

凝视成像三维激光雷达噪声分析

周 琴 张秀达 胡 剑 严惠民

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 增强型电荷耦合器件(ICCD)是凝视成像三维激光雷达的关键器件之一。测量了在不同输入光强和不同像增强器增益电压条件下的光强以及噪声。根据光电探测过程,用泊松随机过程理论和最小二乘拟合法对测得的光强噪声数据进行了分析,发现噪声主要来自像增强器的等效光电子散粒噪声和电荷耦合器件(CCD)的光电子散粒噪声组成。尽管像增强器对光信号进行了放大,在大部分情况下,CCD的光电子散粒噪声也不可忽略。建立了双随机变量泊松过程的三维成像噪声模型,利用该模型给出了测距误差最小意义下的最优增益距离调制函数。

关键词 成像系统;增益调制;双随机变量泊松过程;像增强器;散粒噪声

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0908005

Noise Analysis of Staring Three-Dimensional Active Imaging Laser Radar

Zhou Qin Zhang Xiuda Hu Jian Yan Huimin

(National Engineering and Technology Research Center for Optical Instrument, State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Intensified charge coupled device (ICCD) is one of the key devices in the staring three-dimensional (3D) active imaging laser radar. The intensity and noises were measured with different input light intensities and different intensified gain voltages. According to the photoelectric detection process, the measured intensity and noises are analyzed with Poisson random process theory and the least square fitting method. It is found out that the noises consist of the equivalent photoelectron shot noise from the image intensifier and the photoelectron shot noise from the charge coupled device (CCD). Although the optical signal is magnified by the image intensifier, the latter part of noise can not be neglected in most cases. A noise model of 3D imaging with a doubly stochastic Poisson process is established, from which the optimal range-modulated gain function with a minimum distance error is deduced.

Key words imaging systems; modulated gain; doubly stochastic Poisson process; image intensifier; shot noise

OCIS codes 040.1520; 110.2970; 280.3640

1 引 言

凝视成像三维(3D)激光雷达因其取消了机械扫描部件,较传统扫描 3D 激光雷达具有重量轻、功耗低和可靠性高的优点^[1]。近年来,国内外许多研究机构开展了凝视成像 3D 激光雷达的相关研究。在国际上,2006 年丹麦 J. Busck 等^[2~5]采用时间切片技术达到了在 1 m 探测范围内精度小于 1 mm 而

在 100 m 探测范围内精度小于 1 cm 的成像水平;2007 年德国 M. Laurenzis 等^[6]仅通过 3 幅图像的处理在 650~1550 m 距离范围内的距离探测精度好于 30 m。在国内,2008 年本课题组^[7]提出了测量结果与激光脉冲形状无关的测量方法,在景深 800~1100 m 范围内测量取得 3.2~8.6 m 的探测精度,2009 年哈尔滨工业大学^[8]也进行了相关研究,提出

收稿日期: 2011-04-01; 收到修改稿日期: 2011-05-09

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z142)和国家 973 计划(2009CB724004)资助课题。

作者简介: 周 琴(1986—),女,硕士研究生,主要从事凝视成像三维激光雷达方面的研究。

E-mail: jiximiaohai@163.com

导师简介: 严惠民(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测和激光雷达等方面的研究。

E-mail: yhm@zju.edu.cn(通信联系人)

了测量精度与距离无关的增益距离调制函数,在景深 150~180 m 范围内得到测距精度为 2~4 m。激光雷达已经广泛应用于人脸识别^[2,3,5]、遥感^[3]、地形测量^[9]和环境监测^[10]等领域,在国民经济中具有重要应用价值。

本文测量了不同光强及增益电压下的噪声数据。实验结果表明,在光强值较弱时,凝视 3D 成像激光雷达中 CCD 的光电子散粒噪声不可忽略,基于该噪声模型对增益时间函数进行了优化。

