

光子计数三维成像激光雷达的分析与实验

郭颖, 侯利冰, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:对于直接探测三维成像激光雷达,采用光子计数探测器可以响应单光子水平的目标回波,从而大大提高探测效率。研究的光子计数三维成像激光雷达采用盖革模式雪崩光电二极管(APD)作为探测器。首先分析了回波光子探测模型,并根据此模型讨论了激光雷达探测概率和测距模式。在理论分析的基础上,设计了一套光子计数三维成像激光雷达系统,对一些选定目标进行了测距和三维成像实验,并对实验结果进行了分析。

关键词:光子计数;盖革模式;三维成像;激光雷达

中图分类号:TN249;TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.005

Photon counting 3D imaging laser radar analysis and experiments

GUO Ying, HOU Li-bing, SHU Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: For a direct-detection 3D imaging laser radar, the use of photon counting detector could greatly enhance the detection efficiency of the receiver. This paper studies the 3D imaging lidar using Geiger Mode APD. In this paper, the detection model for this laser radar is analyzed. Based on this analysis, the detection probability and rangefinding precision are discussed. Then a photon counting 3D imaging brass board system is described, and some experimental results obtained by this system are presented and analyzed.

Key words: photon counting; Geiger mode; 3D imaging; laser radar

1 引言

目前商用的机载三维成像激光雷达一般采用线性模式雪崩光电二极管接收目标反射激光回波,通过激光脉冲飞行时间测量结合 POS 系统获取目标表面形态和三维坐标数据。雪崩光电二极管探测单元将激光回波脉冲转化为电压脉冲提供给后续电路处理,受限于探测器内部噪声和放大器噪声,这种探测方式的灵敏度往往在数百光子以上。如果要求较远的成像作用距离,一般采用提高激光脉冲能量、增加接收光学系统口径等方法。这些方法一方面造成系统体积和功耗过大,另一方面限制了激光器重复频率的提高从而导致三维成像速率不高。

盖革模式 APD 是一种工作具有单光子灵敏度的探测器,近年来发展很快,已经出现了多种不同材料的阵列器件^[1-2]。将这种探测器用于激光雷达接

收机可以响应单光子水平的目标回波,从而大大提高探测效率。美国林肯实验室的科研人员采用自己开发的单光子雪崩二极管阵列开发了一种三维成像激光雷达系统^[3-4],但其设计仅能响应单次回波,具有一定的局限性。本文结合工作于主动淬灭模式下的盖革模式雪崩光电二极管和多回波到达时间测量单元设计了一套三维成像激光雷达原型系统。本文首先分析了光子计数激光雷达的回波光子探测模型和测距模型,详细论述了光子计数三维成像激光雷达原型系统的设计,最后对一些选定目标进行了一系列的测距和三维成像实验并分析了实验结果。

基金项目:国家“863”计划(No. 2007AA12Z105)资助。

作者简介:郭颖(1982-),男,博士研究生,主要从事激光主动遥感技术和远距离目标探测技术的研究。E-mail:guoying@ustc.edu

收稿日期:2011-03-28; **修订日期:**2011-04-23

2 光子计数三维成像激光雷达原理

2.1 光子计数激光雷达探测分析

光子计数激光雷达属于直接探测模式,在这种体制下,入射到光电探测器光敏面的包括视场内的目标反射的回波信号光子和背景噪声光子(包括背景自身的热辐射光子和背景反射的太阳辐射光子)。光子计数激光雷达探测模型如图1所示。

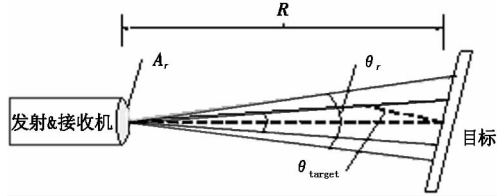


图1 光子计数激光雷达探测模型

若发射激光脉冲能量为 E_t ,假定被测目标是一个距离为 R ,反射率为 ρ 的平坦漫反射目标(朗伯目标),则根据激光雷达作用距离方程可以计算目标反射回的平均光子数 S_p :

$$S_p = E_t \frac{\lambda}{hc} \rho \cos \theta_{\text{target}} \frac{A_r}{R^2} \eta_t \eta_r \eta_a^2 \quad (1)$$

其中, θ_{target} 为发射光学系统光轴与目标法线方向的夹角; η_t 为发射光学系统效率; η_r 为接收光学系统效率; η_a 为大气透过率; A_r 为光学接收面积; λ 为激光波长; h 和 c 分别为普朗克常量和光速。

