

# 基于电吸收调制器的深度成像系统误差分析

张敏睿<sup>1,2</sup> 贺正权<sup>1</sup> 田进寿<sup>1</sup> 汪 韬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 建立了基于电吸收调制器(EAM)的深度成像系统数值模型. 为定量描述时序误差对系统精度的影响推导了含尺度因子的测量误差公式, 分析了光调制器参数、系统噪声和时序误差对测量误差的影响. 结果表明, 无时序误差时, 测量值标准偏差与传感器阱中信号电子数的平方根成反比, 与阱中背景电子数和信号电子数之比的平方根成正比; 采用高调制速度和高消光比的EAM可以提高系统精度; 随着时序偏移误差增加, 系统精度将迅速下降且难以通过增加传感器阱中信号电子数的方式提升; 如要求7 m处单幅深度图像精度小于1 cm, 则需要传感器阱深大于等于300 Ke, 时序的偏移误差小于等于 $\pm 200$  ps.

**关键词** 成像系统; 飞行时间相机; 电吸收调制器; 测量误差; 抖动和偏移误差

**中图分类号** TN247      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0611004

## Error Analysis of Electro-Absorption-Modulator-Based Depth Imaging System

Zhang Minrui<sup>1,2</sup> He Zhengquan<sup>1</sup> Tian Jinshou<sup>1</sup> Wang Tao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** A numerical model of electro-absorption-modulator (EAM)-based time-of-flight depth system is established. A formula with scale factor is deduced to quantify the contribution of timing-error to the accuracy of system. Measurement error is studied with parameters of EAM as well as background noise and timing-error. The results show that with no timing-error the standard deviation of measurements is inversely proportional to the square root of the number of signal electrons and is proportional to the square root of the ratio of the number of background electrons to the number of signal electrons. System accuracy improved by employing EAM with high speed modulation and higher extinction ratio. With skew error increasing, measurement error rises rapidly and is difficult to be reduced by increasing the number of signal electrons in the well of sensor. The well capacity of sensor must be larger than 300 Ke and the skew error of signal must be less than  $\pm 200$  ps if the accuracy of 7 m single depth image is required less than 1 cm.

**Key words** imaging systems; time-of-flight camera; electro absorption modulator; measure error; jitter and skew error

**OCIS codes** 110.6880; 250.4110; 030.4280

## 1 引 言

飞行时间(TOF)深度成像系统又称飞行时间相机是一种近年来活跃的中近距离下高速、高分辨率获取目标三维信息的手段。由于成本低、结构简单、精度适中受到了商业和科研领域研究人员的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。按回波信号解调方式飞行时间深度相机可以分为基于回波信号光生电流调制的深度传感器技术<sup>[3-4]</sup>和基于回波信号光调制的选通成像技术<sup>[5-6]</sup>。由于后者不需要特制的传感器,因而其测量精度和图像分辨率均优于前

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2015-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(11274377), 财政部重大科研装备仪器项目(ZDY2011-2)

作者简介: 张敏睿(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事三维成像技术方面的研究。E-mail: m\_rzhang@163.com

导师简介: 田进寿(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事超快成像技术方面的研究。E-mail: tianjs@opt.ac.cn

者。目前,基于像增强器的选通成像技术已广泛用于1 km内的三维成像测量中,但是像增强器需要百伏以上的工作电压,限制了其进一步推广。三星先进技术研究院的Park等<sup>[7]</sup>研制了一种大面积电吸收(EAM)高速图像调制器,并在1920 pixel×1080 pixel的互补金属氧化物半导体(CMOS)成像系统上获取了精度为4.4mm的深度图像。相比于像增强器,该器件尺寸小,只需要小于10 V的工作电压并采用标准的半导体工艺制作,同时弥补了像增强器低量子效率和高噪声等不足<sup>[8]</sup>。但是,这类光调制器响应速度慢、消光比低,而目前的基于像增强器的选通成像物理模型<sup>[9]</sup>以及基于理想余弦或方波调制的结论也并不适用于这类系统。因此,本文以经验参数为基础,建立了基于EAM的深度成像系统的数值模型并推导了一种含尺度因子的误差公式,对系统的测量精度进行理论分析和定量研究。