2 背景及原理

3D 成像激光雷达的基本构成如图 1 所示,控制单元 PC 控制激光器 LD 发出同步激光脉冲,激光脉冲经过目标反射回来并由像增强器和电荷耦合器件 (CCD) 组成的增强电荷耦合器件 (ICCD) 接收,对于距离 z 处的目标,激光反射回来的时间为 $t=2z/c$, c 为实验所在大气中的光速,通过对时间 t 的测量便可以得到目标距离信息。基本测距方法为第一次测量时的增益随距离(或时间)调制变化,而第二次测量时的增益恒定不变,通过两者接收到光强的比值去除激光脉冲形状、目标反射率和大气散射率等相同因素从而求出脉冲返回的时间信息,得到目标距离信息,因此认为激光脉冲形状、目标反射率和大气散射率等因素对于测量精度的影响不大。当然,两次测量也可以由两路 ICCD 系统同时探测,其探测原理不变。

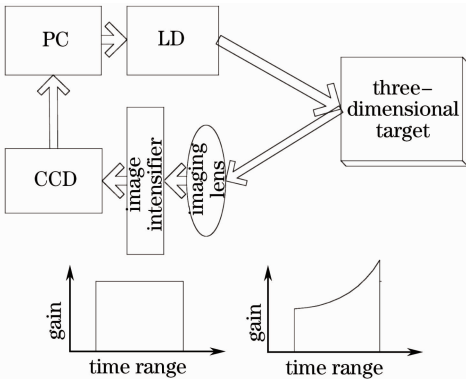


图 1 3D 成像激光雷达的基本构成

Fig. 1 Basic structure of the 3D active imaging laser radar

基本测距原理如图 2 所示。第一次测量时对像增强器施加距离调制增益,第二次测量对像增强器施加恒定增益,不同距离目标返回的光信号将在不同时间到达像增强器。由于第一次测量增益随距离变化,其输出光强将和距离有关,因此可以将距离信

息调制为光强信息。由于光强信息还与目标反射率和大气散射系数等因素相关,需要用第二次恒定增益探测得到的光强信息和第一次获得的光强信息一起才能准确地对距离信息进行解调。根据雷达方程^[11],从目标返回的回波光强信号为

$$I = \frac{D^2 \gamma \eta \exp(-2\kappa z)}{4z^2} \int_{\frac{2z}{c}}^{\frac{2z}{c}+T} P\left(t - \frac{2z}{c}\right) G\left(t - \frac{2z_0}{c}\right) dt, \quad (1)$$

式中 D 表示光学成像系统有效孔径, γ 是和目标反射率与光学系统效率有关的常数, η 表示像增强器的有效量子效率, κ 表示大气消光系数, z 表示被测目标距离光电探测系统的距离, T 表示增益选通时间, z_0 表示接收器相对于激光器的增益选通延迟时间所对应的距离, P 为光源功率, G 为调制增益。

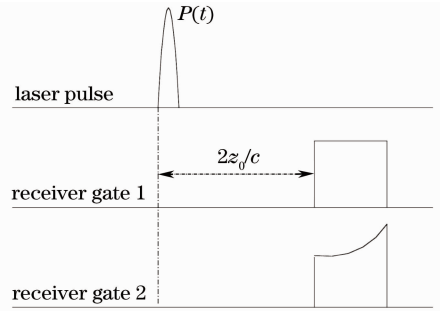


图 2 3D 成像激光雷达增益选通时序

Fig. 2 Gain strobe time sequence of the 3D active imaging laser radar

将两次测量的增益函数代入,则两次测量测得的光强值分别为

$$I_1 = \frac{D^2 \gamma \eta \exp(-2\kappa z)}{4z^2} \int_0^T P(t) G\left(t - \frac{2z_0}{c} + \frac{2z}{c}\right) dt, \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{D^2 \gamma \eta \exp(-2\kappa z)}{4z^2} \int_0^T P(t) A dt, \quad (3)$$

式中 A 为恒定增益,用(2)式除以(3)式得到

$$A \frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_0^T P(t) G\left(t - \frac{2z_0}{c} + \frac{2z}{c}\right) dt}{\int_0^T P(t) dt} = u(z). \quad (4)$$