由于激光雷达一般工作在可见光或近红外波段,背景自身的热辐射光子可以忽略不计。噪声光子来源主要是背景发射的太阳辐射。

背景反射的太阳辐射引起的噪声光子平均产生速率 N_p 可以表示为^[5]:

$$N_p = I_{\text{sun}} \frac{\lambda}{hc} \theta_r^2 \rho A_r \Delta \lambda \eta_t \eta_r \eta_a^2 \cos \psi \quad (2)$$

其中, I_{sun} 为所用波段大气层顶部太阳光谱辐射强度; ψ 为太阳光入射方向与目标法向的夹角; θ_r 为接收视场角; $\Delta \lambda$ 为滤光片带宽。由式(2)可见,通过光谱滤波(窄线宽)和空间滤波(小视场)可以有效地抑制背景噪声光子。

对于背景反射的噪声光子,根据统计光学的结论,应服从泊松分布。同时根据goodman的理论,对于直接探测模式的激光雷达,接收机从一个漫反射目标接收到的光子数遵循负二项式分布。光子计数成像激光雷达接收到的光子数通常比散斑多样性小得多。在这种情况下,泊松分布可以很好地近似负二项式分布^[6]。这表明,照射在探测器光敏面上的信号和噪声光子数均服从泊松分布。假定光电探测器量子效率为 η_q ,则其产生初级光电子的过程可视为以 η_q 为概率的 n 重伯努利试验,此时初级光电子仍服从泊松分布,且满足:

$$S_{pe} + N_{pe} = \eta_q (S_p + N_p) \quad (3)$$

式中, S_{pe} 和 N_{pe} 分别表示信号和噪声产生的平均初级光电子数。初级光电子经过后级的放大输出一个电脉冲。为了便于分析,假定每一个初级光电子均能产生一个可测到的电脉冲(实际探测器存在一个产生概率 P_g)。

对于一个泊松随机过程,在一个时间间隔 Δt 内激发 m 个初级光电子的概率可以表示为:

$$P(m, \Delta t) = \frac{1}{m!} (M(\Delta t))^m \cdot e^{-M(\Delta t)} \quad (4)$$

式中, $M(\Delta t)$ 表示在该时间间隔内产生的平均初级光电子数。根据式(4),在时间间隔 Δt 内没有光电子产生的概率为 $e^{-M(\Delta t)}$,从而产生一个可测电脉冲的概率为 $1 - e^{-M(\Delta t)}$ 。

对于目标探测而言,探测概率可以表示为:

$$P_{\text{target}} = e^{-N_{pe} \cdot T_{\text{dead}}} \cdot (1 - e^{-S_{pe}}) \quad (5)$$

其中,死时间 T_{dead} 表示光子计数探测器连续输出两个电脉冲的间隔(盖革模式APD一般在数十纳秒,而光电倍增管可以小到几纳秒)。 P_{target} 即表示信号到来前死时间内不存在任何噪声初级光电子,同时探测器被信号初级光电子触发。

实际的光子计数探测器除了 P_g 和 T_{dead} 还有暗计数率 f_{dark} 和后脉冲概率 P_{after} 两项重要参数,前者由探测器暗电流产生,后者则由探测器内部缺陷导致。从机理上讲,暗计数率和背景噪声初级光电子产生相似,也遵循泊松分布,可以合并考虑,不影响前面的分析结果。而目前好的探测器后脉冲概率 P_{after} 可以做到0.3%,影响基本可以忽略。

此外,当存在两个临近目标时,死时间效应可能会湮没第二个目标,这要求使回波信号处于亚光子状态利用多次测量累计的方式分辨两个目标。

2.2 光子计数激光雷达测距分析

光子计数激光雷达通过测量脉冲发射和返回的时间间隔来得到目标距离,距离的准确度主要取决于返回时刻确定的准确度。

假设返回脉冲宽度为 τ_{width} ,返回脉冲在时间上的分布为 T ,且满足:

$$S_p = \int_{\tau_{\text{width}}} T(t) S_p dt \quad (6)$$

若将脉冲宽度内划分为一系列的定间隔时间片 τ_{bin} ,则存在:

$$S_p = \sum_{\tau_{\text{bin}}} S_p(\tau_{\text{bin}}) \quad (7)$$

这反映了原始的目标回波光子在时间轴上的分布,如图2所示。

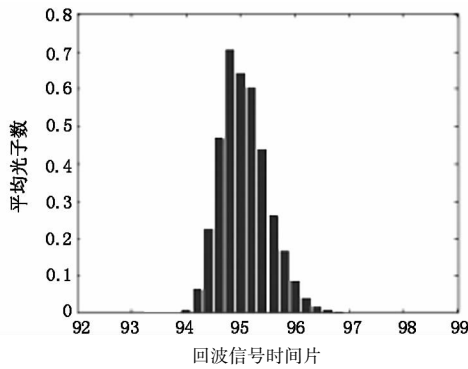


图2 回波光子的时间轴分布

利用质心算法可以得到目标距离的准确值:

$$R_c = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sum S_p(i) \tau(i)}{S_p} \quad (8)$$