## 2 测量原理

基于回波信号光调制的深度系统原理如图1所示.由光源发射一系列频率为 $f_0$ 的有限长度光信号 $s(t)$ 照射目标,若采用相同频率的光强度调制信号 $g(t-\tau)$ 对回波信号 $s(t-t_d)$ 调制,则系统的积分响应为

$$\phi(\tau) = \int s(t-t_d)g(t-\tau)dt, \quad (1)$$

式中 $\tau$ 为调制信号延迟。对 $\phi(\tau)$ 进行傅里叶变换,回波信号延迟 $t_d$ 可以表示为

$$t_d = \frac{\varphi_0(f) - \varphi(f)}{2\pi f}, \quad (2)$$

式中 $\varphi_0(f)$ 为相关信号 $\phi(\tau)$ 的初始相位。取 $T$ 为 $\phi(\tau)$ 的采样周期, $N$ 为采样点数, $F$ 为频率采样周期。且当 $f=f_0$ 时

$$\varphi(f_0) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \phi_n \sin\left(-\frac{2\pi f_0}{NF}n\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} \phi_n \cos\left(-\frac{2\pi f_0}{NF}n\right)}, \quad (3)$$

当 $\tau \leq 1/f_0$ ,  $N=4$ ,  $T=1/4f_0$ 时,距离 $d$ 可以表示为

$$d = \frac{c}{2} \cdot \frac{\varphi_0 - \tan^{-1}\left(\frac{\phi_3 - \phi_1}{\phi_0 - \phi_2}\right)}{2\pi f_0}, \quad (4)$$

(4)式即为此类深度成像系统中常用的四帧深度算法。若 $s(t)=S\cos(2\pi f_0 t)+S_0$ 和 $g(t)=G\cos(2\pi f_0 t)+G_0$ 。当积分时间 $t_0$ 远大于 $1/f_0$ 时,相关信号 $\phi(\tau)$ 可以简化为

$$\phi(\tau) = \frac{SGt_0}{2} \cos(2\pi f_0 \tau - 2\pi f_0 t_d) + S_0 G_0 t_0. \quad (5)$$

由于实际信号往往不是理想三角函数,因而采用四帧图像进行深度计算会因高次谐波混叠导致所需复原的基频相位失真,对于这种因高次谐波产生的系统固定误差一般可以采用后校准的办法<sup>[10]</sup>修正,仅对随机误差进行讨论。

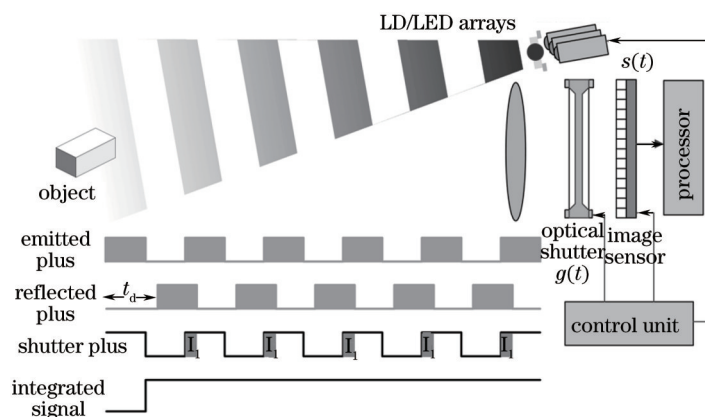


图1 基于电吸收光调制器深度成像系统原理

Fig.1 Principle of EAM-based depth imaging system

### 3 系统模型

TOF 深度成像系统一般采用激光二极管阵列作为光源,其光子出射速率可以被表示为

$$v_s(t) = \frac{N_{LD} \eta_c S_n V_{act}}{\tau_p} \quad (6)$$

式中  $N_{LD}$  为激光二极管数量,  $\eta_c$  为发射效率,  $S_n$  为归一化光子密度,  $S_n = S_{total}/\Gamma$ ,  $\tau_p$  为光子寿命,  $V_{act}$  为有源区体积,  $\Gamma$  为限制因子。归一化光子密度  $S_n$  与瞬时注入电流强度  $I$  关系由速率方程得。采用阈值电流 1.5 mA, 效率 0.38 W/A 的 VCSEL 激光器模型<sup>[11]</sup>。当有效注入电流为 20 mA 时, 单只光源的功率约为 7 mW。在频率 20 MHz、占空比为 50% 的信号直接调制下, 注入电流强度和光子出射速率随时间变化如图 2 所示。受注入电流的时序抖动误差(TIE)影响, 出射光信号脉冲的占空比也将发生随机抖动。

用于深度成像系统的 EAM 为保证回波调制像较完整的通过器件到达图像传感器一般需要毫米级的工作窗口, 为简化计算不考虑器件二维电光特性和响应特性的不均匀情况, 则其电光吸收特性可以表示为<sup>[12]</sup>

$$P_o(t) = P_a \cdot \exp\left\{-\left[V_c(t)/V_0\right]^c\right\} + P_{min} \quad (7)$$