由(4)式求出目标距离为

$$z = u^{-1}(AI_1/I_2) = f(AI_1/I_2) = f(u), \quad (5)$$

式中 $f(\cdot)$ 是 $u(\cdot)$ 的逆函数,若 $\Delta I_1 \ll I_1$, 且 $\Delta I_2 \ll I_2$, 则由(5)式得到测距误差和光强(灰度)测量误差的一阶近似关系为

$$\Delta z \approx \Delta \frac{df}{du} \left(\frac{\partial u}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial u}{\partial I_2} \Delta I_2 \right) = \Delta A f'(u) \left(\frac{\Delta I_1}{I_2} - \frac{I_1 \Delta I_2}{I_2^2} \right), \quad (6)$$

由于两次测量独立,因此 ΔI_1 和 ΔI_2 独立,从而由(6)式可以得到距离 z 的方差为

$$\delta^2 z = u^2 f'^2(u) \left(\frac{\delta^2 I_1}{I_1^2} + \frac{\delta^2 I_2}{I_2^2} \right). \quad (7)$$

由(7)得到测距误差即均方根(RMS)标准差值 δz 为

$$\delta z = |u f'(u)| \left[\left(\frac{\delta I_1}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta I_2}{I_2} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

由(8)式可知,增益函数 $f(\cdot)$ 的形式、光强比值和两次测量的光强信噪比决定了测距误差,同时测距误差还受输入散粒噪声以及测量区间宽度的影响^[12],通过对图像标定^[13],配准叠加^[14]也可以提高测距精度。由于增益函数 $f(\cdot)$ 的形式和光强比值可以由像增强器增益调制函数和目标距离共同决定,为了获得尽可能小的测距误差,就需要分析凝视3D成像测得的光强的信噪比。

3 光强测量误差分析

假如进入像增强器的等效光电子数平均值为 n (泊松分布决定了其方差为 n),增益为 G ,则光强为 Gn ,假设光强与其二值化灰度的关系系数为 b ,则由 CCD 探测得到的二值化光强值 $I = bGn$ 。

由光电探测过程可以看出,凝视3D成像系统有两次光电转换过程:1)信号光经过像增强器的光电阴极吸收的光电转换过程。在像增强器内部电子经过放大后又由荧光屏转换成放大的光信号;2)像增强器的输出光再由 CCD 相机转换成电信号。因此可以假设凝视3D成像系统的成像噪声主要由两部分组成,第一部分来源于像增强器的等效光电子散粒噪声,因光子由像增强器进行光电转换并放大而产生,其噪声表达式为

$$\delta_{MCP} = bG\sqrt{n}. \quad (9)$$

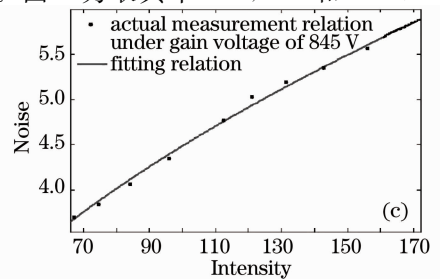
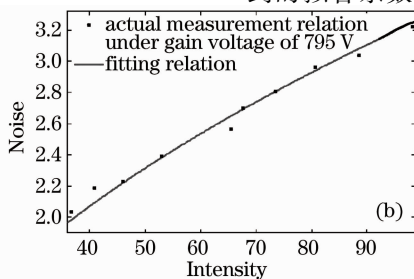
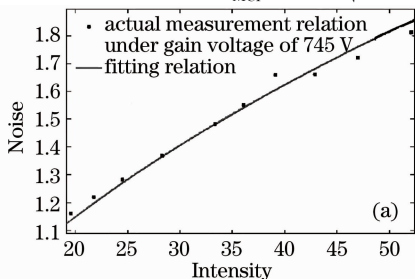