其中, c 表示光速。激光雷达测距准确度即表示对准确距离的偏离程度。从系统的角度来看, 主要误差来源是光子计数探测器本身的时间抖动 (jitter) 和时间测量装置不确定度。此外, 对于光子计数探测器而言, 由于存在死时间的问题, 即探测器会优先响应处于脉冲前沿的光子, 这会在测距上造成一个类似时间行走 (time walk) 的误差。

理论上, 为了实现对未知目标的测距, 由于背景光和探测器自身暗计数的存在, 光子计数激光雷达必须记录整个时间轴上的光子事件, 然后通过多次累计探测的方法区分回波光子和暗计数。有时候, 对整个时间轴上的光子事件进行记录会使数据量过大而造成传输和处理困难。这种情况下可以对光子事件添加距离波门控制, 即只对包含目标的一定距离范围内的光子事件进行记录。在扫描测距三维成像应用中, 往往可以事先知道目标的大致距离, 然后可以按照一定景深设置距离波门。无任何先验知识时, 可以通过在时间轴上滑动距离波门的方式进行获取。

3 光子计数三维成像激光雷达系统设计

整个三维成像激光雷达系统的主要结构如图3所示, 主要由激光发射源、光学系统、光子计数探测单元、时间测量单元和数据传输处理单元组成。

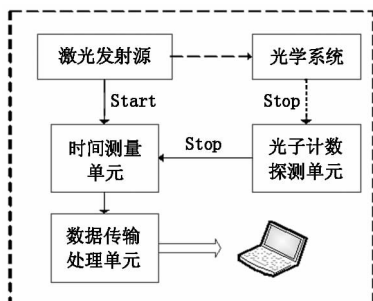


图3 光子计数三位成像激光雷达主要组成

系统采用 532 nm 被动调 Q 微片激光器 (Teem Photonics SNG) 作为激光发射源, 其 532 nm 处的线宽达到 0.3 nm, FWHM 脉宽为 600 ps, 单脉冲能量 1 μ J, 最大脉冲重复频率可达到 13 kHz。

光子计数探测器选用的是 ID quantique 公司的 ID100 单光子雪崩二极管模块, 其标称死时间 50 ns, 单光子探测概率 50%, 时间分辨率 60 ps。模块输出信号通过设计的回波门控系统进入时间测量单元。时间测量单元采用时间数字转换芯片 (ACAM GPX) 开发, 可以同时记录 32 个回波光子到达时刻, 计时分辨率可达 27 ps。最终原始数据通过 USB 总线上传到计算机做进一步处理。

图4为激光雷达系统光路图。整个系统采用收发同轴的结构形式, 采用中间开孔的反射镜实现收发光路分离。接收望远镜口径取 50 mm, 前置一个二维扫描镜进行扫描成像。为了抑制背景光噪声, 瞬时视场设计为 100 μ rad, 并采取 1 nm 的窄带干涉滤光片做光谱滤波处理。激光发射源经过准直扩束, 其发散角为 80 μ rad, 略小于系统接收瞬时视场角。

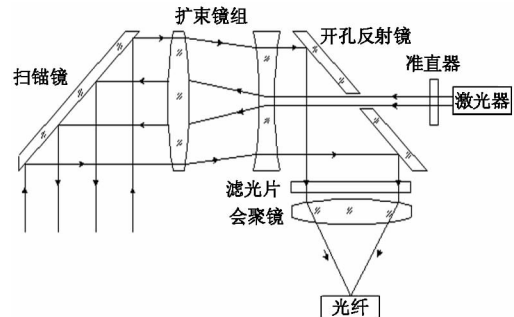


图4 光子计数三位成像激光雷达光路图

4 系统实验及结果分析

首先, 为了验证系统测距能力, 选取了一个已知反射率的固定平坦目标进行了一系列的测距实验。

图5给出了累计测距 10000 次的实验结果。其中横轴表示时间, 纵轴表示某时间片内的光子探测概率 (出现次数与测距次数之比)。图5(a)显示, 探测概率在目标处出现一个峰值, 其余为暗计数。图5(b)为目标回波光子的时间分布, 这可以反映测距的总体不确定度。