式中  $P_o(t)$  为瞬时透射率,  $V_c(t)$  为吸收区域的瞬时有有效压降,  $P_a$  和  $P_{min}$  近似为器件的最大电吸收率和最小透射率, 在量子斯塔克效应光调制器中  $c$  值范围为 3~4。若不考虑寄生和引线参数, EAM 器件的调制等效电路<sup>[13]</sup>可以简化为由结电容  $C_j$  和有效电阻  $R_c$  组成的一阶电路, 吸收区域的有效压降即为结电容两端电压。则  $V_c(t)$  与输入电压  $V_s(t)$  在时域上满足微分关系

$$R_c C_j \frac{dV_c(t)}{dt} + V_c(t) = V_s(t) \quad (8)$$

采用最小二乘法对实测数据<sup>[7]</sup>进行拟合, 当  $P_a=0.5298$ ,  $V_0=7.126$ ,  $c=3.484$ ,  $P_{min}=0.11$ ,  $R_c C_j=7.958 \times 10^{-9}$  s 时, (7)式与 Park 等的实测数据之间拟合决定系数(R-square)大于 0.997。除了抖动误差, 受制于 EAM 输入信号  $V_s(t-\tau_n)$  的延迟精度, 回波的强度调制信号  $P_o(t)$  还受到偏移误差(SE)的影响。在 20 MHz、 $\tau_2=25$  ns 下器件透射率随输入信号变化如图 3 所示。

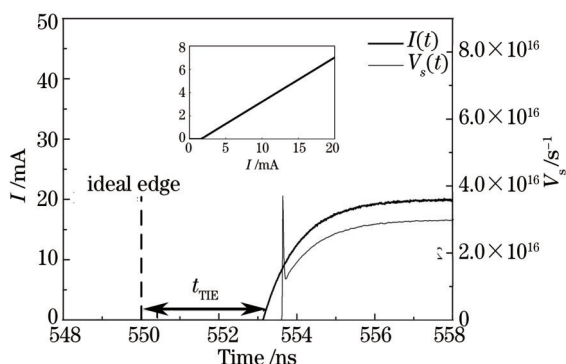


图2 激光器的注入电流和输出光子数

Fig.2 Current and photon number waveforms of lasers

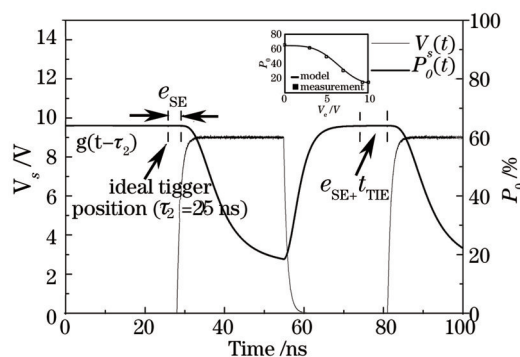


图3 电吸收调制器的偏压和透射率波形

Fig.3 Bias and transmittance waveforms of EAM

光束垂直入射漫反射体且光源发散角等于成像系统视场角时, 由激光雷达方程<sup>[14-15]</sup>可得积分时间  $t_0$  内单个像素的所接收到的信号光子数  $N_m$

$$N_m = C_{sys} \int_0^{t_0} P_o(t-\tau) v_s(t-t_d) dt \quad (9)$$

$$C_{sys} = \frac{\tau_{optic} \gamma \sin^2 \theta T^2 d_{pix}^2}{A_r} \quad (10)$$

式中  $C_{sys}$  表示从光源到传感器单个像素的光信号传播衰减因子,  $\tau_{optic}$  为光学系统透射率,  $\gamma$  为目标反射率,  $\theta$  为入射孔径角  $\sin^{-1}(D/2r)$ ,  $T$  为单程大气透射率,  $D$  为成像系统的入瞳直径,  $r$  为目标距离,  $d_{pix}$  为像元尺寸,  $A_r$  为传感器总有效受光面积。取  $\langle \mu \rangle$  为不同延迟  $\tau$  的平均调制出射光子数, 对  $N_m$  进行归一化

$$\langle \mu \rangle = \int_0^{t_0} \int_0^{t_0} P_o(t-\tau) v_s(t-t_d) dt d\tau \quad (11)$$