图3 (a) 745;(b) 795 和(c) 845 V 电压下噪声与光强的关系

Fig. 3 Relation between the intensity and noise under gain voltages of (a) 745; (b) 795 and (c) 845 V

光子经过像增强器转换成放大的光信号后再由 CCD 探测,CCD 探测过程中的光电转换而产生的光电子散射噪声为第二部分噪声:

$$\delta_{CCD} = b\sqrt{Gn}. \quad (10)$$

结合(9)和(10)式,可以总结出凝视3D成像系统的噪声中第一部分占据主导地位,由于这两部分噪声相互独立,且都服从泊松分布,因此可以认为光强方差的组成为这两部分和,得到总的探测光强噪声为

$$\delta I = \sqrt{b^2 G^2 n + b^2 Gn} = \sqrt{(G+1)bI}. \quad (11)$$

所采用的噪声测量实验系统如图1所示。光源为半导体脉冲激光器,其峰值功率为1.2 kW,中心波长为808 nm,激光器发出的光照射到3 m外的白色泡沫板反射后由探测系统接收,所使用的探测系统由第二代像增强器和 CCD 接收器组成。测量的方法为:1)在确定光强和确定电压条件下,对目标进行100次测量,获得100个光强值,记录平均光强和它们的均方根值,即光强噪声,此为一组实验数据;2)光源强度不变,改变像增强器增益,将像增强器的增益电压从700 V 逐渐增加到845 V,每隔5 V 按照1)进行一次测量,测得30组光强和噪声的数据;3)将脉冲激光器的周期从0.2 ms 调节到0.5 ms,选取其中10个不同周期时间用过程2)进行测量,总共测得了30×10组光强噪声数据。

对测得的30×10组数据进行分析。首先分析在增益不变的情况下噪声和光强的关系。由于大多数大信号光电噪声都主要受泊松噪声的影响,结合(11)式,对实验测得的噪声和光强数据采用最小二乘法进行数据拟合:

$$\delta I_i = \sqrt{a_i I_i}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, 29) \quad (12)$$

式中 i 为增益电压的序号,对应增益电压关系为: $V_i = 700 + 5i$ (V)。 δI_i 为光强噪声, a_i 为每组增益电压下对光强噪声和光强采用最小二乘法进行拟合得到的拟合系数。图3为取其中745,795和845 V 3

个典型增益电压,脉冲激光器的周期从 0.2 ms 调节到 0.5 ms 情况下的数据拟合情况,由图 3 可以看出其噪声和光强成平方根正比关系。当可信度为 95% 时,拟合系数的可信区间由图 4 表示, a_i 的可信区间的最大变化范围不超过拟合值的 4.5%, 因此该数据可信度比较高。(12) 式表示的误差形式与常见的光子散粒噪声符合泊松分布相似。

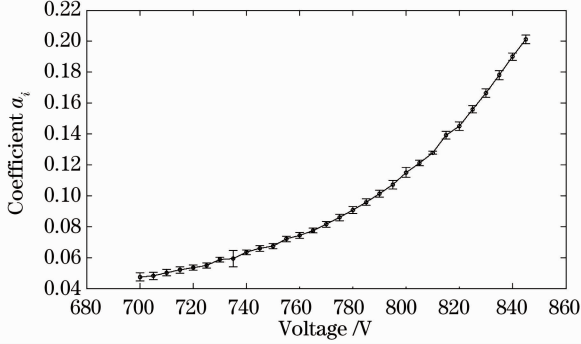


图 4 a_i 在可信度为 95% 的可信区间

Fig. 4 a_i with 95% confidence bounds

考虑 CCD 噪声相对像增强器噪声是否可以忽略的两种情况: 1) 如果 G 远大于 1, 即像增强器增益很大, 产生的噪声也很大, 而 CCD 产生的噪声很小, CCD 产生的噪声对于像增强器产生的噪声而言可以忽略不计, 则光强噪声为

$$\delta I_i = \sqrt{G_i b I_i}. \quad (13)$$

结合(12)和(13)式, 得到:

