

光子累计方法在成像激光雷达中的应用研究

杨春沪¹,孙东松²,李洪敬³

(1.上海电力学院 数理系,上海 200090;2.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100083;
3.苏州大学 物理系,江苏 苏州 215006)

摘要:介绍了一套自行研制的采用光子计数探测的1064 nm 激光雷达系统。理论分析了光子计数探测技术和信噪比的改善,实验研究了改善信噪比的脉冲累计方法。给出了光子累计脉冲与信噪比之间的平方根关系,以及不同距离下的探测结果。另外,讨论了光子累计在两种成像方式下,相同参数的数值模拟和比较。结果表明:采用大发射光束和光子累积方法进行探测的信噪比,比单光束、大光强和逐行扫描方式的探测在理论上要好些,即探测概率高。

关键词:激光雷达; 信噪比; 成像; 光子计数

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0517-04

Photon counting applied to imaging lidar

YANG Chun-hu¹,SUN Dong-song²,LI Hong-jing³

(1.Department of Mathematics and Physics,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;
2.School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering,Beihang University,Beijing 100083,China;
3.Department of Physics,Soochow University,Suzhou 215006,China)

Abstract:The system theory of imaging ranging lidar is researched and the 1064 nm lidar system with photon counting detection is described.The photon counting detection technique and the improvement of the signal-to-noise ratio are analyzed theoretically.The improved signal-to-noise ratio for the weak signal detection with pulse accumulation technique is experimentally proved.The sub-duplicate relationship of photon accumulative pulse and the signal-to-noise ratio is presented experimentally with the different distant targets.In addition, the application of photon counting detection technique to the two difference imaging mode is discussed.The results indicate that the higher detection probability with broad beam emitting and photon counting detection can be obtained than the single-beam scanning mode.

Key words: Lidar; Signal-to-noise ratio; Imaging; Photon counting

0 引言

成像激光雷达具有方向性强、角分辨率及测距精

度高、作用距离远、抗干扰能力强、不容易被发现等优点,在飞行器导航、直升机防撞、机器人视觉等方面有潜在的应用前景^[1-3]。

收稿日期:2005-01-02; 修订日期:2005-01-20

作者简介:杨春沪(1980-),女,江苏无锡人,硕士生,主要研究方向为直接接收激光雷达、微波信号检测。

激光成像雷达的应用研究始于 20 世纪 70 年代。CO₂ 激光雷达起步最早,1978 年研制出第一台三维成像外差激光雷达样机,随后 CO₂ 相干激光雷达经历了近 30 年的发展,也取得了很大突破;然而,CO₂ 激光成像雷达由于体积较大、研制成本较高、探测器需低温制冷等,在应用中的竞争力受到制约。最近十几年,全固态小型激光成像雷达成为研究的热点,其中半导体成像激光雷达已经应用于直升机低空防撞系统,作用距离 1 km 范围内。二极管泵浦固体激光器(DPL)的发展,给固体激光雷达技术注入了新的活力,使固体激光雷达在成像、远程目标跟踪和识别等领域呈现出巨大的发展潜力。美国 Hercules^[4] 防御中心成功研制了一台用于战场监视的 1.32 μm 固体激光成像雷达,采用光栅扫描成距离像,最大距离为 2 km。扫描成像激光雷达由于扫描速度和孔径要满足一定要求,限制了宽光敏面积光源的使用。而非扫描成像技术可以解决这个问题,而且由于焦平面阵列器件的采用,使各种成像的速率都非常高。美国 Arete 机构^[5,6] 研制了一种高分辨率的条纹管成像激光雷达(STIL)。20 世纪 90 年代末,美国空军研究实验室与 Arete 合作,将这项技术应用到目标自动识别巡航导弹上,条纹管能利用激光的高重复频率(10~20 kHz),使得 CCD 阵列上每一单元堆积较多的脉冲数,并以不太高的帧频(150 Hz)读出信噪比改善的像信号。由于不需要激光器具有太高的能量,从而压缩了激光器的尺寸,减少了质量,降低了成本。

针对成像激光雷达的应用背景,提出高重复频率激光发射和光子计数多脉冲检测技术,实验证明采用这两种技术方法提高了系统信噪比和探测概率。另外,分别讨论了在扫描成像以及凝视激光成像方式下,采用光子累计探测的结果。

