

文章编号: 0253-2239(2010)10-2771-05

# 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究

王 飞 赵 远 张 宇 孙 秀 冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 在单光子脉冲测距系统中,由于光子到达时间的随机性,使探测到的目标距离具有一定的不确定性,因而单光子脉冲测距系统的测距精度受到一定的限制。基于回波光子与光电子的统计特性,研究了单光子探测器在脉冲测距系统中的脉冲强度,脉冲宽度等参数对系统测距精度的影响。针对常见的回波波形,得到了测距精度与回波脉冲强度及宽度的相互关系式。理论分析结果表明回波激光脉冲强度越高,脉冲宽度越窄,所获得的距离精度越高。

**关键词** 激光测距;测距精度;回波强度;盖革模式探测器

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2771

## Theoretical Analysis of Influence of Laser Signal Strength on Range Precision in Single Photon Ranging

Wang Fei Zhao Yuan Zhang Yu Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The range precision of single photon pulsed ranging system is influenced by the random arrival of echo photon. Based on the statistical property of echo photon and photoelectron, the influence of the echo signal strength and pulse width on the range precision is discussed. For normal rectangular echo signal, the relation between the range precision and signal strength and pulse width is obtained. Results show that higher signal strength and narrower pulse width produce better range precision.

**Key words** laser ranging; range precision; echo signal strength; Geiger mode detector

### 1 引 言

单光子探测器具有极高的探测灵敏度,在微光探测领域具有十分重要的应用。以往单光子探测器多采用光子计数方式对目标进行探测,测量耗时较长,多应用于超远距离测距系统等对时间要求不高的系统中。随着激光雷达成像技术的发展,成像方式由扫描方式逐渐转向非扫描的成像激光雷达,如CCD/ICCD非扫描成像<sup>[1,2]</sup>和条纹管非扫描成像<sup>[3~5]</sup>等。近年来,探测器集成技术有了长足的发展,开始出现能达到单光子探测灵敏度的雪崩光电二极管(APD)<sup>[6,7]</sup>或单光子雪崩二极管(SPAD)探测器<sup>[8~10]</sup>,使得系统的作用距离获得了极大的提

升。此类探测器多工作在盖革(Geiger)模式下,利用脉冲测距技术获取目标的距离,单次脉冲即可获得目标的距离信息,成像速度快,探测距离高,因而逐渐成为非扫描成像技术的重要发展方向。对Geiger探测器阵列性能的研究也逐渐展开,如性能及探测统计<sup>[11]</sup>、探测器串扰对探测性能的影响<sup>[12]</sup>以及死时间对探测性能的影响<sup>[13]</sup>等。对于一般的三维激光成像雷达系统来说,系统的测距精度是极为重要的性能指标。而对于单光子飞行时间测距系统的测距精度量化研究少见报道。从定性的角度来讲,所采用的激光脉冲宽度越窄,激光强度越高所获得的测距精度也应越高。此结论缺少量化的确定关

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-08-04

作者简介: 王 飞(1981—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: felixw@163.com

导师简介: 孙秀冬(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事非线性光学与光学信息处理等基础研究、高密度光学全息存储和激光雷达等方面的研究。E-mail: xdsun@hit.edu.cn

系,而确定测距精度影响因素的量化关系对于激光雷达系统的性能评估以及系统设计都具有十分重要的意义。

影响系统测距精度的因素主要体现在测时精度上,决定测时精度的主要因素包括探测器响应速度、激光脉冲上升沿宽度和计时电路的计时精度等。此外光子到达时间的随机分布同样会引起系统测距精度的变化,此变化与回波光子数量,即激光的光强,有密切关系。本文分析盖革模式单光子探测器测距原理,并利用统计原理,根据回波光子到达时间分布与激光脉冲强度的关系,获得由回波脉冲强度决定的测时测距精度与测距误差的量化关系式。并以无噪声方波信号为例,给出了具体表达式,分析了激光脉冲强度与测距精度和测距误差的具体关系。