$$N_m = C_{sys} \langle \mu \rangle \mu_n \quad (12)$$

显然,  $\langle \mu \rangle$  正比于光源功率。若电路噪声已得到很好的控制, 受光生电子和暗电流随机涨落的影响, 传感器阱中电子数  $N_{\text{well}}$  的不确定性服从参数为  $\eta_{\text{ccd}}(N_m + N_b) + N_{\text{noise}}$  的泊松分布。则成像系统的输出数字量为  $\phi'_n = gN_{\text{well}}$ ,  $g$  为含片上放大后的系统增益。  $\phi'_n$  的期望  $\langle \phi'_n \rangle$  和方差  $\sigma_{\phi'_n}^2$  表示为

$$\langle \phi'_n \rangle = g\eta_{\text{ccd}}(N_m + N_b) + gN_{\text{noise}}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\phi'_n}^2 = g\langle \phi'_n \rangle, \quad (14)$$

式中  $\eta_{\text{ccd}}$  为传感器量子效率,  $N_b$  和  $N_{\text{noise}}$  分别为背景光子数和暗电子数。

#### 4 误差分析

由于  $\phi'_n$  之间互不相关, 则其统计分布与测量值统计分布之间的关系满足标准差传递方程<sup>[16-17]</sup>

$$\Delta d = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left( \frac{\partial d}{\partial \phi'_n} \sigma_{\phi'_n} \right)^2}, \quad (15)$$

根据(4)式并代入(12)~(14)式可得测量值标准差公式

$$\Delta d = \frac{c}{4\pi f_0} \frac{1}{\sqrt{C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} \langle \mu \rangle}} C_{w2} \sqrt{C_{w1} + 2R}, \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} R = \frac{\eta_{\text{ccd}} N_b + N_{\text{noise}}}{C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} \langle \mu \rangle} \\ C_{w1} = \frac{(\mu_0 - \mu_2)^2 (\mu_1 + \mu_3) + (\mu_1 - \mu_3)^2 (\mu_0 + \mu_2)}{(\mu_0 - \mu_2)^2 + (\mu_1 - \mu_3)^2}, \\ C_{w2} = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 - \mu_2)^2 + (\mu_1 - \mu_3)^2}} \end{cases}, \quad (17)$$

式中  $C_{\text{sys}}$  为时间无关的光信号传播衰减因子,  $R$  为势阱中背景电子数  $\eta_{\text{ccd}} N_b + N_{\text{noise}}$  与平均信号电子数  $C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} \langle \mu \rangle$  之比,  $C_{w1}$ 、 $C_{w2}$  一般为常数. Payne 等<sup>[18]</sup>认为 TOF 深度成像系统的测量值不确定性正比于  $\sqrt{B/A}$ ,  $B$  和  $A$  分别对应为系统实际响应  $\phi'(\tau)$  的均值和振幅。将(5)式代入(11)和(17)式得  $\langle \mu \rangle = S_0 G_0 t_0$ ,  $C_{w1} = 2$ ,  $C_{w2} = S_0 G_0 / SG$ 。显然在余弦调制的假设下(16)式与  $AB$  原则是一致的, 而  $A$  和  $B$  特指传感器阱中电子相关信号的振幅和均值, 其中  $A = C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} SG t_0 / 2$ ,  $B = \eta_{\text{ccd}} N_b + N_{\text{noise}} + C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} S_0 G_0 t_0$ 。

由(16)式可知,  $C_{\text{sys}} \langle \mu \rangle$  和  $\eta_{\text{ccd}}$  对测量值标准差的贡献是一致, 而成像系统后增益  $g$  对测量精度没有贡献。当  $\eta_{\text{ccd}} = 100\%$ ,  $d_{\text{pix}} = 3 \mu\text{m}$ ,  $A_s = 6\text{mm} \times 7 \text{mm}$ ,  $D = 10 \text{cm}$ ,  $g = 0.49 \text{ADU}/e$ ,  $t_0 = 50 \text{ms}$ ,  $f_0 = 20 \text{MHz}$ , 传感器势阱深度 300 Ke, 调制占空比 50%, 7 m 处测量值标准差  $\Delta d$  随光源总功率和  $R$  值变化的分布如图 4 所示。  $\Delta d$  反比于传感器势阱中平均信号电子数  $C_{\text{sys}} \eta_{\text{ccd}} \langle \mu \rangle$  的平方根, 随着阱中信号电子数的增加而减小。当光源功率为 500 mW 时, 标准差  $\Delta d = 5.6 \text{mm}$ ; 功率下降至 36 mW 时, 标准差增至 20.8 mm。背景电子数对测量值不确定性的影响正比于  $C_{w1} + 2R$  的平方根。当  $P = 36 \text{mW}$ 、 $R = C_{w1}/2$  时, 即阱中背景电子数由零上升至平均信号电子数的  $C_{w1}/2$  倍, 标准差增至 29.5 mm; 当  $R = 3C_{w1}/2$  时, 标准差上升至 41.8 mm, 约为  $R = 0$  时的 2 倍。显然, 在单次测量中采取提高光源功率、提高传感器量子效率和抑制背景光等措施能够显著改善系统精度。而当信号电子数接近传感器饱和阈值时, 系统的距离测量精度最高。

