

doi:10.3788/gzxb20174612.1203001

光子计数深度获取系统误差机理研究和矫正

沈姗姗^{1,2}, 叶荣诚¹, 陈艳¹

(1 南京理工大学紫金学院, 南京 210023)

(2 南京理工大学 光谱成像和智能感知重点实验室, 南京 210094)

摘 要:采用两路光子时间到达点构建光纤式光子计数伪随机码深度获取系统.为了研究降低深度误差的方法,以高斯函数为激光回波脉冲,计算瞬时概率密度函数,引入“时间行走”效应数学模型,推导深度误差克拉美罗下限.随着激光回波能量的增大,深度误差先降低再增大,并且码长越长,深度误差越小.采用理论推导的累积分布函数,生成光子时间到达点,蒙特卡洛仿真伪随机序列光子探测过程,结果大于理论数值模拟,符合克拉美罗下界原理.17 组标定实验表明:由于目标表面特性的不同而导致探测到激光回波中光子数的浮动,该浮动引发光子“时间行走”效应,并带来伪随机码深度获取系统的互相关函数的整体偏移.采用数值拟合方程拟合不同光子计数比例值下的深度误差,测量得到的光子计数比例值,代入拟合的矫正方程,矫正后的深度均方误差下降至 1 cm.

关键词:深度误差;克拉美罗下界;时间行走效应;伪随机码

中图分类号:TH724

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1203001-9

Error Theory Research and Correction on Depth Acquisition Photon Counting System

SHEN Shan-shan^{1,2}, YE Rong-chen¹, CHEN Yan¹

(1 College of Zijin of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210046, China)

(2 Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Two channels of photon arrivals are applied to construct fiber pseudo-random depth acquisition photon counting system. In order to find the method to diminish the depth error, Gauss function is used to model laser echo pulse. By calculating the probability density function, the time walk effect is introduced and the Cramer-Rao lower boundary is modeled. The theory model proves that with the growing signal energy, the depth error decreases sharply firstly and then rises and the longer code length can bring smaller depth error. From the theoretical part, using the cumulative distribution function to generate photon arrivals and simulate the pseudo-random depth acquisition photon counting system, Monte Carlo simulation results are larger than the numerical modelling, which agree with Cramer-Rao lower boundary. 17 experimental tests also converge to the presented boundary model in this paper. It has been proven that fluctuation of the number of detected photon counts in the laser echo pulse caused by different target reflection leads to the depth drift of Correlation Function on pseudo-random depth acquisition photon detection process. Finally, numerical fitting function is used to determine the relationship between the depth error and the photon counting ratio. Depth error is calibrated by substituting the measured photon counting ratio into numerical fitting function. The corrected depth

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61101196, 61271332),江苏省自然科学研究面上项目(No.168JB510015),江苏省六大人才高峰项目(No.2014-DZXX-007)资助

第一作者:沈姗姗(1985—),女,讲师,博士,主要研究方向为激光雷达三维成像.Email:213104000042@njjust.edu.cn

收稿日期:2017-06-28; **录用日期:**2017-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

RMSE is decreased to 1 cm.

Key words: Depth error; Cramer-Rao lower boundary; Time walk effect; Bitstream

OCIS Codes: 140.3538; 030.5260

0 引言

近年来时间相关光子计数的伪随机码深度获取系统将光子计数技术和伪随机码扩频系统结合^[1-4],广泛应用于生物成像^[6]、远程探测等领域.该系统将发送的伪随机码和接收的伪随机码互相关,最大不模糊深度以及测量时间不受系统本身的局限^[1-4].

目前该类系统的深度值往往通过质心拟合算法或峰值提取法获得.众所周知,噪声光子降低系统信噪比,展宽互相关波形,引入距离误差,是降低距离确度的关键因素之一^[4,6-8,21].文献[4,21]指出增长码长可降低一部分噪声能量,提高系统确度和信噪比.然而,深度误差不仅仅只受噪声的影响,有作者讨论了信号功率对深度误差的影响,其指出即使在噪声可忽略不计的情况下,深度误差也会维持一个非零的有限数值,该误差值是由信号能量的浮动带来的^[11-12].然而,该类研究仅仅指出表征信号能量或与深度的均方误差成反比.实际情况是,单光子探测器存在“时间行走”效应^[9-10],或称为“抖动”,即单位时间内探测到的光子数越多,所产生的单个时间到达点的超前越大,引入的误差越大,系统确度越低.这种激光脉冲回波能量的差异引入额外的“时间行走”效应带来的问题是:相同距离的两个目标,高反射率目标测量得到的距离值比实际距离近,而低反射率目标测量得到的距离值比实际距离远.该现象在多脉冲累积激光雷达深度获取系统中已被验证并矫正^[5,13-15].在伪随机码序列探测中,由于目标表面特性不同而导致激光回波能量的变化,该能量变化的激光回波由单光子探测器接收后,必然带来“时间行走”效应,导致陆续到达的时间点的偏移,从而带来互相关波形的整体偏移.有必要研究激光回波能量对该类系统的误差影响的机理,并矫正“时间行走”效应带来的深度误差.