## 2 盖革模式单光子探测器测距原理

当加在雪崩光电二极管(APD)探测器上的偏压达到或者超过雪崩电压时,如果有光电子产生时,探测器便会产生雪崩效应,使得输出电流大幅增加,达到饱和状态并产生电脉冲,此种工作方式称为盖革模式。由于盖革模式极高的雪崩增益,使其非常适合探测微弱的光信号,在单光子探测中有广泛的应用。目前多采用脉冲测时测距技术,其测距原理如图1所示。

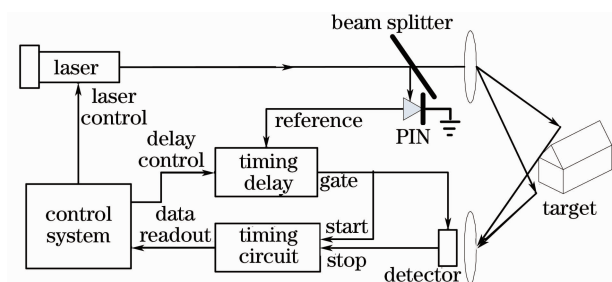


图1 脉冲测距系统原理

Fig. 1 Principle of pulsed ranging system

由激光发射的短激光脉冲经分束镜分束,一部分由PIN接收产生参考脉冲,送入时间延迟器中,其余作为发射脉冲照射目标。时间延迟器将参考脉冲进行一定时间的延迟,延迟量由控制系统控制,然后开启探测器门信号,使探测器开始工作,同时触发计时电路,使计时电路开始计时。目标返回的激光回波由探测器接收并产生停止信号,使计时电路停止计时。通过测量发射信号与回波停止信号的时间差来获得目标距离信息。此时间包括两部分,一部分是固定的时间延迟,由控制系统控制时间延时器决定,另一部分是计时电路的计时结果。两部分相加

后即可获得目标的距离信息。

## 3 盖革模式脉冲测距精度

在脉冲测距系统中,系统的计时精度直接决定了测距精度。影响计时精度的主要因素有激光脉冲的上升沿宽度,探测器的响应速度,计时电路分辨率等。由于在单光子探测条件下,回波光子数很少,光子入射到探测器的时间并不确定,其过程近似为泊松过程<sup>[14]</sup>,因此也会导致计时误差,进而影响到系统的测距精度。泊松过程中,光子的到达时间随时间具有一定的不确定性分布,且与到达探测器的光子数目,即激光强度有关系,下面主要针对激光回波强度引起的光子到达时间分布进行讨论。

设从目标返回的光信号随时间的关系可表示为 $I(t)$ ,采用盖革模式探测器,探测过程以光子或者光电子为单位,因此这里以光子数作为光信号强度的度量。为抑制背景噪声和后向散射的影响,脉冲测距系统中多采用距离门方式。设所用的距离门表示为

$$g(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_s}{W_g} - \frac{1}{2}\right), \quad (1)$$

式中 $t_s$ 代表距离门的起始时间, $W_g$ 代表距离门宽度。rect函数定义为

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 1/2 \\ 1 & |x| \leq 1/2 \end{cases}, \quad (2)$$

设激光脉冲持续时间为 $t_w$ ,由此可得探测器上最终获得的可探测光信号强度为

$$I_D(t) = I_R(t)g(t), \quad (3)$$

将光信号对探测时间进行积分,可获得探测器上在探测时间 $t$ 内获得的平均光子数为

$$\bar{N}(t) = \int_0^t I_D(\tau) d\tau = \int_0^t I_R(\tau)g(\tau) d\tau, \quad (4)$$