图 5 为系统工作在信号电子满阱状态时的测量值标准差随器件参数变化曲线。随着调制时间常数的增加, 测量值不确定性将增加; EAM 器件消光比的提高也可以提升测量精度。但是相对于器件的消光比参数  $P_n$ , 调制时间常数的变化对  $\Delta d$  的影响更大。因此, 降低整个调制系统的时间常数, 尤其是保证所设计的 EAM 器件的结电容在较低水平上对于提高测量精度非常重要。

除了散粒噪声、背景光和系统电噪声外, 光源和调制器的时序抖动和偏移也将对测量精度产生影响。此时, 入射光子数  $N_m$  由确定值变为有特定分布的随机量。图 6 为  $t_{\text{HE}}$  在  $[-4.5 \text{ns}, 4.5 \text{ns}]$  内服从均匀分布的情况下,  $N_m$  的分布概率  $P(N_m)$  直方图。

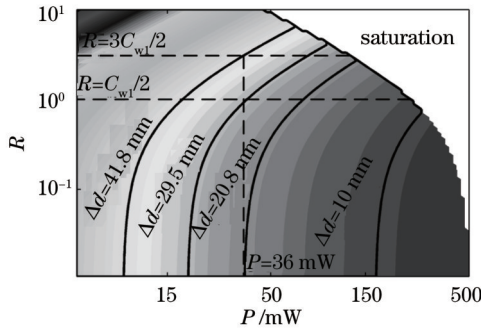


图4 测量值标准差分布图

Fig.4 Distribution of measured value standard deviation

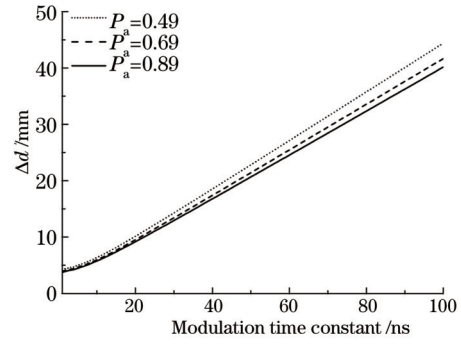


图5 不同EAM参数下的标准差

Fig.5 Standard deviation with different parameters of EAM

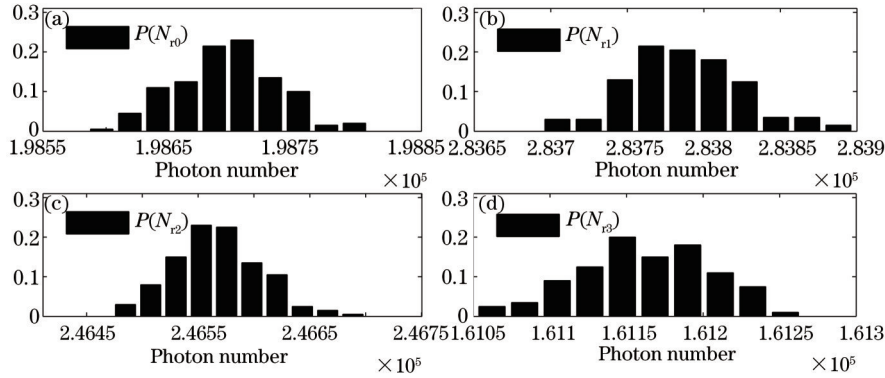


图6  $N_m$  概率密度分布。(a)  $P(N_0)$ ; (b)  $P(N_1)$ ; (c)  $P(N_2)$ ; (d)  $P(N_3)$

Fig.6 Probability density distribution of  $N_m$ . (a)  $P(N_0)$ ; (b)  $P(N_1)$ ; (c)  $P(N_2)$ ; (d)  $P(N_3)$

