式得到投射面 $ABCD$ 上任意一点的光照度 E 为

$$E = E_0 \frac{z_0^3 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{(z_0^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

线阵 CCD 位于投射面 $ABCD$ 的中央位置, 如图 2 可知, 设 CCD 任意像素光敏面上的光照度为 E' , 则

$$E' = \frac{\iint_{L \times H} E ds}{s} = \frac{\int_{(n-1)L}^{nL} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{E_0 z_0^3 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{(z_0^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dy dx}{LH}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm N/2 \quad (7)$$

式中 n 为 CCD 像素在 x 轴上的序号, N 为 CCD 的像素个数, L 为 CCD 像素的宽度, H 为 CCD 像素的高度, CCD 像素光敏面的面积 $s = L \times H$, 经过几何运算, (7) 式可写为

$$E' = \int_{(n-1)L}^{nL} \frac{E_0 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{L \left[1 + \left(\frac{x}{z_0} \right)^2 \right] \sqrt{\left[1 + \left(\frac{x}{z_0} \right)^2 + \left(\frac{H}{2z_0} \right)^2 \right]}} dx. \quad (8)$$

由于 $(H/2z_0)^2 \ll 1$, 可忽略不计, 简化后得

$$E' \approx E_0 z_0 \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \left[\frac{n}{\sqrt{z_0^2 + n^2 L^2}} - \frac{n-1}{\sqrt{z_0^2 + (n-1)^2 L^2}} \right]. \quad (9)$$

联立 (1)、(2)、(9) 式, 得到 CCD 任意像素光敏面上的光照度 E' 为

$$E' \approx \frac{\eta\Phi}{4d \sqrt{\sin \theta}} \left[\frac{n}{\sqrt{z_0^2 + n^2 L^2}} - \frac{n-1}{\sqrt{z_0^2 + (n-1)^2 L^2}} \right]. \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm N/2 \quad (10)$$

3.2 CCD 输出信号的电压值

CCD 器件是积分型器件, 输出信号电压既和 CCD 器件光敏面上的光照度有关, 也和两次取样的间隔时间, 即积分时间有关。当积分时间一定时, CCD 各个像素信号的输出电压与光敏面接收到的光照度呈线性关系, 信号的输出电压曲线取决于光照度在 CCD 光敏面上的分布; 当 CCD 光敏面接收

到的光照度一定时, CCD 输出信号电压与积分时间呈正比, 即与帧扫描频率呈反比关系。因此在线性响应区, CCD 输出信号电压 U 可表示为

$$U = RE't, \quad (11)$$

式中 t 为积分时间, R 为 CCD 的响应度。则 CCD 各个像素输出信号电压为

$$U = Rt \frac{\eta\Phi}{4d \sqrt{\sin \theta}} \left[\frac{n}{\sqrt{z_0^2 + n^2 L^2}} - \frac{(n-1)}{\sqrt{z_0^2 + (n-1)^2 L^2}} \right]. \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm N/2 \quad (12)$$

通过 (10) 式和 (12) 式可分别求出线阵 CCD 各个像素的光敏面光照度和输出信号电压。可以通过改变解调光路中光纤出射端面到 CCD 光敏面的垂直距离 z_0 、CCD 像素尺寸和光纤发散角 θ 优化 CCD

光敏面接收到的光照度和输出信号电压。

3.3 CCD 输出信号的信噪比

空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统中的干涉信号如图 3 所示, 图中 V_n 为信号噪声的标准差,

V_{p-p} 为干涉信号峰峰值, V_b 为输出信号的电压最大值。通常 CCD 信号的信噪比定义为

$$R_{SNR_b} = 20\lg(V_b/V_n).$$

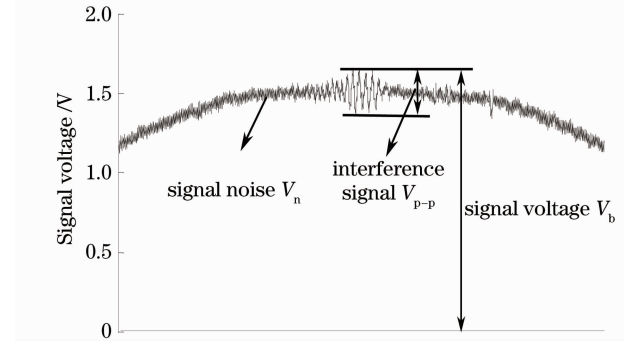


图 3 空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统中 CCD 输出信号

Fig. 3 CCD output signal in the spatial scanning optical fiber F-P sensor demodulation system