$$a_i = G_i b. \quad (14)$$

(14) 式表明光强噪声与光强的拟合系数和像增强器的增益成正比, 比例系数为 b 。根据参考文献[15, 16] 得出像增强器的增益和增益电压的关系为 $G = \alpha V^\beta$, 其中 α 和 β 是与二次电子发射系数和微通道长度有关的常数。然而对拟合系数 a_i 和增益电压 V 按照 $a_i = \alpha V^\beta$ 采用最小二乘法进行数据拟合的结果如图 5 中虚线所示, a_i 和增益电压 V 拟合曲线的类似度为 0.9872。2) 如果 G 仅略大于 1, CCD 噪声相对于像增强器产生的噪声不可忽略, 由(11)式得到光强噪声和光强的关系式为

$$\delta I_i = \sqrt{(G_i b + b) I_i}, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, 29) \quad (15)$$

其中第一项噪声来自于光子经过像增强器放大时的光电转换过程服从泊松分布; 第二项来自于光子由像增强器放大后经由 CCD 探测时的光电转换过程, 也服从泊松分布, 因此称这一过程为双随机变量泊松过程, b 也可看成代表第二部分噪声所占权重的大小。

为了得到第二部分光强噪声的权重因子 b , 可以固定光源强度不变, 对同一光源强度下不同增益

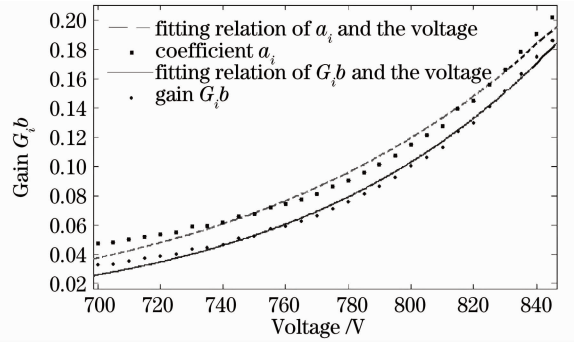


图 5 a_i 和 $G_i b$ 分别与增益电压的拟合关系

Fig. 5 Fitting relations between a_i and gain voltage and between $G_i b$ and gain voltage

电压的拟合系数 a_i 和光强数据按照 $a = I/n + b$ 采用最小二乘法进行数据拟合, 得到不同光源强度下的光子数 n 和权重因子 b , 对光源周期从 0.2 ms 到 0.5 ms 之间选取的 10 个不同周期时间进行 10 次拟合得到的 b 很接近, 取其平均值 $b = 0.014795$ 。

已知第二项噪声因子 b 以后, 结合(11) 式, 通过 $G_i b = a_i - b$ 得到对应电压下的 $G_i b$, 对 $G_i b$ 与电压 V 按照 $G_i b = \alpha V^\beta$ 采用最小二乘法进行数据拟合, 结果如图 5 中实线所示, 拟合曲线的类似度达到了 0.9942。

对比情况 1) 和 2), 可以看出在情况 2) 时得到的拟合类似度更高, 且可信度更高, 即 $G_i b$ 与电压 V 的关系比上述 a_i 更好地符合 $G = \alpha V^\beta$ 这个增益和增益电压模型。因此可以认为情况 2) 更符合实际系统的噪声, 也即第二部分噪声在该噪声模型中不能忽略不计。若对这两部分噪声进行比较, 得到后者与前者的比值关系为

$$7.9\% < b/(G_i b) = 1/G_i < 45.2\%, \quad (16)$$

再一次证实了 CCD 产生的噪声是不可忽略的, 特别当 CCD 光强值较小时 CCD 产生的噪声是光强噪声的一个重要组成部分。

4 增益函数的优化方法

为了简化上述 3D 成像模型, 假设整个成像过程是对进入像增强器的等效光电子放大并由 CCD 探测而得到光强图像的, 并且假设激光脉冲宽度相对于增益选通时间而言可以忽略不计, 相当于距离调制增益在和光脉冲积分的过程中保持不变, 从而可以得到测距公式:

$$A \frac{I_1}{I_2} = \frac{P(0)G \left[\frac{2(z-z_0)}{c} \right]}{P(0)} = G \left[\frac{2(z-z_0)}{c} \right] = u(z), \quad (17)$$