由全概率公式可得积分时间内在传感器中产生的信号电子数  $X$  的方差

$$\sigma_X^2 = \sum_{X=0}^{\infty} \sum_{N_m=0}^{\infty} P(N_m) P(X|N_m) (X - \bar{X})^2, \quad (18)$$

式中条件概率  $P(X|N_m)$  服从泊松分布  $X \sim \pi(\eta_{\text{ccd}} N_m)$ ,  $\bar{X} = \eta_{\text{ccd}} \langle N_m \rangle$ 。阱中信号电子在统计均值  $\bar{X}$  没有显著变化的情况下, 方差  $\sigma_X^2$  出现了明显的增加。取尺度因子  $\varepsilon_n$  为

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_X^2}{\eta_{\text{ccd}} \langle N_m \rangle}, \quad (19)$$

式中  $\varepsilon_n$  表示  $X$  的统计值偏离泊松分布的程度, 如图7、8所示, 尺度因子随  $\eta_{\text{ccd}}$  和信号光强的增加而增加; 时序抖动和偏移误差越大,  $\varepsilon_n$  的增加速度越快。显然, 时序误差仅对信号电子的方差产生显著影响, 此时系统所输出数字量  $\phi_n$  的方差可以表示为

$$\sigma_{\phi_n}^2 = g^2 \eta_{\text{ccd}} (\varepsilon_n \langle N_m \rangle + N_b) + g^2 N_{\text{noise}}. \quad (20)$$

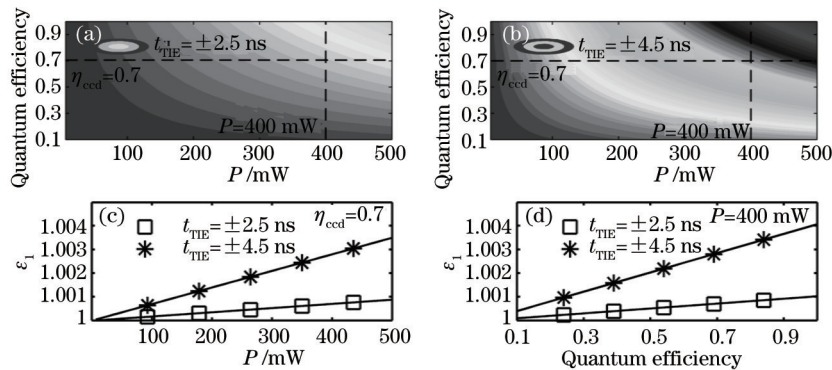


图7 不同抖动误差下的  $\varepsilon_1$  分布。(a)  $t_{\text{TIE}} = \pm 2.5$  ns; (b)  $t_{\text{TIE}} = \pm 4.5$  ns; (c)  $\eta_{\text{ccd}} = 0.7$ ; (d)  $P = 400$  mW

Fig.7 Distribution of  $\varepsilon_1$  with different TIE. (a)  $t_{\text{TIE}} = \pm 2.5$  ns; (b)  $t_{\text{TIE}} = \pm 4.5$  ns; (c)  $\eta_{\text{ccd}} = 0.7$ ; (d)  $P = 400$  mW

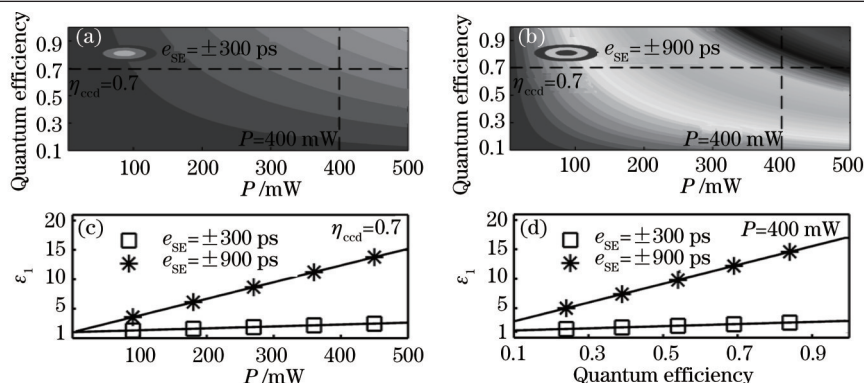


图8 不同偏移误差下的 $\varepsilon_1$ 分布。(a)  $e_{SE}=\pm 300$  ps; (b)  $e_{SE}=\pm 900$  ps; (c)  $\eta_{ccd}=0.7$ ; (d)  $P=400$  mW