1 光子累计探测

1.1 探测原理

对于采用光子探测器的单波长激光雷达系统,接收单元收集到的散射信号光子数随距离 z 的变化为^[7]:

$$N(z) = \frac{\eta \lambda E}{hc} \frac{A_r}{z^2} Y(z) \eta_{\text{sys}} \Delta z f T^2(z) \quad (1)$$

式中 η 是探测器的量子效率; E 是发射的脉冲能量; λ 是激光波长; c 是光速; h 是普朗克常数; A_r 是望远镜有效接收面积; $Y(z)$ 是发射机与接收机的几何重叠因子; η_{sys} 是系统的光学透过率; Δz 是激光雷达的测距分辨率; f 是硬目标的后向反射率; $T(z)$ 是单程大气透过系数。在散粒噪声限下,单次测量下获得的光子探测信噪比为^[8]:

$$\frac{S}{N} = \frac{N(z)}{\sqrt{N(z) + N_b + N_d}} \quad (2)$$

式中 N_d 为探测器本身产生的噪声光子数; N_b 为背景噪声光子数,表示为:

$$N_b = \frac{\eta \lambda}{hc} \frac{2 \Delta r}{c} A_r T_{\text{sys}} I_\lambda \Omega \Delta \lambda \quad (3)$$

式中 I_λ 是背景强度; Ω 是接收视场立体角(sr); $\Delta \lambda$ 是接收机光学带宽。

通常评价一个激光雷达系统的性能除了系统的接收信噪比外,探测概率是决定因素。如果采用单脉冲激光探测,当背景、探测器和前置放大器噪声源在探测过程中起主要作用时,噪声分布可以合理地近似为高斯概率密度分布,则探测概率可用下式给出:

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{SNR - TNR}{\sqrt{2} (1 + \sigma_A^2 SNR^2)^{1/2}} \right) \right] \quad (4)$$

式中 σ_A 是归一化平均激光辐射强度的均方根抖动; $\operatorname{erf}(x)$ 是单边误差函数; TNR 是探测阈值噪声比,可近似地表示为:

$$TNR \approx \sqrt{2 \ln \left(\frac{2 R_{\max} \Delta f_n}{\sqrt{3} c P_{fa}} \right)} \quad (5)$$

式中 R_{\max} 是最大计数距离 (m); Δf_n 为接收机的噪声带宽(Hz); P_{fa} 是单脉冲的虚警概率。但当信号和噪声都很弱时,噪声分布由泊松分布描述,其探测概率为:

$$P(n \geq n_t) = \sum_{r=n_t}^{\infty} \frac{e^{-\bar{n}} (\bar{n})^r}{r!} = 1 - \sum_{r=0}^{n_t-1} \frac{e^{-\bar{n}} (\bar{n})^r}{r!} \quad (6)$$

在实际测量中,由于大气传输的起伏或目标反转起伏的影响,采用发射多脉冲的方法要比用发射高能

量单脉冲方法极大地提高探测率。这时累积探测概率 P 可以表示为二项式形式:

$$P(x \geq m) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} (P_d)^k (1-P_d)^{n-k} = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} \binom{n}{k} (P_d)^k (1-P_d)^{n-k} \quad (7)$$

式中 $P(x \geq m)$ 表示在 n 个脉冲中至少有 m 个脉冲的探测概率; P_d 是单脉冲探测概率。

提高探测率的一个方法是对信号作平均处理, 对目标进行 n 次测量后, 将每次测量接收信号相加。由于对相同目标测量的接收信号相关而噪声不相关, 则最后信噪比(SNR)值增加。在理想信号波形下, 测得的总 SNR 为:

$$SNR = \sqrt{n} SNR_1 \quad (8)$$

对于采用 r 元面阵 CCD 探测器的成像激光雷达, 第 i 个单元接收到的归一化光信号强度 i_i 可写为:

$$i_i = \frac{1}{rI_0} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} I(x,y) dx dy \quad (9)$$

则每个 CCD 单元的光子探测信噪比可表示为:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \frac{\sqrt{n} N(z) i_i}{\sqrt{N(z) i_i + N_b + N_d}} \quad (10)$$