在 CCD 随机噪声中影响相对较大的有三种噪声,即光子散粒噪声、暗电流噪声和读出噪声^[18]。CCD 输出信号根据帧扫描频率分为两个不同的噪声主导区域:光子散粒噪声与暗电流噪声主导区域和读出噪声主导区域。相应有着两种信噪比计算公式^[19]。在帧扫描频率较高时,占主导地位的噪声是读出噪声,输出信号的信噪比为

$$R_{SNR_{br}} = 20\lg \frac{E_0 s_{\text{pixel}} \lambda Q_e}{683hcN_r f}, \quad (13)$$

式中 E_0 为 CCD 光敏面的平均照度, s_{pixel} 为像素面积, $s_{\text{pixel}} = LH$, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为光源中心波长, Q_e 为 CCD 的量子效率, N_r 为读出噪声,可近似由 $N_r = \sqrt{KTC}/q$ 求出,即用等效均方根电子数表示,其中 K 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度,

C 为 CCD 输出电路的节点电容, q 为电子电荷量。

帧扫描频率较低时,光子散粒噪声和暗电流噪声在噪声成分中占据主导地位,输出信号的信噪比为

$$R_{SNR_{bo}} = 20\lg \frac{E_0 s_{\text{pixel}} \lambda Q_e}{\sqrt{f(683hc\lambda E_0 s_{\text{pixel}} Q_e + 683^2 h^2 c^2 V_{DRK}/r)}}, \quad (14)$$

式中 V_{DRK} 为暗电流引起的电压值, r 为电阻。

由于更关心干涉条纹,因此定义低相干干涉信号的信噪比 $R_{SNR_l} = 20\lg(V_{p-p}/V_n)$, 两种信噪比之间的关系为 $R_{SNR_l} = R_{SNR_b} - C_0$, 其中 $C_0 = 20\lg(V_b/V_{p-p})$ 。相应的干涉信号在帧扫描频率较高时, $R_{SNR_{lr}} = R_{SNR_{br}} - C_0$, 帧扫描频率较低时, $R_{SNR_{lo}} = R_{SNR_{bo}} - C_0$ 。

4 实验及结果分析

实验中的入射光功率 $P=0.063 \mu\text{W}$, 入射光的光通量 $\Phi=4.303 \times 10^{-5} \text{ lm}$, 光纤的数值孔径 $NA=0.275$, 计算出光纤发散角 $\theta=15.96^\circ$, 光纤出射端面到原点 O 的距离 $z_0=8.3 \times 10^{-2} \text{ m}$, 线型光带投射面 $ABCD$ 的边长 $2l=4.75 \times 10^{-2} \text{ m}$, 宽 $2d=2 \times 10^{-3} \text{ m}$, 为了保证低相干干涉信号的质量, 解调光路采用了起偏器, 光路功率损失约为 $\eta=50\%$ 。

4.1 CCD 信号输出电压的分析

利用已设计的解调模块对像素数为 3000, 像素宽为 $7 \mu\text{m}$ 、高为 $200 \mu\text{m}$, 响应度 $R=300 \text{ V}/(\text{lx} \cdot \text{s})$ 的线阵 CCD 进行了实验, 设定 CCD 的帧扫描频率 $f=50 \text{ Hz}$, 连续采集了 100 frame 光照信号的实验数据, 利用(12)式, 计算得到线阵 CCD 各个像素输出的电压值, 实验结果如图 4(a)所示, 图中为了结