本文基于随机过程和光子统计学理论,以高斯函数^[16]为光波脉冲模型推导光子瞬时概率密度函数,建模“时间行走”效应,推导深度克拉美罗下界,用均方误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)^[11-12]估计深度误差, RMSE 越小,深度误差越小,系统深度确度越高.研究深度误差、码长、抖动和激光回波脉冲能量的相互制约关系.将光子瞬时概率密度的累积分布函数(Cumulative-Distribution-Function, CDF)引入伪随机码探测蒙特卡洛仿真中,仿真结果大于理论下界,符合原有理论模型变化趋势,理论和仿真论证随着激光回波脉冲能量的增大,深度误差先减小再增大.本文所构建的双路探测的光子计数伪随机码深度获取系统,通过采集两路光子到达时间点,一路为参考码型,另一路为经过延时后的接收码型,可有效避免高电平脉冲的不同步带来的互相关波形展宽等问题^[3].在光路上采用收发共路的光学系统,最大程度降低噪声对系统的影响,提高光子接收效率.采用基于快速傅里叶变换的实时数据处理方法,降低探测时间,提高探测效率.实验验证理论模型,并且标定探测到的光子计数比例和深度误差的关系曲线,矫正后的深度 RMSE 从 9 cm 下降至 1 cm.

1 系统模型

本系统实验平台主要包括基于可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的 2.5Gbps 伪随机码发生器、垂直表面激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)、分路器(Splitter)、单光子探测器组(Single Photon Avalanche Diodes, SPADs)、时间相关光子计数记录仪(Time to Digital Converter, TDC)、光环行器(Circulator)、准直/耦合器(Collimator/Coupler).系统框图见图 1,为了保证发射和接收的效率,采用光纤准直/耦合器(Collimator/Coupler)聚焦光斑并高效耦合空间光入光纤;采用基于环形器(Circulator)的收发共路的光路结构,实现发射光路和返回散射光的高效分离探测.伪随机码发生器的码速已在文献[17]中测试,其驱动垂直表面激光器发送伪随机码光脉冲,经过 1:99 分路器光纤耦合入一个 SPAD,经由 TDC 0 通道接收后,获得参考路光子时间到达点;分路器的另一个端口通过环形器和光纤准直/耦合器发出光脉冲到目标,返回的光脉冲通过准直/耦合器耦合入环形器,通过环形器耦合入另一个 SPAD,经由时 TDC 1 通道接收后,获得接收路光子到达时间点.

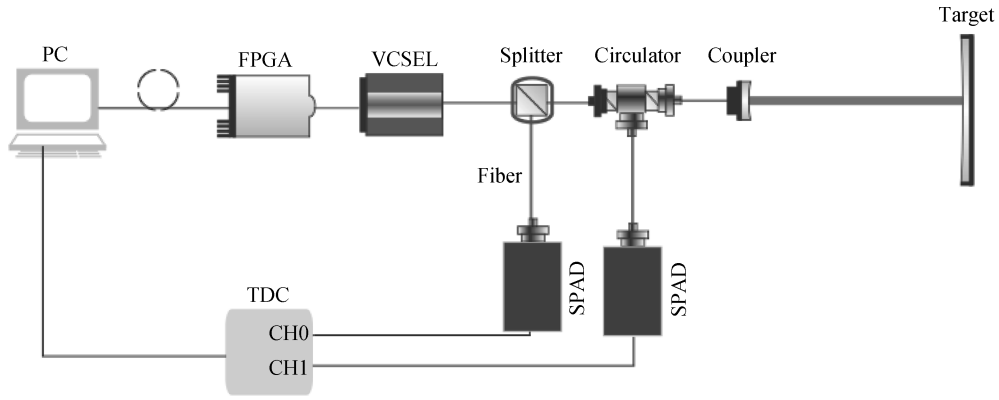


图1 系统框图

Fig.1 System schematic

电脑实时获取两路时间到达点,计算互相关函数并提取深度数值.

$$\overline{\epsilon_r^2} = 0.25Q^{-1}W_a^{-2} \quad (1)$$

式中, Q 为信号总能量, W_a 为信号有效带宽^[12],则

$$\overline{\epsilon_r^2} = \frac{1}{\langle N_s \rangle} \frac{(\sigma_f^2 + \sigma_T^2)(2\sigma_f^2 + \sigma_T^2)^3}{\sigma_f^3(3\sigma_f^2 + 2\sigma_T^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{K} \frac{(\sigma_T^2)(2\sigma_f^2 + \sigma_T^2)^3}{8\sigma_f^3(3\sigma_f^2 + 2\sigma_T^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

其中, σ_f 为高斯光波的标准差脉冲宽度.采用高斯函数建模目标导致的时间展宽, σ_T 为高斯函数标准差; $\langle N_s \rangle$ 为探测到的光子计数值, K 为探测次数^[11].