CCD 输出的总的探测信噪比为:

$$SNR = \left[\sum_{i=1}^r \left(\frac{S}{N}\right)_i \right]^{-1/2} \quad (11)$$

1.2 实验结果与分析

实验装置采用的是收发分置直接接收激光雷达系统, 如图 1 所示。二极管泵浦 Nd:YVO₄ 激光器工作波长为 1064 nm, 激光平均功率为 1.8 W, 脉冲重复频率(PRF)为 12.35 kHz, 单脉冲能量 146 μJ; 为了提高安全性, 安装了 40 倍扩束器, 使出射的激光经过扩束以后射向目标; 光学天线是施密特-卡塞望远镜; 探测器为单光子计数模块, 使用达通型硅雪崩光电二极管(Si:APD); 并采用 pci 总线且与微机建立联系的多通道数据采集卡进行数据采集。光电探测器和数据采集

卡都以光子计数方式工作。

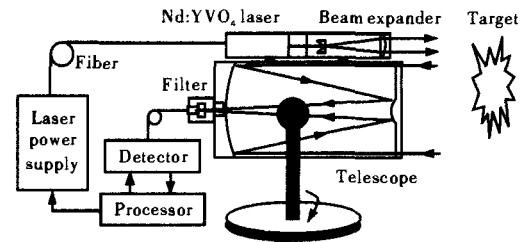


图 1 直接探测激光雷达系统光路

Fig.1 Diagram of beam path for direct detection lidar system

为了研究光子计数探测方式下, 多脉冲累积对信噪比的影响, 分别对距离为 1170 和 3495 m 的硬目标进行了系列实验。在设定不同的脉冲数下进行测量, 观察其对信噪比的影响。从图 2 可以看出, 距离不同的两个目标, 当脉冲数增加时, 信噪比都明显呈上升趋势; 而且设定的功率越高, 增长越快。同时, 对数据点进行线性拟合, 发现信噪比与脉冲数的平方根符合线性的关系。图 2(a) 为 1170 m 目标, (b) 为 3495 m 目标。

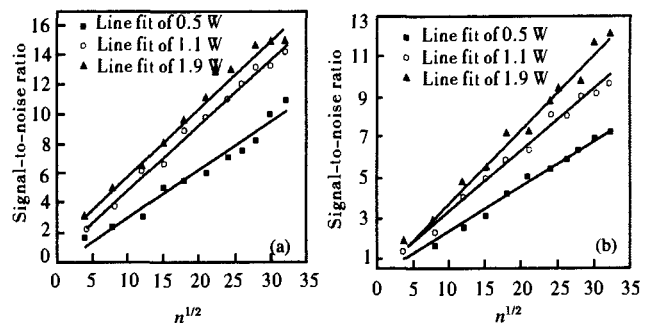


图 2 不同距离目标的信噪比与脉冲数 $n^{1/2}$ 的关系

Fig.2 Relationship between signal-to-noise ratio and $n^{1/2}$ with different distant targets

2 光子累计方法在成像激光雷达中的应用

光子累计方法应用于激光成像系统, 由于成像像元数和帧频速率的限制, 累积脉冲数 n 也受到限制。对于扫描成像系统, 假设像素为 32×32, 帧频速率 4 帧/s, 作用距离 7 km, 计算得出每个像元最多的累积脉冲数为 5; 考虑到数据传输和处理占用率, 选择 $n=4$ 。根据表 1 给出的系统参数, 利用 Monte-Carlo 方法模拟计算了信噪比随距离的变化。从图 3(a) 可以看出,

当脉冲数为 4 时,单脉冲所测得的信噪比有明显的提高。对于凝视型激光成像系统,采用面阵 CCD(如图 4)接收。如果参数不变,面阵像素数仍为 32×32 ,帧速率同样是 4 帧/s,作用距离 7 km,则可计算出每个像元最多可以累积的脉冲数是 4096,但每个像元上所获得的激光能量比原来减少,这里假设激光能量在每个 CCD 阵列上是均匀分布的。如图 3(b)所示,模拟计算了扫描方式下和面阵探测方式下某一个像元上的信噪比随距离的变化。可以看出,采用面阵探测方式得到的信号比较平滑,更有利于数据采集和处理。

