

光子计数激光测深系统

张河辉^{1,2}, 丁宇星¹, 黄庚华¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 设计了一套基于光子计数探测体制的激光雷达水深探测系统, 该系统工作波长为 532 nm, 单脉冲激光能量为 0.5 μJ , 脉冲宽度为 400 ps, 激光重频为 10 kHz, 单光子探测器死时间为 22 ns, 时间间隔分辨率为 50 ps。首先介绍了光子计数探测体制激光雷达用于水深探测的基本原理及其相对于传统机载激光测深雷达的优越性; 然后分析了水底回波信号产生的平均光电子数与系统单脉冲激光能量的关系, 从而理论求出该系统的极限测深能力为 3.7 m 左右。最后进行了外场实地试验, 对所获激光雷达点云数据进行滤波和解算, 成功测得了透明盘深度为 1.2 m 的浑浊水体深度为 2 m 以内的水下信息。

关键词: 激光雷达; 激光测深; 光子计数; 单光子

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0106002

Photon counting laser bathymetry system

Zhang Hehui^{1,2}, Ding Yuxing¹, Huang Genghua¹

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A single wavelength (532 nm), short-pulse (400 ps), low pulse energy (0.5 μJ), high pulse repetition rate (10 kHz), short dead time of detector (22 ns) and high resolution of time interval (50 ps) photon counting laser bathymetry system was designed. The principle of photon counting laser bathymetry and its superiority to the typical airborne laser bathymetry was introduced. The relationship between the average number of photoelectrons generated at the receiver and the transmitted laser pulse energy was analyzed, indicating that the bathymetry capability of the system was about 3.7 m. Experiments were conducted in a pond with a Secchi depth of 1.2 meters, and the underwater information down to 2 m depths were successfully obtained by filtering and solving the point cloud data.

Key words: lidar; laser bathymetry; photon counting; single photon

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(17DZ1204900)

作者简介: 张河辉(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光子计数激光测深应用方面的研究。Email: hhzhang11@fudan.edu.cn

通讯作者: 黄庚华(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光子计数激光测距、三维成像技术、地球测绘、深空软着陆激光高精度测高技术、红外、激光复合目标跟踪及探测技术等方面的研究。Email: genghuah@mail.sitp.ac.cn

0 引言

激光雷达作为一种能够快速高效且高精度获取陆地三维地形数据的主动遥感技术,已获得了业内的广泛认可,近年来随着计算机视觉和自动驾驶技术的崛起,又迎来了一轮新的发展热潮。然而,在一些无人机载系统或车载设备等要求设备轻小型化的应用场景,以及高灵敏度和远距离探测、海洋和大气探测、潮间带水深探测等领域,传统的线性探测体制激光雷达受限于目标反射率较低或系统激光能量和探测器灵敏度较低^[1],导致接收器等效收到的回波信号强度极弱,信噪比达不到系统要求,限制了激光雷达的进一步发展应用。基于光子计数探测体制的激光雷达由此孕育而生,因其具有低激光脉冲能量、高激光重频输出、极高探测灵敏度等特性,在植被^[2]、城市和水深探测领域都有不俗的性能^[3],越来越成为新型激光测距技术的研究热点。

我国海岸线十分漫长,大陆海岸线长达 1.8 万千米、岛屿海岸线为 1.4 万千米,而水深在 50 m 以内的海域面积多达 50 万平方公里,这些海域是军民两用最重要的海区,开展激光测深技术研究对填补我国近海资源测绘具有重要意义。国际上对于激光雷达测深技术的研究较为成熟,已有一大批商用方案^[4]。虽然国内对激光雷达相关研究起步较晚,但在激光测深领域的科研投入巨大,中国科学院上海光学精密机械研究所等单位先后研制出了一批激光测深装备^[5]。这些激光雷达采用传统线性探测体制,系统激光能量较高却不能充分利用回波信号能量,导致系统体积、质量和功耗都比较大,而探测效率较低。基于光子计数探测体制的激光雷达在低信噪比应用场景下具有巨大优势,非常有利于减小系统体积和设计功耗,为激光测深提供了一种新的途径。美国佛罗里达大学的研究人员研发了相关原理样机^[6],该原型机采用 532 nm 单波段激光器,激光能量为 5 μJ,重复频率 8 kHz,激光脉宽为 480 ps,用于海岸带地区测量,并成功测到了深度 2 m 的水下地形。国外 RIEGL 公司也已经实现了无人机载光子计数激光测深设备的商业化,其 BathyCopter 产品具有水下探测能力,最高可以获取 1.5 倍透明盘深度的水下横断面数据。