根据以上实验系统,建立深度误差下界模型.为了将“时间行走”效应引入深度误差估计,将激光脉冲回波波形假设为高斯函数, σ 为高斯标准差^[16]

$$G(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

则激光脉冲回波的半高全宽(Full Wave at Half Maximum, FWHM)为^[16]

$$\text{FWHM} = \sigma\sqrt{8\log 2} \quad (4)$$

伪随机序列是由 0,1 组成的高斯激光脉冲回波调制而成,采用 $a(t)$ 表示

$$a(t) = \sum_0^{N-1} a(n)G(t - nT_c) \quad (5)$$

其中, $a(n)$ 表示 0,1 码元, T_c 是一个码元持续的时间, N 表示码长^[11].

激光脉冲回波包含所有光子数表示为^[5]

$$m_s = \frac{P_R}{h\nu} \int_0^\infty G(t) dt \quad (6)$$

其中, $h\nu$ 为光子能量, P_R 是激光脉冲回波功率.从该表达式看出,激光回波能量越大,激光脉冲回波包含的光子数越多.

假设接收到的噪声功率为 P_B , τ_d 为脉冲碰到目标往返一次的时间延时, η 为量子效率,则光子探测器接收到的伪随机码光子计数率 $y(t)$ 为

$$y(t) = \frac{P_R\eta}{h\nu} a(t - \tau_d) + \frac{P_B\eta}{h\nu} \quad (7)$$

根据上式,可得接收到的伪随机码光子流密度为:

$$\phi(t) = A_p a(t - \tau_d) + B_p \quad (8)$$

其中, A_p 为所探测到的信号光子流密度幅度大小, B_p 为探测到的噪声光子计数率.

则在 t 时间范围内的累积分布函数(CDF)为

$$c(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \Psi(u) du\right] \quad (9)$$

探测到的光子时间到达点瞬时概率密度函数(Probability Density Function, PDF) $p(t)$ 是累积分布函

数的导数^[16],则

$$p(t) = \Psi(t) \exp \left[- \int_0^t \Psi(u) du \right] \quad (10)$$

在 T 时间范围内,探测 n 个光子时间到达点的联合概率密度函数为^[11]

$$p[t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d] = \left[\prod_{i=1}^n \Psi(t_i) \right] \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_0^{t_i} \Psi(u) du \right] = \left[\prod_{i=1}^n \Psi(t_i) \right] \exp \left[- \int_0^T \Psi(u) du \right] = \left[\prod_{i=1}^n \Psi(t_i) \right] \exp[-M] \quad (11)$$

其中 M 表示任一常量,变量 n 由码长和码为 1 的比例决定^[18],基于最大似然估计计算(Cramer-Rao lower boundary, CRLB)下限,伪随机码光子时间到达点的似然函数为

$$\ln[p(t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d)] = \ln[\Psi(t_1)] + \ln[\Psi(t_2)] + \cdots + \ln[\Psi(t_n)] + (-M) \quad (12)$$

时间延时 τ_d 的二阶导数的均值可以表示为

$$-E \left\{ \frac{\partial^2 \ln\{p[t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d]\}}{\partial^2 \tau_d} \right\} = - \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \frac{\partial^2 \ln\{p[t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d]\}}{\partial \tau_d^2} dt = - \int_0^{\infty} \Psi(t) \exp \left[- \int_0^t \Psi(u) du \right] \frac{\partial^2 \ln\{p[t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d]\}}{\partial \tau_d^2} dt \quad (13)$$

$$\sigma_{\tau\text{CRLB}} = \frac{1}{-E \left\{ \frac{\partial^2 \ln\{p[t_1 t_2 \cdots t_n | \Psi(t), \tau_d]\}}{\partial \tau_d^2} \right\}} \quad (14)$$