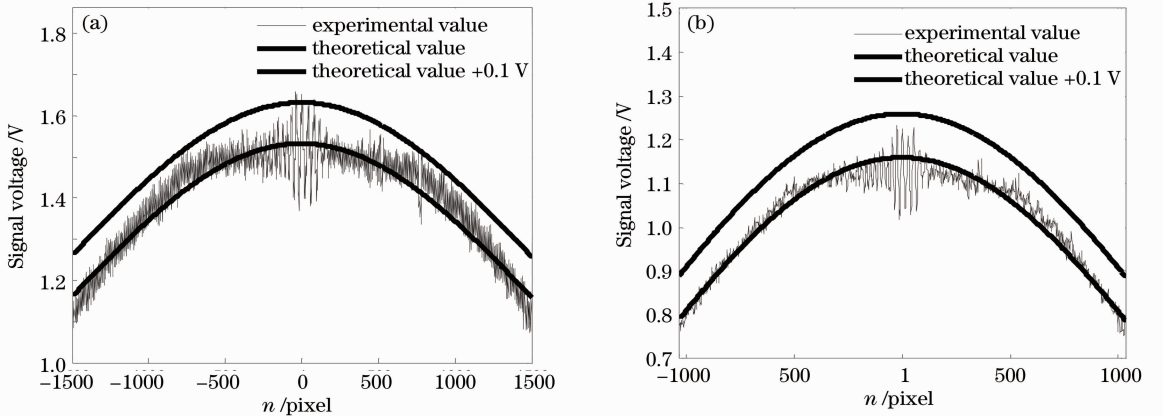


图 4 (a) 像素数为 3000 的 CCD 的实验值与理论计算值; (b) 像素数为 2048 的 CCD 的实验值与理论计算值
Fig. 4 (a) Experimental and theoretical value of the 3000-pixel CCD; (b) experimental and theoretical value of the 2048-pixel CCD

果清晰可见,绘图时将理论计算值上移 0.1 V。进一步针对像素数是 2048,像素宽为 14 μm 、高为 500 μm ,响应度 $R=200 \text{ V}/(\text{lx}\cdot\text{s})$ 的线阵 CCD 进行了采集实验与理论计算。实验结果如图 4(b) 所示。可以看出,像素数不同的两款线阵 CCD 输出信号的背景信号与理论计算结果均吻合,验证了线阵 CCD 光照度数学分析模型的有效性。

4.2 不同帧扫描频率下 CCD 输出信号分析

对像素数为 3000 的线阵 CCD 进行了不同帧扫描频率的 CCD 光照度实验。设定 CCD 帧扫描频率

f 依次为 50、100、150、200、250、300 Hz,在每个帧扫描频率下连续采集了 100 frame 光照信号的实验数据,同时针对不同帧扫描频率的实验数据做了最小二乘拟合处理,利用(12)式,计算得到线阵 CCD 各个像素输出的电压值。实验结果如图 5 所示,图 5(a) 中实心点为处理后的实验测量值,实线为理论计算值,图 5(b)、(c)、(d) 分别为像素序号 $n=-1000$ 、 $n=1$ 、 $n=1000$ 的测量值与理论计算值,可以看到,实验值与理论值相吻合。

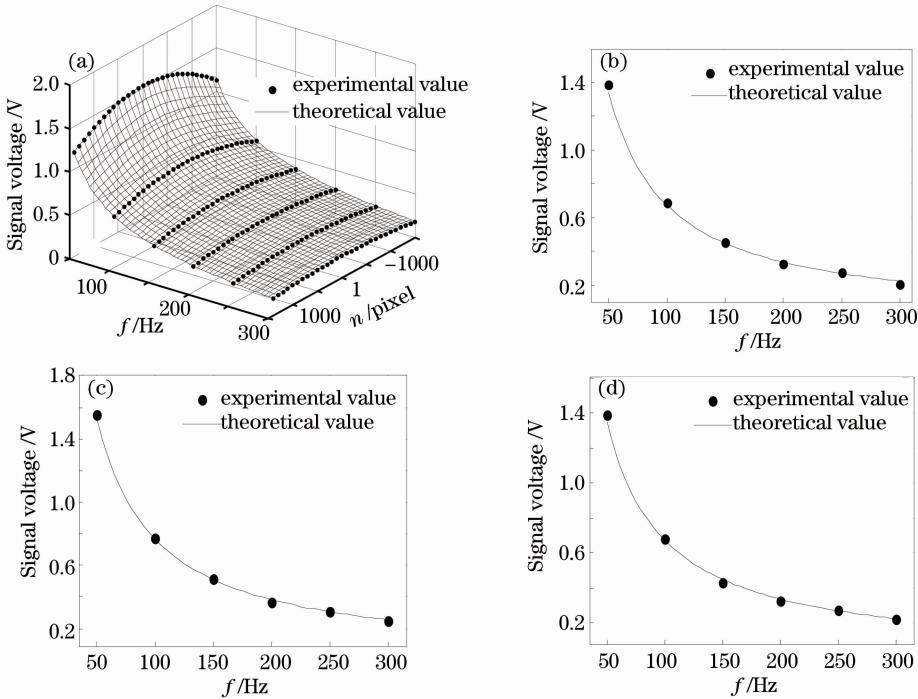


图 5 不同帧扫描频率下 CCD 像素信号输出电压的测量值与理论值。(a) CCD 各个像素的实验结果;

(b) CCD 像素序号 $n=-1000$; (c) CCD 像素序号 $n=1$; (d) CCD 像素序号 $n=1000$

Fig. 5 Experimental and theoretical value of the CCD pixel signal output voltage at different frame scan frequencies. (a) Experimental results of CCD each pixel; (b) CCD pixel number $n=-1000$; (c) CCD pixel number $n=1$; (d) CCD pixel number $n=1000$