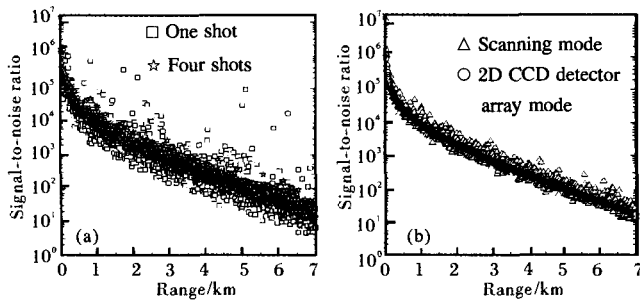


图 3 光子计数探测方式的信噪比

Fig.3 Signal-to-noise ratio with photo counting

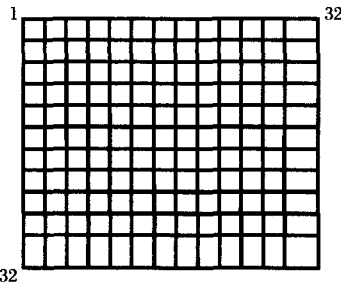


图 4 32×32 元面阵 CCD 示意图

Fig.4 32×32 pixel 2-D CCD detector array

3 结论

本文提出了利用光子累计提高系统探测性能的概念,并进行了理论分析;同时,对选定硬目标进行系列的多脉冲累积探测的信噪比改善的实验研究,得出信噪比与激光能量、目标距离、目标后向反射率、脉冲数 n 之间的关系。另外,针对成像激光雷达的应用背景,在相同的技术参数下,数值模拟了扫描成像与凝视型成像两种情况,可以看出,采用凝视型成像方式得到的数据起伏小,有利于信号的采集和处理。

表 1 激光雷达系统参数

Tab.1 Parameters of laser radar

Item	Parameter	
System	Resolution	15 m
	Range	7 km
	Wavelength	1064 nm (Nd:YAG)
Transmitter	Energy	100 mJ/pulse
	Pulse width	15 ns
	PRF	15 kHz
	Optical efficiency	90%
Receiver	Telescope diameter	250 mm
	Optical efficiency	50%
	Quantum efficiency	18%(APD)

参考文献:

- [1] ZHANG Qi, GU Wei-kang. Error analysis and algorithm research in real-time obstacle detection with ranging lidar[J]. Robot(张奇, 顾伟康. 激光测距雷达距离障碍物实时检测算法研究及误差分析. 机器人), 1997, 19(2): 122-128.
- [2] LU Zu-kang, ZANG Kan, LI Pei-yong, et al. Research on 3-D imaging lidar system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), Imaging Lidar(陆阻康, 藏侃, 李培勇, 等. 激光雷达三维成像系统的研究. 浙江大学学报(工学版). 激光成像雷达), 1999, 33(4): 418-421.
- [3] WANG Guang-jun, TIAN Jin-wen, LIU Jian. Imaging lidar for vehicle obstacle avoidance [J]. Journal of Electric Wave Science(王广君, 田金文, 柳健. 成像激光雷达在飞行器避障中的应用. 电波科学学报), 2001, 16(2): 249-251.
- [4] LIU Xing-xin, LI Yan-lan. State-of-art of foreign military solid-state laser[J]. Laser and Infrared(刘兴新, 李燕兰. 国外军用固体激光技术发展现状. 激光与红外), 2000, 30(1): 7-10, 41.
- [5] Redman B C, Griffis A J, Schibley E B. Streak tube imaging lidar (still) for 3-D imaging of terrestrial targets[R]. Arete Associates, N/A, 2000.
- [6] Brian Redman. Real-time obstacle detection using a streak tube imaging lidar (still) [R]. Arete Associates, SBIR Final Report for Contract M67004-99-0034, 1999.
- [7] YANG Zhao, SUN Dong-song, LI Qiang. Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar [J]. Infrared and Laser Engineering(杨昭, 孙东松, 李强. 成像激光雷达中大气消光系数的反演方法. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 239-242.
- [8] James D Spinhine. Micro pulse lidar[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 48-55.