Fig.8 Distribution of  $\varepsilon_1$  with different SE. (a)  $e_{SE}=\pm 300$  ps; (b)  $e_{SE}=\pm 900$  ps; (c)  $\eta_{ccd}=0.7$ ; (d)  $P=400$  mW

将(20)式代入(15)式, 得含尺度因子的  $C_{w1}$  表达式

$$C_{w1} = \frac{(\mu_0 - \mu_2)^2 (\varepsilon_1 \mu_1 + \varepsilon_3 \mu_3) + (\mu_1 - \mu_3)^2 (\varepsilon_0 \mu_0 + \varepsilon_2 \mu_2)}{(\mu_0 - \mu_2)^2 + (\mu_1 - \mu_3)^2}, \quad (21)$$

由于 $\varepsilon_n$ 值仅略大于1, 因此抖动误差TIE对 $C_{w1}$ 和 $\Delta d$ 影响可以忽略不计; 而偏移误差下的 $\varepsilon_n$ 远大于1且随偏移误差、量子效率和光源功率快速增加, 将对系统精度产生较大影响. 如图9(a)、(b)所示, 标准差 $\Delta d$ 仍然随信号电子数的增加而减小; 如图9(c)所示, 当信号电子数接近于传感器的饱和阈值时, 系统的最大测量精度将随偏移误差的增加而快速增加. 无偏移误差时,  $\Delta d=5.6$  mm; 当偏移误差为1000 ps时,  $\Delta d$ 增至41 mm. 图9(d)为不同偏移误差下测量值标准差的变化程度. 无偏移误差时, 光源功率从7 mW变化至500 mW, 传感器量子效率从0.3变化至1, 测量值标准差 $\Delta d$ 分别下降为原误差的12%和57%, 此时系统精度通过增加平均信号电子数的方式得到了有效提升; 而当 $e_{SE}=1000$  ps时,  $\Delta d$ 仅下降至67%和98%. 这实际表明当EAM输入信号 $V_s(t)$ 的偏移误差较大时, 系统测量值的不确定性已经不受散粒噪声主导, 在增强信号的同时也会显著增加信号电子数的不确定性. 此时测量值的随机误差将迅速增加且难以通过增加信号强度、提高传感器量子效率等改善信号电子散粒噪声信噪比的方式来提高. 因此, 保证时序的偏移误差对于该系统是非常重要的; 在时序精度较差的情况下, 应优先考虑采取多次测量的方法降低随机误差. 如要求7 m处单幅深度图像精度小于1 cm, 则需要传感器阱深 $\geq 300$  Ke, 时序偏移误差应 $\leq \pm 200$  ps.

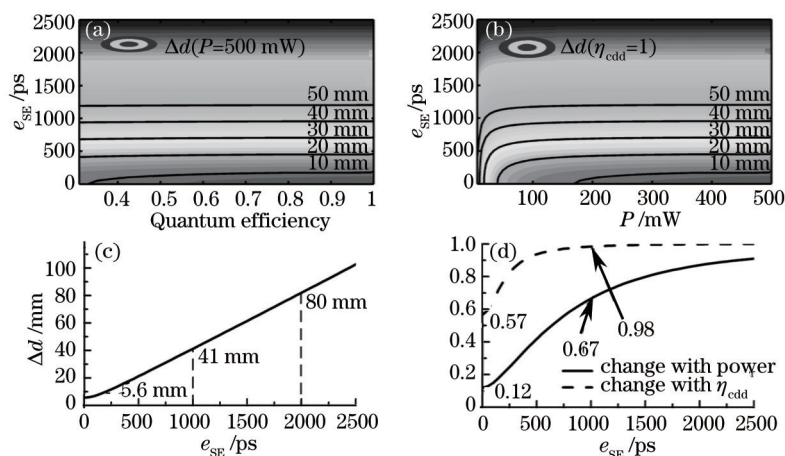


图9 不同偏移误差下测量值标准差。(a)标准差分布( $P=500$  mW); (b)标准差分布( $\eta_{ccd}=1$ ); (c)最小标准差; (d)标准差变化程度

Fig.9 Measured value standard deviation with different SE. (a) Distribution of standard deviation( $P=500$  mW); (b) distribution of standard deviation ( $\eta_{ccd}=1$ ); (c) minimum standard deviation; (d) variation of standard deviation

## 4 结 论

建立了基于电吸收光调制器的深度成像系统的数值模型, 推导了一种含尺度因子的误差公式, 对光调制器参数、背景信号和时序误差对系统精度的影响进行了理论分析和定量研究. 结果表明, 在理想情况下系统误