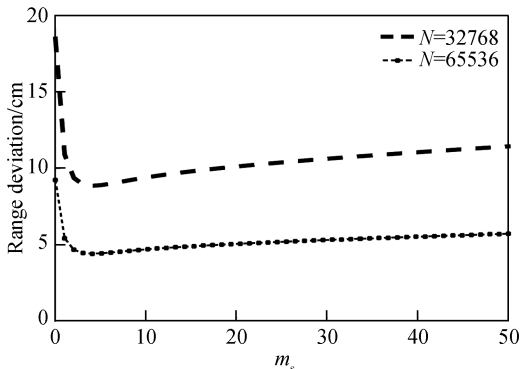
则假设光在空气中传播速度为 c ,则深度的 CRLB 为

$$\hat{\sigma}_{\text{error}} = \frac{C}{2} \times \sigma_{\tau\text{CRLB}} \quad (15)$$

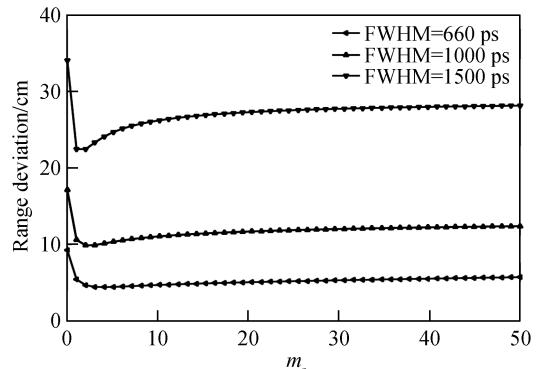
2 理论模拟和蒙特卡洛算法

本文基于高斯脉冲回波模型推导光子瞬时概率密度(PDF),其描述当激光回波能量增强,探测到的光子时间到达点概率密度函数峰值先从真实深度值右侧向真实深度值靠近,当激光回波能量继续增强,光子时间到达点瞬时概率密度函数峰值将超前于真实深度值,即从真实值附近向其左侧偏移,并且随着激光回波能量的增强,超前数值增大^[16],参见文献[16]图 2.本文采用该模型对“时间行走”效应建模,以 FWHM 作为描述“时间行走”效应的偏移量.假设 FWHM 为 440 ps,则模拟的 PDF 有约 600 ps 的“时间行走”偏移量.将该模型引入光子计数伪随机码深度获取系统的深度误差估计中.

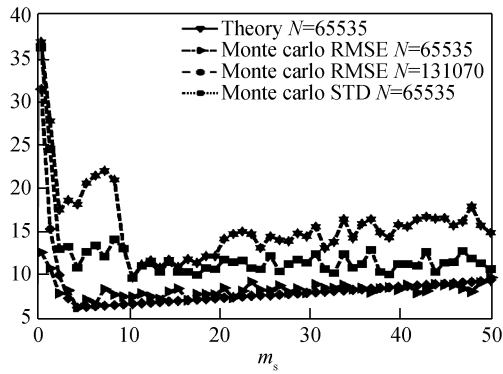
由于式(14)无法计算闭合的解析式,采用数值模拟对目标深度 CRLB 下限进行理论估计.其中,根据式(6),激光脉冲回波能量和激光脉冲包含的光子数 m_s 成正比.则根据式(14)、(15)得到深度偏移和激光回波能量(激光回波包含的光子数 m_s)之间的关系,如图 2 所示.目标深度 60 m,背景噪声 10 Mc/s(兆个/秒),抖动 660 ps 下,脉冲回波包含所有的光子数在 0.01~50 范围内,当 m_s 从 0.01 增加到 3.4~4.4 左右,深度误差迅速下降;再随着光子数的增大,深度误差缓慢上升并趋于某一稳定数值,如图 2(a),(b)所示.和文献[11-12]研究结果相比,当激光回波能量增大时,距离误差下降,与式(1)(2)吻合^[11-12],但当激光回波能量继续增



(a) Theory prediction of range error on different code length



(b) Theory prediction of range error on different FWHM



(c) Contrast of theory prediction and Monte Carlo simulation with different code length