式中 $P(0)$ 是起始时刻发出的激光脉冲能量, 该数值与经过目标反射后到达像增强器的等效光子数 N 成正比关系, 并且该光子数在经像增强器进行光电转换过程中服从泊松分布, 假设在两次探测的过程中, 到达像增强器的等效光子数 N_1 和 N_2 都服从泊松常数平均值为 n 的泊松分布; 由泊松分布的特性, 得到其方差也是 n 。则两次探测得到光强 I_1 和 I_2 的每个像素光强的平均值都和光子数的平均值 n 成正比, 即两次探测得到的光强平均值为

$$\langle I_1 \rangle = ku(z)n, \quad (18)$$

$$\langle I_2 \rangle = kAn, \quad (19)$$

式中 k 为两次探测过程中的相同因素, 如大气散射率、目标反射率和激光发散角等, $u(z)$ 为距离调制增益, 在光脉冲宽度可以忽略时, $u(z)$ 在和光脉冲积分的过程中保持不变。由(17)~(19)式, 可以得到距离

$$z = u^{-1} \left(A \frac{\langle I_1 \rangle}{\langle I_2 \rangle} \right) = f(u). \quad (20)$$

由(8), (20)式, 距离误差可以写成:

$$\delta z = |uf'(u)| \left[\left(\frac{\delta I_1}{\langle I_1 \rangle} \right)^2 + \left(\frac{\delta I_2}{\langle I_2 \rangle} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (21)$$

式中 δI_1 和 δI_2 分别是两次探测得到的光强噪声。结合(11), (17)~(19)和(21)式, 得到距离误差和平均光子数的关系为

$$\delta z = |uf'(u)| \sqrt{\frac{2}{n} + \frac{1}{An} + \frac{1}{un}}. \quad (22)$$

为了使测得的距离误差最小, 可以使(22)式两边对 z 求微分。由于微分意义下最小值为 0, 即 $d(\delta z)/dz=0$ 。可以假设能得到的最小测距误差为 m , 这样可以得到 $\delta z=m$ 。通过对上述增益函数进行微分方程的求解并结合(17)和(22)式, 解得所需要的增益距离函数的形式为

$$G(z) = \left\{ \exp[(z - z_0 - d) \sqrt{2 + 1/A}/(m\sqrt{n})] - \frac{1}{2(2 + 1/A)} \right\}^2 / \{2 \exp[(z - z_0 - d) \sqrt{2 + 1/A}/(m\sqrt{n})]\}. \quad (23)$$

对于实验系统而言, 可以通过恒定增益电压计算得到 A, d 为和系统参数有关的积分常数。

5 增益函数的优化举例

实验系统增益电压为 800 V 时的等效恒定增益系数为 6.757, 当激光脉冲周期为 0.2 ms 时, 等效光子数大约为 1000。假设起始增益值为 $G(z_0) = g_0$, 可以计算得到积分常数 d 为

$$d = -\frac{m\sqrt{n}}{\sqrt{2 + 1/A}} \ln \left[g_0 + \frac{1}{2(2 + 1/A)} + \sqrt{g_0^2 + \frac{g_0}{2 + 1/A}} \right]. \quad (24)$$

假设选取的起始增益 $g_0 = 0.1$, 最大变化到 $g_{\max} = 10$, 光强值在 0~255 之间, 则测距景深和测距精度的关系为

$$z_{\max} - z_0 = 77.3 \text{ m}, \quad (25)$$

假设起始选通距离为 $z_0 = 1000 \text{ m}$, 测距误差为 $\delta z = m = 1 \text{ m}$, 测距景深大小为 77.3 m, 将上述数据代入(23)式, 化简为

$$G(z) = \frac{0.57 \times \exp(0.0463z - 46.3)}{2} + \frac{0.233^2}{2 \times 0.57 \times \exp(0.0463z - 46.3)} - 0.233, \quad (26)$$