差受到散粒噪声主导,测量值标准偏差与阱中平均信号电子数的平方根成反比,与背景电子数和平均信号电子数之比的平方根成正比,与成像系统后增益无关;提高EAM器件的开关速度和消光比均能提升系统精度,但调制时间常数对系统精度的影响相对较大;时序的抖动误差对系统精度影响较小,而偏移误差影响非常大.测量值标准差随偏移误差增加而迅速增加;当偏移误差较大时,系统精度将难以通过增加光强等改善信号电子散粒噪声信噪比的措施提升.因此,优先保证时序的偏移误差对于该系统是非常重要的.如要求7 m处单幅深度图像精度小于1 cm,则需要传感器阱深大于等于300 Ke,时序的偏移误差小于等于 $\pm 200$  ps.

## 参 考 文 献

- 1 Q Wang, D Gong, S Wang, *et al.*. Range clusters based time-of-flight 3D imaging obstacle detection in manifold space[J]. Opt Express, 2014, 22(8): 8880-8892.
- 2 S K Kim, B Kang, J Heo, *et al.*. Photometric stereo-based single time-of-flight camera[J]. Opt Lett, 2014, 39(1): 166-169.
- 3 R Lange, P Seitz. Solid-state time-of-flight range camera[J]. Quantum Electronics, IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 390-397.
- 4 R Schwzrte, Z Xu, H G Heinol, *et al.*. New electro-optical mixing and correlating sensor: Facilities and applications of the photonic mixer device(PMD)[C]. Lasers and Optics in Manufacturing III. International Society for Optics and Photonics, 1997: 245-253.
- 5 Zhaoshuo Tian, Zihao Cui, Liting Zhang, *et al.*. Control and image processing for streak tube imaging lidar based on VB and MATLAB[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(6): 060015.
- 6 X Wang, Y Li, Y Zhou. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging[J]. Appl Opt, 2013, 52(30): 7399-7406.
- 7 Y H Park, Y C Cho, J W You, *et al.*. Three-dimensional imaging using fast micro-machined electro-absorptive shutter[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2013, 12(2): 023011.
- 8 Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian, *et al.*. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser radar[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908005.  
周 琴, 张秀达, 胡 剑, 等. 凝视成像三维激光雷达噪声分析[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908005.
- 9 Pan Huadong, Xie Bin, Liu Jilin. Modeling and simulation for scannerless laser 3D imaging system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(4): 639-651.  
潘华东, 谢 斌, 刘济林. 无扫描激光三维成像系统的建模与仿真[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4): 639-651.
- 10 S Henrik, L Frank, S G Christoph. Model based scattering correction in time-of-flight cameras[J]. Opt Express, 2014, 22(24): 29835-29846.
- 11 M Bruensteiner, G C Papen. Extraction of VCSEL rate-equation parameters for low-bias system simulation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 487-494.
- 12 O Mitomi, S Nojima, I Kotaka, *et al.*. Chirping characteristic and frequency response of MQW optical intensity modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(1): 71-77.
- 13 G L Li, C K Sun, S A Pappert, *et al.*. Ultrahigh-speed traveling-wave electro-absorption-modulator design and analysis[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7): 1177-1183.
- 14 Guo Jie, Sun Dongsong, Qiang Xiwen, *et al.*. Error analysis of differential image motion lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801004.  
郭 洁, 孙东松, 强希文, 等. 差分像移湍流廓线激光雷达测量误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801004.
- 15 Luo Yuan, He Yan, Hu Shanjiang, *et al.*. Three-dimensional video imaging Lidar system based on acousto-optic laser scanning[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802005.  
罗 远, 贺 岩, 胡善江, 等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802005.
- 16 Fang Yi, Zhang Xiuda, Hu Jian, *et al.*. A method applying gray image superposition to improve ranging accuracy in planar array laser radar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114002.  
方 毅, 张秀达, 胡 剑, 等. 一种直接应用灰度叠加提高面阵激光雷达测距精度的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114002.
- 17 Du Jun, Qu Yanchen, Zhao Weijiang, *et al.*. Measuring error of phase modulation laser doppler shift measuring method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712001.  
杜 军, 曲彦臣, 赵卫疆, 等. 相位调制激光多普勒频移测量方法的误差研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712001.
- 18 A D Payne, A A Dorrington, M J Cree, *et al.*. Improved measurement linearity and precision for AMCW time-of-flight range imaging cameras[J]. Appl Opt, 2010, 49(23): 4392-4403.

栏目编辑: 苏 岑