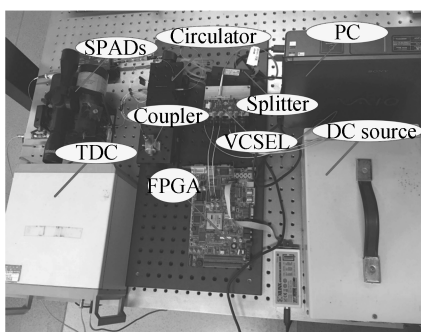
图2 误差理论建模

Fig.2 Error theory model

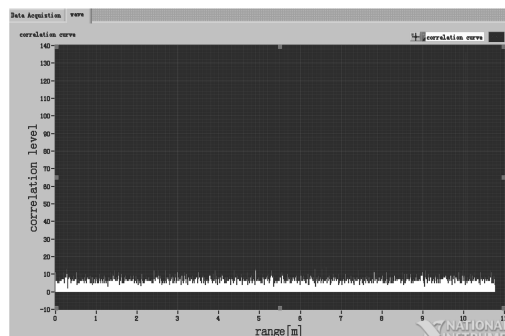
大时,本文考虑了时间行走效应,激光回波能量的增大使得单光子探测器响应的时间点超前,从而增大了距离误差,降低距离精度.在前人的研究基础上,该数值模拟的理论模型更加完善.其中,图2(b)给出激光回波脉冲的半高全宽 FWHM 越高,即每一个时间点产生的时间行走误差越大,最终引入的深度误差越大.图2(c)蒙特卡洛仿真采用伪随机码深度获取系统蒙特卡洛算法^[18],将式(10)描述“时间行走”效应的概率密度函数引入蒙特卡洛算法,单个光子时间到达点由式(9)累积分布函数(CDF)生成^[16].克拉美罗下限指的是测量得到的距离值均方误差的无偏估计的下限.其数值只能无限逼近,不能低于此下界^[11-12,16].同等距离的目标,在 50 Mc/s 的背景噪声和 660 ps 的半高全宽下,星型点仿真结果比菱形点理论数值大,满足克拉美罗下限数值模拟条件.同等实验条件下,图2(c)STD(标准差)随着信号能量的增大先下降再趋于稳定,而 RMSE 随着信号能量增大先减小再增大,更符合理论数值模拟.原因是虽然 STD 和 RMSE 都是深度误差的无偏估计,但由于单光子探测器的输出信号是有偏的,这种偏差导致 RMSE 大于 STD,如图2(c)的 65 536 码长星型点误差略大于正方形点误差.图2(c)蒙特卡洛仿真中,65 535 码长的星型点的误差大于 131 070 码长的正方形点误差,和图2(a)数值模拟共同证明码长增大,误差减小,和文献[4]研究结果吻合.同时,图2也指出码长增长无法解决信号能量(激光回波包含的光子数 m_s)从 4.4 增大到 50 带来的“时间行走”效应的误差引入问题,有必要找到深度误差的矫正方法.

3 实验验证和误差矫正

根据图1搭建实验系统,实物图如图3(a).实验系统死时间 80 ns,抖动 600 ps 左右,测量距离系统 10 m 左右的目标.TDC工作在 T2 模式,积分时间 0.001 s,两路伪随机码互相关可避免高电平同步脉冲与码开始发送时刻之间的不同步问题,通道 0 为参考路光子到达时间点,通道 1 为经过延时后的接收路光子到达时间点.垂直表面激光器 Mset 口电压用以调整激光发射功率,Bset 口用于调节消光比.采用 Matlab 生成伪随机码,装载入FPGA RAM中,实现发送2.5 Gbps的码流.本课题组在文献[17]中详细描述其工作过程.在该



(a) Photograph of the assembled system



(b) Calibration result of range error

图3 光子计数伪随机码深度矫正系统

Fig.3 Pseudo-random photon counting depth correction system

实验中,计算得到参考码型中包含的“1”的个数用 R_{base} 表示,约为 1.3 Mc/s 左右,调整光衰减器,使通道 0 (参考路)探测到的光子数约为 1.3 Mc/s.将 labview 嵌入 Matlab 算法实现伪随机序列在线重构,基于快速傅立叶变换实现互相关函数实时获取.图 3(b)给出探测到的光子数约为 0.6 Mc/s 下,1 000 点实时互相关波形图,互相关峰值在 10 m 左右,表征距离系统 10 米左右的目標一维距离像.图 4 为 labview 实时获取的波形序列导入 Matlab 后,在峰值左右各取 50 点的互相关函数波形.