1 光子计数激光测深能力分析

1.1 光子计数激光测深原理

光子计数激光雷达水深测量的基本原理如图 1 所示。光子计数激光雷达向水体发射绿色激光,分别在大气、气-水界面、水体、水底产生多次后向散射和漫反射,这些散射和反射信号再次历经相反的路径回到探测器。由于水体对激光的衰减较大,水面和陆地回波信号强而水底回波信号弱,单光子探测器能够响应这些或强或弱的光子信号并输出数字脉冲,时间测量电路可以测量这些脉冲与激光主波的时间间隔,从而得到光子事件对应的距离信息。空气和水体的后向散射、日光及探测器本身的暗计数和死时间等因素会影响对目标的识别,但光子计数探测体制是基于对所有光子事件进行累计,得到图中右侧所示的直方图后再根据概率统计和距离相关算法来提取水面和水底信息,从而实现低信噪比工况下对水深的测量。

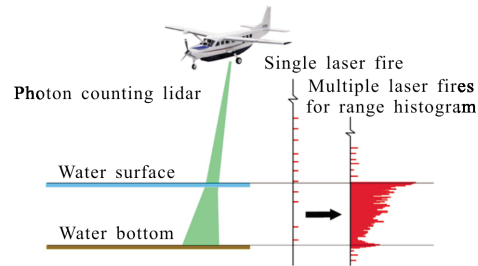


图 1 光子计数激光测深基本原理

Fig.1 Principle of photon counting laser bathymetry

相较于传统线性探测体制激光测深技术^[7]利用双工作波长对回波进行波形探测,光子计数激光测深显然具有更高的分辨率和灵敏度以及更低的系统复杂度。

1.2 光子计数激光测深能力分析

为了分析系统的测深能力,在系统其他硬件参数较为固定的情况下,需要探讨激光器能量对测深能力的影响。参考文献[8]已经推导出激光雷达方程的平均光子形式,据此可以计算出陆上测距时,单次激光脉冲发射后探测器接收到回波信号产生的平均光子数为:

$$N_{s,p} = \frac{\eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_r \cdot \rho_s \cdot T_{\lambda,a}^2 \cdot \cos\theta}{h \cdot \nu} \cdot \frac{A_r}{\pi \cdot R_a^2} \cdot E_t \quad (1)$$

式中： E_t 为激光器单脉冲能量； $T_{\lambda,a}$ 为发射激光的大气单程透过率，对于星载平台，可取 0.8，对于机载情形，可以表示为：

$$T_{\lambda,a} = e^{-\beta_{\lambda} \cdot R_a / \cos \theta_i} \quad (2)$$

在此基础上，需要对公式(1)进行修正以适应光子计数激光测深应用场景。激光穿透大气到达水体表面时，首先在气-水分界面发生一次反射和折射，反射可以近似认为与陆上测距情形相同，简单采用上述方法即可，则穿透水面的激光能量可以表示为：

$$E_1 = E_0 \cdot (1 - \rho_w) \quad (3)$$

式中： E_0 为入射到气-水分界面的激光能量。

水体对激光的吸收或散射造成能量衰减，到达水底的激光能量为：

$$E_2 = E_1 \cdot T_{\lambda,w} \quad (4)$$

式中： $T_{\lambda,w}$ 为水体对激光的衰减系数。参考文献[9]提供了一种类比大气来量化水体对激光衰减的思路。考虑水表折射，根据折射定律计算水面折射角 θ_r ，并假设其为激光在水底的入射角，则：

$$T_{\lambda,w} = e^{-c_{\lambda} \cdot R_w / \cos \theta_r} \quad (5)$$

激光在水底反射后，沿着相似路径再返回到系统探测器，联立公式(1)~(5)，并考虑水体和大气对激光的二次衰减后，可得水底回波信号产生的平均光电子数：

$$N_{s,bat} = \frac{\eta_t \cdot \eta_d \cdot \eta_r \cdot \rho_b \cdot \cos \theta_r}{h \cdot \nu} \cdot \frac{A_r}{\pi \cdot (R_a + R_w)^2} \cdot E_1 \cdot (1 - \rho_w)^2 \cdot e^{-2 \cdot \beta_{\lambda} \cdot R_a / \cos \theta_i} \cdot e^{-2 \cdot c_{\lambda} \cdot R_w / \cos \theta_r} \quad (6)$$