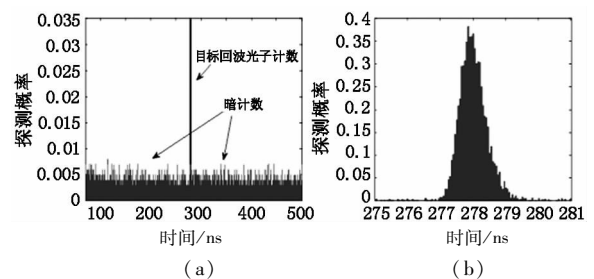


图5 固定目标测距实验结果

使用衰减片组对激光发射源进行不同的衰减,经过多次累计测距,可以测量不同回波能量对测距精度的影响。图6给出了实验结果。实验结果一方面显示了 3σ 测距误差的变化,另一方面也显示了测距平均值的变化。在回波能量较强的一端,由于回波脉冲中光子数较多,而探测器因为死时间的限制仅能响应处于脉冲前沿的光子,导致 3σ 误差较小而测距平均值向偏小的方向行走。在回波能量较弱的情况下,回波脉冲中光子数较少,经过累计测量,得到的是整个脉冲宽度内的回波光子分布,时间行走基本可以消除。此时由于系统时间测量分辨率很高,1 ns左右的 3σ 测距误差主要受激光发射脉宽的影响。

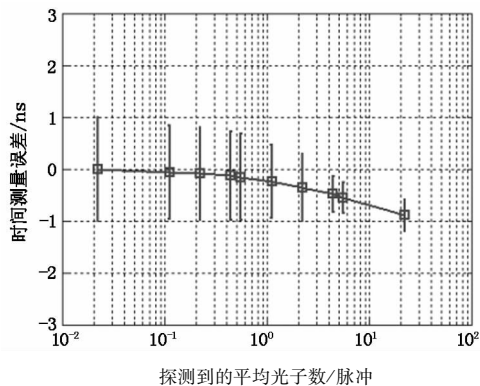


图6 不同回波能量下测距误差

此外,为了验证激光雷达三维成像能力,我们选取了一个测试场景进行三维成像实验,图7为测试场景。该场景距离激光雷达的距离为50 m左右,在该场景上放置了特殊设计的靶板,用来测试成像雷达的分辨能力,三维成像雷达对该场景进行了二维扫描,图8给出了直接经过坐标转换的三维点云图,途中不同的颜色代表目标表面与激光雷达本体的距离远近。



图7 测试场景

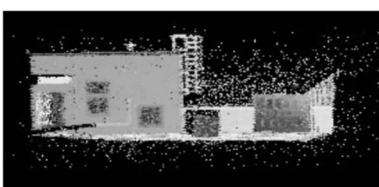


图8 未经过处理的场景三维点云图

可以看出,未经过处理的三维点云图含有较多

的噪声点,这主要是白天背景光较强造成的。相对于目标点,这些噪声点可以认为是随机出现的,因此可以通过点云密度滤波来滤除。图9为经过滤波的场景三维点云图,大多数噪声点均被滤除,靶板上的图案清晰可见。

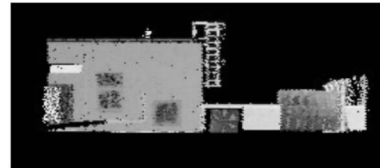


图9 经过处理的场景三维点云图

由于被测场景距离较近,实验过程中对发射激光进行了衰减,使得平均回波光子数很少,实验结果表明采取光子计数探测器使得系统的探测能力得到了有效提升。

5 结论

本文设计了一套基于盖革模式雪崩光电二极管的三维成像激光雷达原型系统。实验结果表明,采用光子计数探测器可以使激光雷达在微弱目标回波下实现测距和三维成像探测。

将光子计数探测技术用于三维成像激光雷达是一种新兴技术,它使激光雷达具备很高的灵敏度,大大降低了对激光发射功率的要求,非常有利于减小激光雷达接收机的尺寸、功耗,非常适合于机载和星载对地观测等对体积功耗有较大限制的应用。

参考文献:

- [1] Niclass C, Charbon E. A CMOS single photon avalanche diode array for 3D imaging [J]. ISSCC Digest Tech. Papers, 2002: 120 - 121.
- [2] Aull B F, Loomis A H, Young D J. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. Lincoln Lab. J., 2002, 13: 335 - 3509.
- [3] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser [J]. Appl. Opt., 2002, 41: 7671 - 7678.
- [4] Marino R M, Stephens T, Hatch R E. A compact 3D imaging laser radar system using geiger-mode APD arrays: system and measurements [J]. Proc. SPIE, 2003, 5086: 1 - 15.
- [5] Daniel G Fouche. Detection and false alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detector 5086, Journal of Geodynamics [J]. Appl. Opt., 2003, 42: 5388 - 5398.
- [6] Johnson S, Gatt P, Nichols T. Analysis of geiger-mode APD laser radar [J]. Proc. SPIE, 2003, 5086: 359 - 368.