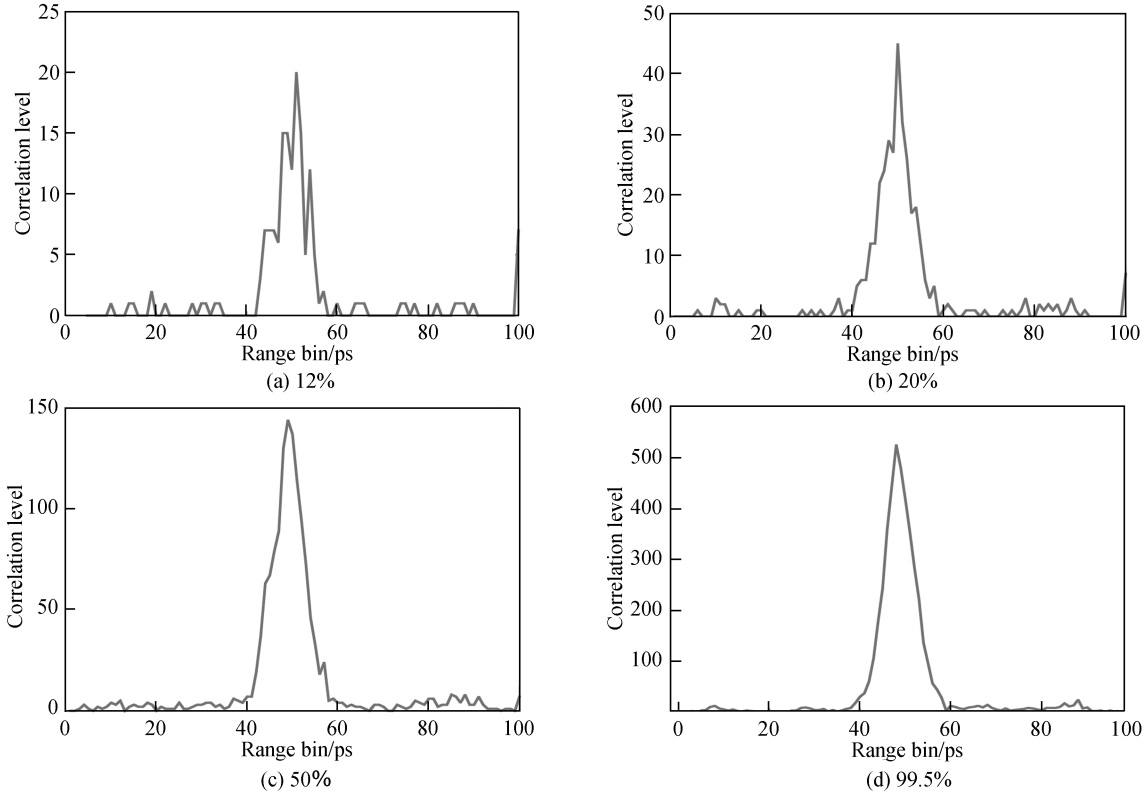


图 4 互相关函数
Fig.4 Correlation function

理论建模和仿真均针对激光回波能量(激光回波包含的光子数目 m_s)和深度误差的关系进行论证,由于实验中无法直接测量激光回波包含的光子数目,所以定义光子计数比例 R 为第 i 次探测(通道 1)接收路所探测到的光子计数值 R_{det} 除以(通道 0)参考路探测到的光子计数值 R_{base} ,如式(16).参考路光子计数值 R_{base} 不变,光子计数比例表征探测器探测到的回波光子计数值和完全探测的光子计数值的相对大小,光子计数比例和激光回波包含的光子数成正比.

$$R(i) = \frac{R_{det}(i)}{R_{base}} \tag{16}$$

图 5 给出深度拟合曲线和矫正结果,实施步骤如图 6,具体描述为:

1) 装载伪随机码,激光器上电,发送 2.5 Gbps 的伪随机码光脉冲.

2) 调整 0 通道参考路 SPAD 所对应的光纤固定光衰减器,使其时间到达点的光子计数值 R_{base} 为 1.3 Mc/s.

3) 标定时,在图 1 准直/耦合器前端放置偏振片,通过调整偏振片角度和接收路 SPAD 端口的光纤可调衰减器,以减小 1 通道反射回波的光强.首先获得第一组光强下的接收路回波光子计数值,记为

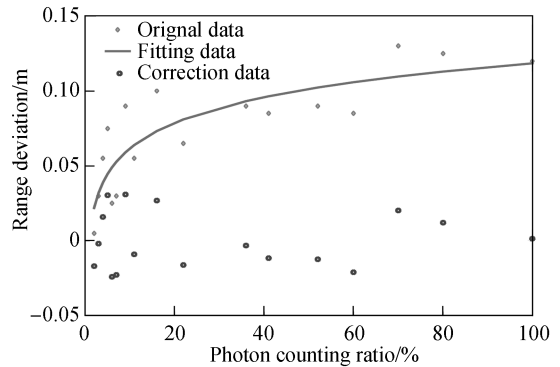


图 5 误差矫正
Fig.5 Calibration result of depth error

$R_{\text{det}}(i=1)$.

4) 计算第 1 组光子计数比例 $R(1) = \frac{R_{\text{det}}(1)}{R_{\text{base}}}$.

5) 重构两路光子时间到达点,生成参考路 0,1 序列 $x(n)$ 和接收路 0,1 序列 $y(n)$,采用快速傅里叶变换算法计算互相关函数 $C(n)$.