相关参数的意义和取值如表 1 所示。

表 1 测深系统模拟参数

Tab.1 Simulation parameters for bathymetry system

Parameter	Value	
η_t	Transmitter optical efficiency	0.7
η_d	Detector quantum efficiency	50%@532 nm
η_r	Receiver optical efficiency	0.6
ρ_b	Bottom reflectance coefficient	0.01
ρ_w	Water reflectance coefficient	0.1
β_{λ}	Atmospheric extinction coefficient/m ⁻¹	0.297×10 ⁻³
c_{λ}	Absorption & scattering coefficient/m ⁻¹	0.4
R_a	Range in air to sea surface (height)/m	100
R_w	Range in water to the bottom (depth)/m	3
θ_i	Incidence angle to water surface/(°)	5
n	Refractive index of water	1.337@532 nm
A_r	Area of the receiver aperture/m ²	3.142×10 ⁻⁴
h	Planck's constant/J·s	6.63×10 ⁻³⁴
ν	Photon frequency/Hz	5.639×10 ¹⁴

值得说明的是，由于论文使用的单光子探测器存在较长死时间(22 ns)，水面回波信号会降低水底回波信号的探测概率，但由于系统具有多回波统计能力，依然可以实现水体测深。为此，将水面入射角设计为 5°，尽可能减少水体衰减距离的同时，避免水面镜面反射信号进入接收视场，以减小水面的回波信号强度。水底回波信号平均产生一个光电子时，可以得到比较好的探测概率和探测效率的平衡，此时探测概率约 63%^[9]。代入系统参数，可得如图 2 所示探测水深与激光能量的关系，当系统设计测深能力为 3 m 时，所需激光单脉冲能量为 0.275 μJ。反之，当激光器单脉冲能量为 0.5 μJ 时，可得其理论测深能力为 3.73 m，而此时 3 m 深水底回波信号产生的平均光电子数约为 1.8 个。

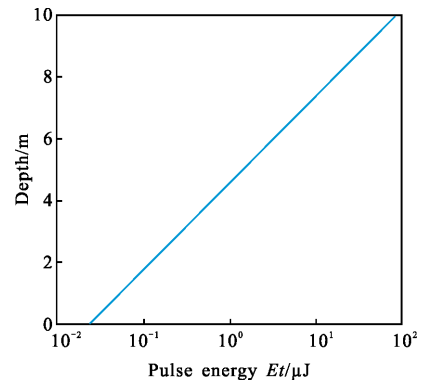


图 2 探测水深与激光能量的关系

Fig.2 Relationship between water depth and the laser energy

2 光子计数激光测深实验及分析

为了研究光子计数探测体制激光雷达在测深方面的应用，搭建了一套光子计数激光测深系统，其结构如图 3 所示。

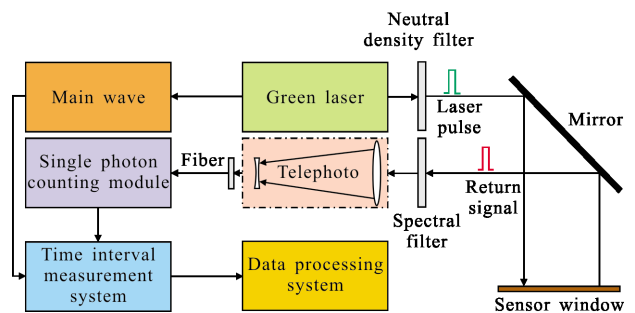


图 3 光子计数激光测深系统框图

Fig.3 Block diagram of photon counting laser bathymetry system

激光器采用的是商用的被动调 Q 微片激光器,其波长为 532 nm,单脉冲激光能量 5 μ J,脉宽 400 ps,激光重频 10 kHz,高重频和窄脉宽使其非常适合用于光子计数激光雷达光源。光衰减片的衰减倍率为 10 倍,等效发射单脉冲激光能量为 0.5 μ J。532 nm 窄带滤光片的带宽为 2 nm,口径为 20 mm,对应接收光学系统面积为 3.142 \times 10⁻⁴ m²。接收望远镜的焦距为 70 mm,耦合光纤的直径为 50 μ m,等效视场角为 0.7 mrad。