在不同帧扫描频率下,不同像素的相对误差计算结果如图 6(a) 所示,可知 CCD 不同像素实验值与理论值的相对误差均小于 2.5%。图 6(b) 为像素序号 $n=-1500$ 、 $n=-1000$ 、 $n=1$ 、 $n=1000$ 、 $n=1500$ 的相对误差随帧扫描频率的变化,可看出同一像素相对误差的变化范围很小,均小于 0.005。导致不同像素的相对误差不同的主要因素包括: CCD 像素的不均匀性及实际测量中 CCD 各个像素位置与理想位置的偏差。

4.3 CCD 输出信号的信噪比分析

采用了不同帧扫描频率的实验数据,计算出低相

干干涉信号峰峰值和信噪比,如图 7(a) 显示干涉信号峰峰值的 V_{p-p} 随着频率的增大而减小。图 7(b) 中圆形实心点为输出信号的信噪比 R_{SNR_b} 测量结果,三角实心点为低相干干涉信号的信噪比 R_{SNR_l} 测量结果,从测量结果可知, R_{SNR_b} 与 R_{SNR_l} 相差 14.6 dB。

实验中, CCD 像素的平均照度 $E_0=0.227 \text{ lx}$,光源的中心波长 $\lambda=550 \text{ nm}$,依据所选择 CCD 的典型参数,输出电路的总电容 $C\approx 30 \text{ fF}$,可计算得到读出噪声 $N_r=78$,暗电流引起的电压值 $V_{\text{DRK}}=6 \text{ mV}$,电阻 $r=250 \Omega$ 。利用上述数据,并根据(13)式和(14)式计算解调系统 CCD 输出信号的信噪比,计算结果如图 7(b) 中的实线和虚线所示,两条曲线相交于

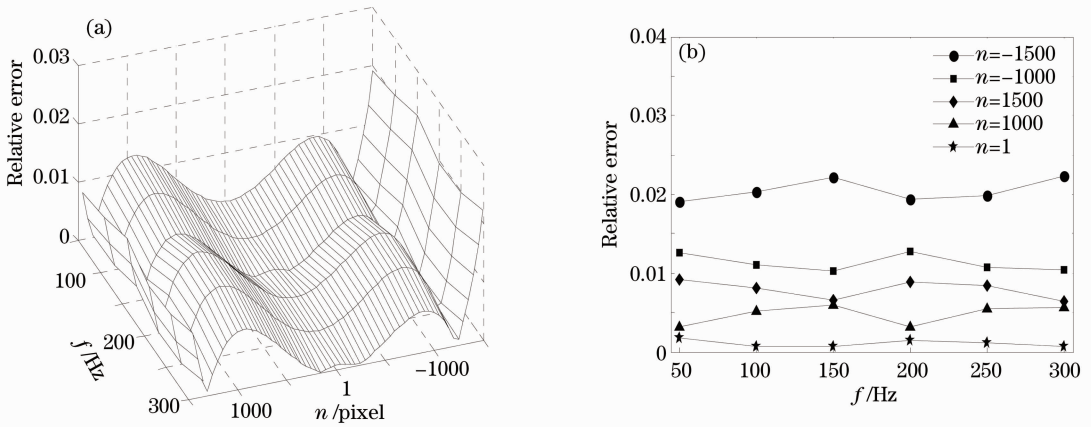


图 6 当帧扫描频率不同时, (a) 不同像素的相对误差; (b) 同一像素的相对误差

Fig. 6 (a) Relative error of different pixels and (b) relative error of same pixel at different frame scan frequencies