6) $C(n)$ 为第 n 个深度单元对应的的光子计数值, $\tau(n)$ 为对应第 n 个深度单元的光子飞行时间值,计算第 1 组光子计数比例下,互相关函数峰值左右各取 50 点的质心拟合深度值

$$d(i=1) = \frac{3 \times 10^8 \sum_{n=1}^{100} C(n)\tau(n)}{2 \sum_{n=1}^{100} C(n)} \quad (17)$$

7) 逐次减小激光反射回波能量,重复步骤(3)-(6),直到探测到的互相关函数波形严重失真,记下失真前一次,第 17 次实验的光子计数比例值 $R(17)$ 和其所对应的深度数值 $d(17)$,第 17 次实验的光子计数比例为 $3 \times 10^4 / 1.3 \times 10^6$;17 组实验中,取 4 组实验数据,给出互相关波形,如图 4 所示.图 4(a)-(d) 的光子计数比例值从 12% 增大到 99.5%;可见,随着探测到的激光回波光子数增多,即激光回波能量增大,互相关函数信噪比提高,但深度误差增大,互相关函数的超前位移越多.

8) 根据第 2 部分理论建模和仿真图 2(a), m_s 在 4.4~50 范围内,激光回波能量越低,深度误差越小,光子时间到达点越接近真实距离.基于此,以 17 组实验中激光回波能量最低的一组深度值,即探测到的光子数为 $3 \times 10^4 \text{ c/s}$,光子计数比例 $R=2\%$ 时,对应的深度值为参考深度值 $d_{\text{reference}}$,将实验得到的 17 组深度值 $d(i) (1 \leq i \leq 17)$ 与参考深度值 $d_{\text{reference}}$ 相减即

$$d_{\text{error}}[R(i)] = d(i) - d_{\text{reference}} \quad (18)$$

得到图 5 的菱形数据点为相应光子计数比例 $R(i)$ 下的原始误差值 $d_{\text{error}}[R(i)]$.

9) 基于线性回归模型,采用最小方差拟合法,拟合原始误差值和光子计数比例之间的关系,计算得到拟合系数为 $a=0.06, b=0.047$,得到拟合曲线为图 5 实线,拟合方程为:

$$d_{\text{error}}[R(i)] = 0.06 \ln[R(i)] + 0.047 \quad (19)$$

10) 计算矫正后的深度值 $d_{\text{correct}} = d(i) - d_{\text{error}}[R(i)]$.图 5 圆形点为矫正后的深度误差,可见随光子计数比例值的变化,圆形点浮动小于菱形点的数据浮动.17 组实验的深度 RMSE 从矫正前的 9 cm 下降至矫正后的 1 cm.

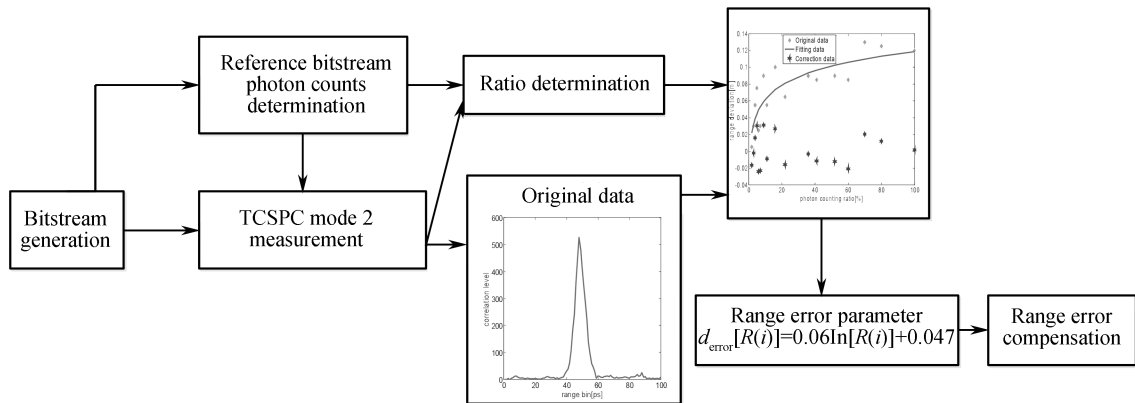


图 6 矫正算法流程

Fig.6 The implement of the correction algorithm

4 结论

本文建立两路随机信号互相关的深度误差下界模型,该模型讨论了码长、激光回波能量(激光脉冲包含的光子数)、半高全宽等对深度误差的影响机理.所提出的深度误差的克拉美罗下限估计中,理论和蒙特卡洛实验共同验证“时间行走”效应对伪随机码深度获取系统深度误差的影响,给出激光回波能量增强使得深度