利用实地一处池塘作为探测目标,该池塘水体浑浊,有机物丰富,对激光衰减较大,其透明盘深度约为 1.2 m。池塘边缘铺有石板,水深较浅,中心为淤

泥,深达 3 m 以上。图 4 是实验获得的一组典型数据,图中左栏是将时间间隔乘以水中光速后解算获得的原始距离数据,中栏是对数据滤波后的点云,右栏是在各距离栅格内进行累计得到的直方图,为了获得脉宽展宽与距离分辨率之间的平衡,该直方图统计区间为 300 ps,若水底回波信号太弱,也可以增大统计区间,这样可以更充分利用脉宽内的能量,牺牲分辨率以换取识别能力。由于水体的特殊性,从水面开始到水底都具有较强的回波信号,加之激光雷达在物体分界面会形成一定的脉宽展宽,需要选取合适的分界面提取算法。对比了质心法、中值法、最

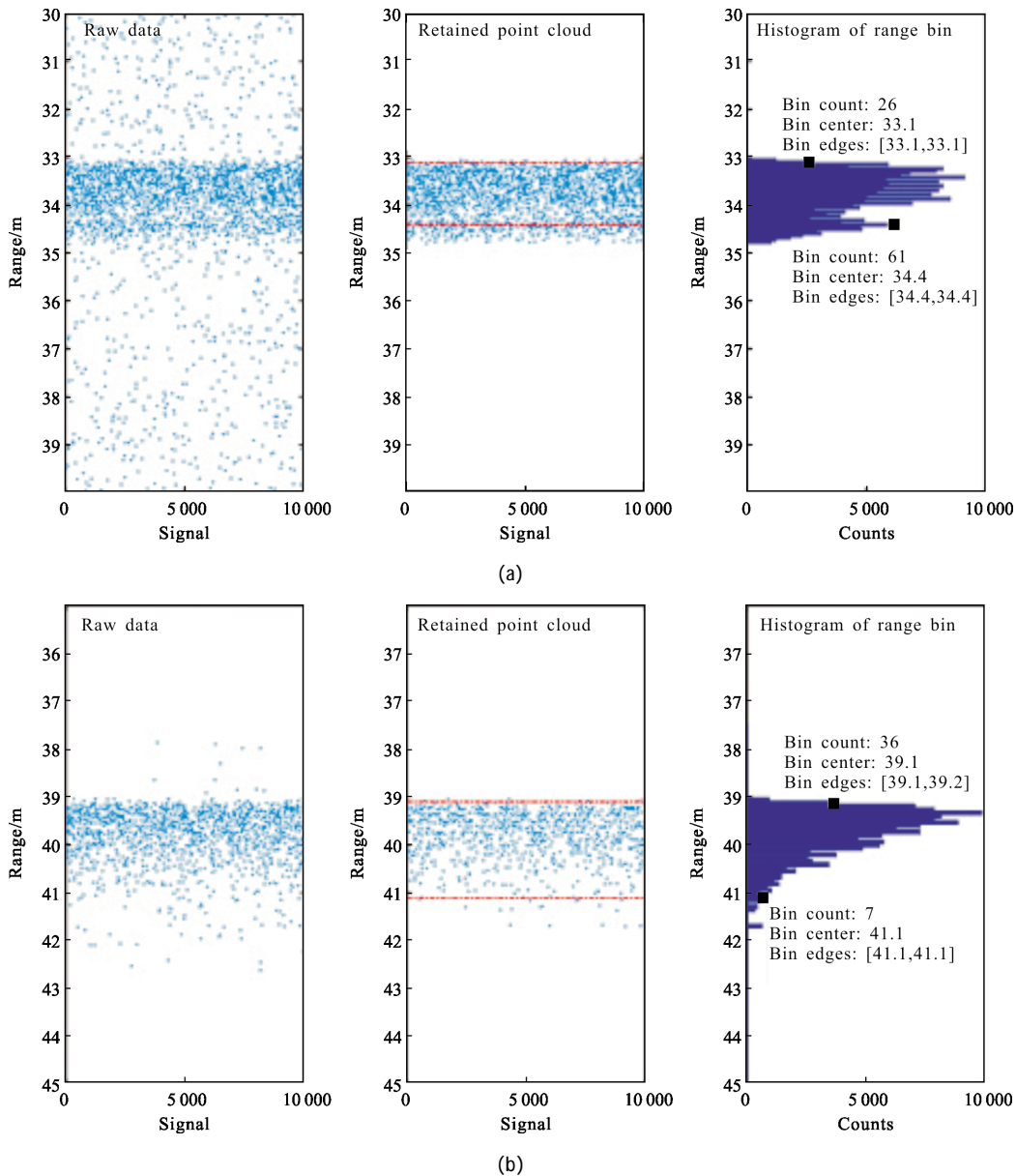


图 4 水深测量典型数据。(a)水深为 1.3 m,(b)水深超过 3 m

Fig.4 Typical measurement data, the depth of water is (a) 1.3 m, (b) more than 3 m