如果采用(26)式的增益函数, 其误差恒定为 1 m。

假如在相同参数条件下, 选取的增益函数在 1000~1077.3 m 范围内从 0.1 线性变化到 10, 则误差范围为

$$\delta z_{\text{line}} \in [0.086 \text{ m}, 3.688 \text{ m}], \quad (27)$$

假如在相同参数条件下, 选取的增益函数在 1000~1077.3 m 从 0.1 按指数变化到 10, 则误差范围为

$$\delta z_{\text{exp}} \in [0.796 \text{ m}, 1.85 \text{ m}]. \quad (28)$$

假如在相同参数条件下, 选取的增益函数在 1000~1077.3 m 范围内从 0.1 按时间平方变化到 10, 则误差范围为

$$\delta z_{\text{exp}} \in [0.089 \text{ m}, 3.569 \text{ m}]. \quad (29)$$

通过上述比较可见线性调制以及指数调制增益的测距误差都会随着测量距离而变化, 且最大的测距误差比本文提出的增益曲线所得的误差(1 m)大 80% 以上, 证明了该优化方法对提高 3D 成像系统的测距精度有较大意义。

6 结 论

分别对固定增益电压情况下改变光强以及固定光强情况下改变增益电压测得的光强及光强噪声实验数据进行处理分析。得出了在 3D 探测系统的实际工作条件下, 一部分噪声来自于像增强器的等效

光电子散粒噪声,另外一部分来自于 CCD 器件光电子散粒噪声的结论。在 CCD 光强值较低条件下, CCD 器件光电子散粒噪声不能忽略。建立了双随机变量泊松过程的 3D 成像噪声模型。利用该模型给出了测距误差最小意义下的最优增益距离函数的例子,该函数使测距误差与测距范围相互独立,与线性增益误差范围以及指数增益误差范围相比,该增益模型使测距误差在一定测量景深范围内相对稳定,且测距误差小,因此可以通过改变测距景深来调整测距精度,更好地提高了凝视成像 3D 激光雷达的测距性能。

参 考 文 献

- 1 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2584~2589
王建宇,洪光烈,卜弘毅等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2584~2589
- 2 J. Busck, H. Heiselberg. High accuracy 3-D laser radar[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 257~263
- 3 J. Busck, H. Heiselberg. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4705~4710
- 4 J. Busck. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(11): 116001
- 5 J. F. Andersen, J. Busck, H. Heiselberg. Pulsed Raman fiber laser and multispectral imaging in three dimensions[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(24): 6198~6204
- 6 M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(21): 3146~3148
- 7 Zhang Xiuda, Yan Huimin, Jiang Yanbing. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1219~1221
- 8 Chenfei Jin, Xiudong Sun, Yuan Zhao *et al.*. Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3550~3552
- 9 P. Cho. 3D organization of 2D urban imagery[C]. *SPIE*, 2008, **6968**: 696817
- 10 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315~320
董云升,刘文清,刘建国等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 315~320
- 11 O. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander *et al.*. Gated viewing for target detection and target recognition [C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 432~448
- 12 Xiuda Zhang, Huimin Yan, Qin Zhou. Investigations of range accuracy for long-range three-dimensional active imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(6): 061101
- 13 Jiao Hongwei, Qin Shiqiao, Hu Chunsheng *et al.*. Research on the coordinates calibration of pulse lidar and camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0108006
焦宏伟,秦石乔,胡春生等. 一种脉冲激光雷达与摄像机标定方法的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0108006
- 14 Yao Jinliang, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Image registration and superposition for improving ranging accuracy of imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1613~1617
姚金良,严惠民,张秀达等. 一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1613~1617
- 15 I. P. Csorba. Current gain parameters of microchannel plates [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(22): 3863~3866
- 16 E. H. Eberhardt. Gain model of microchannel plates[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(9): 1418~1423