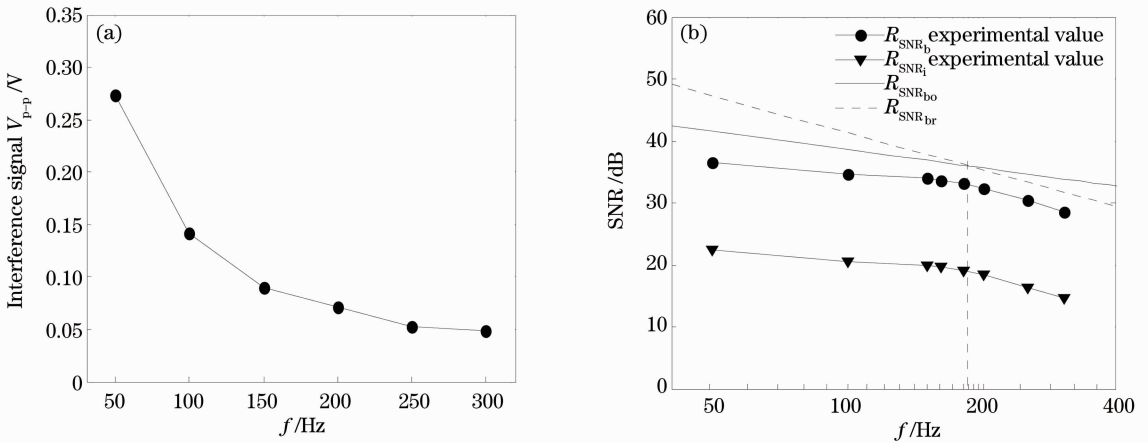


图 7 当帧扫描频率不同时, (a) 低相干干涉信号的峰峰值; (b) CCD 输出信号的信噪比

Fig. 7 (a) Low coherence interference signal V_{p-p} and (b) SNR of CCD output signal at different frame scan frequencies

184 Hz处。当 $f \leq 184$ Hz时, 信噪比测量结果与信噪比 $R_{SNR_{bo}}$ 计算结果的变化趋势接近, 低相干干涉信号的信噪比变化缓慢, 当 $f > 184$ Hz时, 信噪比测量结果与与信噪比公式 $R_{SNR_{br}}$ 计算结果的变化趋势接近, 低相干干涉信号的信噪比变化迅速, 呈现快速下降的趋势。

5 结 论

建立了空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型, 并进行了理论计算和实验分析。当帧扫描频率 f 不同时, CCD 像素输出的信号电压测量值与理论计算的误差均小于 2.5%; 同一像素 CCD 信号输出电压的实验值与计算值的相对误差误差变化范围小于 0.005; 分析了信噪比随帧扫描频率的变化, 计算出 f 为 184 Hz 是信噪比变化的分界点, 并与实验结果相吻合, 验证了解调系统 CCD 光照度数学模型的有效性。研究对于灵活

构建光纤 F-P 传感解调系统及 CCD 优化选择提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(2): 57~79
- 2 Tao Wei, Yukun Han, Yanjun Li *et al.*. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Pérot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5764~5769
- 3 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1413~1420
江 毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1413~1420
- 4 Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. All-fiber Fabry-Pérot interferometer refractive index sensor formed by ring reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1608~1612
柯 涛, 朱 涛, 饶云江 等. 基于环形反射面的全光纤法珀干涉式折射率传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1608~1612
- 5 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Optical fiber Fabry-Pérot 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 等. 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
- 6 J. F. Jiang, T. G. Liu, Y. M. Zhang *et al.*. Parallel demodulation system and signal-processing method for extrinsic Fabry-Pérot interferometer and fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6): 604~606
- 7 Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Demodulation of the optical fiber Fabry-Pérot sensor based on Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186~189
章鹏, 朱永, 唐晓初等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 186~189
- 8 Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming *et al.*. Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber Fabry-Pérot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1297~1301
王婷婷, 王鸣, 李明等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1297~1301
- 9 Jiang Jian, Rao Yunjing, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Pérot interferometric sensing system based on optical amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186
江建, 饶云江, 冉曾令等. 光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 183~186
- 10 Tang Qingtao, Rao Yunjing, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Pérot multiplexing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1353~1357
唐庆涛, 饶云江, 朱涛等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1353~1357
- 11 S. Chen, A. J. Rogers, B. T. Meggit. Electronically scanned optical-fiber Young's white-light interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(10): 761~763
- 12 R. Dändliker, E. Zimmermann, G. Frosio. Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(9): 679~681
- 13 C. Belleville, G. Duplain. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 78~80
- 14 R. H. Marshall, Y. N. Ning, X. Qiang *et al.*. A novel electronically scanned white-light interferometer using a Mach-Zehnder approach [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 397~402
- 15 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Pérot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106007
赵艳, 王代华. 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[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0106007
- 16 Li Lei, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Pérot sensors[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(1): 67~73
李磊, 刘铁根, 江俊峰等. 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调中光楔参数的影响研究[J]. 光电子·激光, 2012, **23**(1): 67~73
- 17 Zhang Yimo. Laser Metrology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 128~130
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 128~130
- 18 E. L. Dereniak, R. E. Sampson, C. B. Johnson. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras [C]. *SPIE*, 2004, **5563**: 195~204
- 19 Wang Shuhong, Hu Moufa, Chen Zengping *et al.*. Noise analysis and the study of SNR model on the astronomical CCD camera[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 731~734
王书宏, 胡谋法, 陈曾平等. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究[J]. 半导体光电, 2007, **28**(5): 731~734

栏目编辑: 王晓琰