误差先减小再增大的理论依据,并且通过实验证明.需要补充说明的是:1)本文以测量得到的光子计数比例的浮动,表征激光回波能量的浮动,实验验证由于激光脉冲回波能量的增大,引发光子“时间行走”效应,并导致互相关函数的深度前移,误差增大,准确度下降;2)实验中当接收路探测到的光子数小于 3×10^4 c/s时,深度峰值被淹没,深度误差剧烈增大,与理论模拟图2(a)中,激光脉冲包含的光子数从4.4下降到0.01时,深度误差剧烈增大相互印证;1)2)点完整验证式(14)、(15)激光回波能量的增大,深度误差先减小再增大的理论依据;并且本文提出的矫正方法是针对一定激光回波能量范围,如探测到的光子数小于 3×10^4 c/s时,该激光回波能量过低,采样次数严重不足而导致互相关波形峰值几乎淹没的误差矫正没有研究,是今后研究工作的重要开展方向.3)本文提出的深度矫正是以0通道参考路探测到的光子计数值为基准,当0通道参考路探测到的光子计数值增大或者减小,会引入新的深度偏移;最后需要指出的是,本文研究的最终目的不是为了寻找深度误差最小时对应的最优激光回波能量,也不在于找到测量值与真实的深度误差,而是通过理论建模证明激光回波能量的改变对深度误差的影响,并且通过标定实验矫正不同激光回波能量带来的深度相对误差,提高深度准确度.

参考文献

- [1] HISKETT P A, PARRY C S, AONGUS M, *et al.* A photon-counting time-of-flight ranging technique developed for the avoidance of range ambiguity at gigahertz clock rates[J]. *Optics Express*, 2008, **16**: 13684-13689.
- [2] ZHANG Yu-fei, HE Yan, FENG Yu, *et al.* Three-dimensional imaging lidar system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting[J]. *Chinese Optics Letter*, 2016, **14**(11): 111101-111103.
- [3] KRICHELN J, AONGUS M, BULLER G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. *Optics Express*, 2010; 18, 9192-9195.
- [4] YANG Fang, ZHANG Xin, HE Yan, *et al.* Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 0614003.
杨芳,张鑫,贺岩,等.基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J].中国激光,2014,**41**(6):0614003.
- [5] SEOK M O, KONG H J, KIM T H, *et al.* Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche Photodiode[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**: 304-308.
- [6] ZHANG Qiang, CHEN Ling. Pseudo-random single photon counting: a high-speed implementation[J]. *Biomedical Optics Express*, 2007, **1**(1): 41-45.
- [7] RYBALTOWSKI A, TAFLOVE A. Signal-to-noise ratio in direct-detection mid-infrared Random-Modulation Continuous-Wave lidar in the presence of colored additive noise A-V[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(8): 386-399.
- [8] NAGASAWA N, ABO M. Random modulation CW lidar using new random sequence[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(10): 1382-1387.
- [9] PROCHAZKA I B. Avalanche photodiode output pulse rise-time study[C]. SPIE, 7355, 2009, 73550M.
- [10] KIRCHNER G, KOIDL F. Time walk compensated spad: multiple photon versus single photon operation[C]. SPIE, 3218, 1997, 106.
- [11] NORMAN D M, GARDNER C S. Satellite laser ranging using pseudo noise code modulated laser diodes[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**: 3650-3655.
- [12] BAR D. Communication under the poisson regime[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1969, **15**: 31-37.
- [13] HE Wei-ji, Bo-yu-si-ma, CHEN Yun-fei, *et al.* A correction method for range walk error in photon counting 3D imaging LIDAR[J]. *Optics Communications*, 2013, **308**(11): 211-217.
- [14] OH M S, KONG H J, KIM T H, *et al.* Multi-hit mode direct-detection laser radar system using a Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**: 033109-033112.
- [15] OH M S, KONG H J, KIM T H, *et al.* Techniques for improved performances of direct-detection three-dimensional imaging laser radar system using Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *SPIE Defense Security and Sensing*, 2011, **1**(3): 25-29.
- [16] JOHNSONS E. Cramer-rao lower bound on range error for LADARs with Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**: 4581-4586.
- [17] SHEN Shan-shan, CHEN Qian, HE Wei-ji, *et al.* Research on the performance of single photon counting ranging system with high background noise and high resolution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **6**(2): 134-146.
沈姗姗,陈钱,何伟基,等.高噪声高精度时间相关单光子测距系统性能研究[J].中国激光,2016,**6**(2):134-146.
- [18] SHEN Shan-shan, CHEN Qian, HE Wei-ji, *et al.* Research on performance of high speed random bitstream ranging system based on single photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10): 1012001.
沈姗姗,陈钱,何伟基,等.基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J].光学学报,2014,**34**(10):1012001.
- [19] LI Ming, XUE Li, HUANG Chen, *et al.* Estimation of detection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(2): 260-267.

- 李明,薛莉,黄晨,等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(2): 260-267.
- [20] GAT T P, JOHNSON S, NICHOLS T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(17): 3261-3275.
- [21] DANIEL J. KRAUSE. Effect of record length on noise-induced error in the cross correlation estimate[J]. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 1976, **2**(2): 255-259.