经过探测器探测,考虑探测器的量子效率和光电子探测概率的后,探测器平均探测到的触发光电子数为

$$\bar{N}_e(t) = \eta P_D \int_0^t I_R(\tau)g(\tau) d\tau, \quad (5)$$

式中 $\eta$ 代表探测器的量子效率, $P_D$ 代表探测器的光电子探测概率。假设探测器获得 $k$ 次触发的概率为

$$P(k) = F[\bar{N}_e(t), k], \quad (6)$$

式中 $F(N, k)$ 代表平均值为 $N$ 的探测过程中,获得了 $k$ 次触发的概率分布函数,此概率分布函数未知。当探测过程确定后,概率分布函数也随即确定。

对于盖革模式的探测器来说,当探测到的光电

子  $k \geq 1$  时, 即探测到信号, 其概率为

$$P(k > 0) = 1 - P(k = 0) = 1 - F[\overline{N}_e(t), 0], \quad (7)$$

由此可得系统探测到信号的概率随时间分布的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\partial P(k > 0)}{\partial t} = -\frac{\partial F[\overline{N}_e(t), 0]}{\partial t}, \quad (8)$$

则根据统计理论, 探测所需的时间均值  $\bar{t}$  和方差  $\sigma^2$  分别为

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt}, \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} - \bar{t}^2, \quad (10)$$

式中均值代表了探测所获得的距离平均值, 方差则代表了目标距离精度的平方, 其平方根即为目标距离的精度。一般情况下, 由于回波脉冲强度  $I_R(t)$  的复杂性, 探测所需的时间均值和方差难以获得解析表达式, 为较为直观的表现激光强度及激光脉冲宽度对于探测时刻及其误差的影响, 利用理想化的无噪声方波信号进行理论探讨。

对于不含噪声的方波信号, 其波形可表示为

$$I_R(t) = A \text{rect}\left(\frac{t - 2R/c}{t_w} - \frac{1}{2}\right), \quad (11)$$

式中  $A$  代表回波强度, 可表示为单位时间回波光

数, 或者能量。  $R$  代表目标距离,  $c$  代表光速。

在实际探测过程中, 一般激光脉冲的持续时间小于距离门宽度, 并且可探测的目标均应位于距离门内, 即

$$\begin{aligned} t_w &< W_g \\ 2R/c &> t_s \end{aligned}, \quad (12)$$

为计算简便, 进一步要求激光脉冲完全位于距离门宽度内, 即

$$\begin{aligned} 2R/c &> t_s \\ 2R/c + t_w &< t_s + W_g \end{aligned}, \quad (13)$$

则当  $2R/c < t < 2R/c + t_w$  时,

$$\int_0^t I_R(\tau) g(\tau) d\tau = \int_0^t A \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R/c}{t_w} - \frac{1}{2}\right) \cdot$$

$$\text{rect}\left(\frac{\tau - t_s}{W_g} - \frac{1}{2}\right) d\tau = A(t - 2R/c), \quad (14)$$

将(14)式代入(5)式可得

$$\begin{aligned} \overline{N}_e(t) &= A\eta P_D(t - 2R/c), \\ 2R/c &< t < 2R/c + t_w \end{aligned} \quad (15)$$

在弱光探测时, 触发光子数近似为泊松分布<sup>[8]</sup>, 其概率分布为

$$P(k) = F[\overline{N}_e(t), k] = \exp[-\overline{N}_e(t)] \frac{\overline{N}_e(t)^k}{k!}, \quad (16)$$

将(16)式代入(8)式可得

$$\begin{aligned} f(t) &= -\frac{d \exp[-\overline{N}_e(t)]}{dt} = \\ &= A\eta P_D \exp[-A\eta P_D(t - 2R/c)], \end{aligned} \quad (17)$$