频值法、前沿法和高斯拟合法后^[10],结合水深探测的特殊性,选取直方图前沿作为水面的提取算法,即第一个峰的前沿代表水面的距离,选择最频值来提取水底界面,即第二个峰的最大值(出现频率最大)的点代表水底目标的距离。则图4(a)中所测深度为1.3m,与实际深度吻合。而在图4(b)中,未能成功测得水底,水体延伸了2.0m,说明系统极限测深能力为2m左右。

实际测深能力比预估的更低,主要原因是:(1)理论计算没有考虑背景噪声和探测器死时间对探测概率的影响,当背景噪声较强而探测器死时间较长时,会降低系统的探测概率,测深能力也随之下降。参考文献[11]论述了光子计数激光雷达对地观测时背景噪声和死时间对探测概率的影响,并在实际设计中使用3.6个平均光电子作为弥补其他影响因素的裕量。若同样采用3.6个平均光电子作为设计裕量,则文中系统测深能力约为2.17m,与实际值较为接近,作为对比,参考文献[12]在增大激光能量的同时,使用了一种快速恢复的探测器(死时间仅1.6ns),系统性能得到了显著改善。(2)实验时水面镜面反射较强,激光能量在水面产生了较大损耗,而理论计算时使用了较小值。若假设镜面反射率由10%增加到15%,同样使用3.6个平均光电子数作为计算标准,则此时测深能力为2.03m,与实际相吻合。

3 结论

光子计数激光测深技术能够摆脱传统激光测深技术对信噪比要求较高的缺点,有利于降低系统激光能量,更高的探测灵敏度也使其不必依赖近红外激光来提取水面,从而有效地降低系统复杂度,减少系统体积、质量和设计功耗,具有广阔的发展前景。国内对光子计数激光测深技术的研究尚处于起步阶段,相关研究成果较少报道。文中设计的光子计数激光测深系统是一次很有价值的尝试和突破。该系统理论上极限性能是获取水下3.7m的深度信息,若进一步考虑死时间和背景噪声的影响,留有一定的设计裕量,则测深能力约为2.03m。通过进一步的实验,系统成功测得了水下2m左右的有效信息,取得了较好的效果。随着系统光学结构的完善及探测器死时间的下降,系统性能可以得到进一步提高,光子计数激光测深技术也有望在国内浅海及潮间带测绘

等领域被广泛应用。

参考文献:

- [1] Stoker J M, Abdullah Q A, Nayegandhi A, et al. Evaluation of single photon and Geiger mode Lidar for the 3D Elevation Program[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 767.
- [2] Swatantran A, Tang H, Barrett T, et al. Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon lidar [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28277.
- [3] Li Q, Degnan J, Barrett T, et al. First evaluation on single photon-sensitive lidar data [J]. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2016, 82: 455-463.
- [4] 翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. *海洋测绘*, 2012, 32(2):67-71.
- [5] Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo, et al. Accurate measurement of sea surface in an airborne laser bathymetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 351-355. (in Chinese)
姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统中的精确海表测量[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(4): 351-355.
- [6] Shrestha K Y, Carter W E, Slatton K C, et al. Shallow bathymetric mapping via multistop single photoelectron sensitivity laser ranging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4771-4790.
- [7] Axelsson A. Rapid topographic and bathymetric reconnaissance using airborne LiDAR[C]//*SPIE*, 2010, 7835: 783503.
- [8] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5186-5190.
- [9] Cossio T, Slatton K C, Carter W, et al. Predicting topographic and bathymetric measurement performance for low-SNR airborne lidar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2298-2315.
- [10] Harding D, Dabney P, Valett S, et al. Airborne polarimetric, two-color laser altimeter measurements of lake ice cover: A pathfinder for NASA's ICESat-2 spaceflight mission [C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2011: 3598-3601.
- [11] Hou Libing. Research on key technologies of photon counting imaging lidar in moving conditions [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
侯利冰. 运动平台条件下光子计数激光成像雷达关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [12] Degnan J J. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 958.