由此可得探测所需时间均值和方差分别为

$$\bar{t} = \frac{-A\eta P_D \int_{2R/c}^{2R/c+t_w} t \exp[-\eta P_D A(t - 2R/c)] dt}{-A\eta P_D \int_{2R/c}^{2R/c+t_w} \exp[-\eta P_D A(t - 2R/c)] dt} = \frac{2R}{c} + \frac{1}{A\eta P_D} - \frac{t_w \exp(-\eta P_D A t_w)}{1 - \exp(-\eta P_D A t_w)}, \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 f(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) dt} - \bar{t}^2 = \frac{1 - 2 \exp(-A\eta P_D t_w) + [\exp(-A\eta P_D t_w)]^2 - (A\eta P_D t_w)^2 \exp(-A\eta P_D t_w)}{(A\eta P_D)^2 [1 - \exp(-A\eta P_D t_w)]^2}, \quad (19)$$

由(18)式可见, 对于每次探测的结果, 其探测均值并非目标真实距离, 而是相对于目标真实距离  $2R/c$  有一定的偏差, 偏差大小为

$$\bar{t} - \frac{2R}{c} = \frac{1}{A\eta P_D} - \frac{t_w \exp(-\eta P_D A t_w)}{1 - \exp(-\eta P_D A t_w)}. \quad (20)$$

式中  $A\eta P_D$  代表了单位时间内回波范围内产生的光电子数,等价于激光回波脉冲的强度。可见随着光强的增加,探测偏差最终将趋向于目标真实距离,即光强越大,偏差越小。此外回波信号脉冲宽度越小,此偏差也越小。

探测值的方差代表了探测值的离散程度,即探测精度,可见回波强度越高,探测误差越小,探测结果精度越高。利用(19)式针对不同脉冲宽度条件下探测误差与回波强度的关系如图2所示。

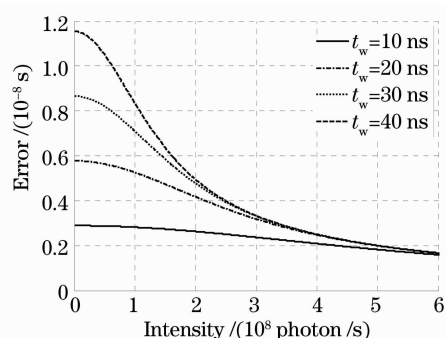


图2 不同脉冲宽度条件下探测误差与回波强度关系

Fig. 2 Relation between range error and echo pulse strength

由图2可见,随着回波强度的增加,探测误差迅速减小,系统探测精度提高。而回波脉冲宽度越窄,系统探测精度越高。即采用更强的激光脉冲,或者更短的脉冲持续时间有利于提高系统的探测精度。随着探测器接收到的平均光子数的减小,探测误差逐渐提高,当  $A\eta P_D$  极弱逐渐趋向于0时,探测偏差将趋近于  $P_w/2$ , 探测误差  $\sigma^2$  将逐渐趋近于  $P_w/\sqrt{12}$ 。即当回波光电子数极弱的时候,探测误差主要由发射激光的脉冲宽度决定。可见发射激光脉冲宽度越窄,对提高探测精度越有利。然而需要注意的是,当回波光电子数极少的时候,背景噪声对系统的影响增大,探测到回波信号所需的探测次数增加,从背景噪声中分离出信号光子的误差也越大。为保证系统具有适当的探测概率和虚警概率,回波信号能量不能无限降低。

当存在噪声时,根据噪声源的特点需要分别考虑。一般在盖革模式探测器中影响探测性能的主要噪声源为背景光噪声和探测器的暗计数噪声。在光子级的探测过程中,距离门时间内探测到噪声光子或者光电子的数目都服从泊松分布,与入射光子数的概率分布相同。在考虑噪声时,由于噪声与信号的统计规律类似,因此整体推导过程一致,在(11)式中将会增加另一矩形函数项,其幅度为平均噪声光

子数,持续时间与距离门持续时间相同,可看作另一个无噪声方波信号。最终测距精度和误差为两个方波信号的加权均值。由于雷达系统虚警概率的限制,一般情况下要求噪声光子或者噪声电子数远小于回波光电子数,在此情况下噪声权重较小,因此对系统测距精度和测距误差的影响也较小。

## 4 结 论

分析了盖革模式单光子脉冲测距系统的探测精度与激光回波强度及脉冲宽度之间的联系。结果表明激光回波强度越大,脉冲宽度越窄系统的探测精度越高。此外探测器的量子效率,光电子探测概率等因素与激光回波强度对探测精度的影响相同。在讨论过程中主要针对了无噪声情况下的方波回波信号进行讨论,在实际探测过程中,回波信号波形会有相应的变化,系统噪声等对探测结果也将产生一定的影响,具体影响仍在进一步的研究过程中。

## 参 考 文 献

- Jin Chenfei, Zhao Yuan, Zhang Yong *et al.*. Experimental research on a scannerless 3D imaging laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1383~1387
- 靳辰飞, 赵远, 张勇等. 一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1383~1387
- Chen Mingsong, Li Tiansong, He Zhiyi. Application research of range-gated technique in underwater laser imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 197~203
- 陈名松, 李天松, 何志毅. 距离选通在水下激光成像系统中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 197~203
- Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang *et al.*. Imaging by single-slit streak tube laser lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 496~500
- 魏靖松, 程元丽, 徐强等. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 496~500
- Liu Jinbo, Li Sining, Wang Qi. System design and experiment of multiple streak tube imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1991~1994
- 刘金波, 李思宁, 王骐. 多狭缝条纹管激光雷达系统设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1991~1994
- Wei Jingsong, Wang Qi, Sun Jianfeng *et al.*. Experiment of four-dimensional imaging with single-slit streak tube lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1231~1235
- 魏靖松, 王骐, 孙剑峰等. 单狭缝条纹管激光雷达四维成像实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1231~1235
- B. F. Aull, A. H. Loomis, D. J. Young *et al.*. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 335~350
- M. A. Albota, R. M. Heinrichs, D. G. Kocher *et al.*. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(36): 7671~7678
- A. Rochas, M. Gosch, A. Serov *et al.*. First fully integrated 2-D array of single-photon detectors in standard CMOS technology[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 963~965
- F. Zappa, A. Gulinatti, P. Maccagnani *et al.*. SPADA: Single-photon avalanche diode arrays[J]. *IEEE Photon. Technol.*

- Lett.*, 2005, **17**(3): 657~659
- 10 S. Tudisco, F. Musumeci, L. Lanzano *et al.*. A new generation of SPAD-single-photon avalanche diodes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7-8):1324~1329
- 11 P. Gatt, S. Johnson, T. Nichols. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(17): 3261~3276
- 12 Y. Du, F. Retiere. After-pulsing and cross-talk in multi-pixel photon counters[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.*, 2008, **596**: 396~401
- 13 P. Gatt, S. Johnson, T. Nichols. Dead-time effects on Geiger-mode APD performance[C]. *SPIE*, 2007, **6550**: 655001
- 14 G. R. Osche. *Optical Detection Theory for Laser Applications* [M]. Wiley-Interscience, 2002

\*\*\*\*\*

## 2011 年《中国激光》“激光制造”专题 征 稿 启 事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》在成功组织 2008 年、2009 年“激光制造”专题的基础上,计划在 2011 年 6 月正刊(EI 核心收录)上推出第三期“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

- 激光制备新材料技术
- 激光表面工程技术
- 激光连接技术
- 激光去除技术
- 激光直接制造技术
- 激光复合制造技术
- 激光微加工技术
- 激光纳米制造技术
- 激光器、光学元器件与加工系统
- 激光宏微观制造过程模拟、检测与控制技术
- 其他

### 特邀组稿专家:

钟敏霖 教授(《中国激光》常务编委) 清华大学机械工程系激光加工研究中心

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期:2011 年 2 月 28 日

### 投稿方式以及格式:

通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(留言中说明“激光制造”专题投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn;电话:021-69918427-802。

《中国激光》杂志社

2010-09-22