

# 采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统

杨芳<sup>1,2,3</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 贺岩<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海电力学院 电子与信息工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 在高速伪随机码调制和光子计数技术的激光测距系统中, 将 1 550 nm 光纤激光器的伪随机码调制速率从 622 MHz 提高到 1 GHz, 利用光纤延时方法开展了两种调制速率下的测距实验并进行性能验证和对比。采用 10 阶  $M$  序列伪随机码和探测效率为 10% 的同一个 InGaAs/InP 雪崩光电二极管, 入射到探测器的信号光能量均为  $1.94 \times 10^{-17}$  J 时, 得到二者的系统信噪比基本一致, 但在高调制速率下系统的测距精度提高了 1.58 倍, 基本符合理论计算结果。搭建了实际测距平台并开展基于 1 GHz 调制速率下的室内测距实验, 当测量距离约为 4.5 m 的高反射目标时, 得到 2.1 cm 的测距精度, 该实验结果为室外测距实验提供了参考依据。

**关键词:** 伪随机码调制; 光子计数; 激光测距; InGaAs/InP 雪崩光电二极管

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)12-3234-05

## Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques

Yang Fang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xin<sup>1,2</sup>, He Yan<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

- (1. Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. School of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Pseudorandom modulation rate which used to modulate 1 550 nm fiber laser was prompted from 622 MHz to 1 GHz in the laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting technology. Ranging performance was compared and demonstrated under two different modulation rates using the optical fiber delay method. 10 order  $M$ -sequence pseudorandom code and the same InGaAs/InP single photon detector with detection efficiency of 10% were implemented in the system. Under condition of input signal average energy of  $1.94 \times 10^{-17}$  J, the similar SNRs were acquired in the two systems and the ranging accuracy was improved by 1.58 times under high modulation rate which was in good agreement with theory result. The actual ranging platform was established and ranging experiment was carried out indoor. The ranging accuracy of 2.1 cm was obtained when measuring a high-

收稿日期: 2013-04-20; 修订日期: 2013-05-23

基金项目: 中国科学院支撑项目(61501010304)

作者简介: 杨芳 (1978-), 女, 博士生, 主要从事新型激光雷达的研究。Email: yang\_fang\_2001@sina.com.cn

导师简介: 陈卫标 (1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光遥感、遥测和激光雷达等方面的研究。

Email: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

reflected target which was about 4.5 m away. The result is useful for outdoor ranging system.

**Key words:** pseudorandom modulation; photon counting; laser ranging;  
InGaAs/InP avalanche photodiode

## 0 引言

星载激光高度计已广泛应用于地球科学和空间探测中<sup>[1-5]</sup>。在已发射的典型星载激光测距系统中,均采用传统的脉冲直接测距方法。激光高度计的光源大多采用工作波长在 1 064 nm 或 532 nm 的高能窄脉冲 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲激光器的重复频率在 40 Hz 以下<sup>[6]</sup>。未来随着激光高度计在三维成像和高精度远程测距应用方面的深入开展,势必要提高激光脉冲的重复频率和测量密度,克服距离分辨率低的问题。因此多家研究机构都在探索新的测距体制。其中基于伪随机码调制的激光测距方式很早就引起了人们的关注<sup>[7-11]</sup>。这种测距方式采用伪随机码对连续光源进行调制后发射,在大气探测系统中得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。而伪随机码调制技术应用于星载测距的想法也引起了人们的兴趣<sup>[11]</sup>。随后,基于单光子计数伪随机码调制技术在激光测距和三维成像方面陆续展开研究,美国 NASA 戈德达空间飞行中心通过一系列的实验,提出基于单光子计数的伪随机码技术在未来空间激光高度计测距方面的应用前景<sup>[12-13]</sup>;Sun Xiaoli 等人采用一种改进型的伪随机码,通过改变码元的宽度获得更低的占空比,实现了接收系统在信噪比、灵敏度和距离分辨率方面的显著提高<sup>[14]</sup>。参考文献[15]中将伪随机码模式匹配技术用于解决距离模糊问题并开展了激光三维成像实验。另外还有一些新的测距方法也陆续被提出,如采用伪随机序列对连续激光进行调制的外差探测方法<sup>[16]</sup>等。

该实验室在先期工作中搭建了一套验证实验系统<sup>[17]</sup>。对 1 550 nm 光纤激光器输出的信号光经 13 阶  $M$  序列伪随机码在 100 MHz 的调制速率下调制后经光纤延迟和衰减器衰减后入射至离散的单光子探测器,得到互相关的目标距离,验证了系统的可行性。在后续的工作中,对实验系统进行改进,将信号光的调制速率提高到 622 MHz,并采用低噪声的制冷型单光子探测器,得到了 22.6 dB 的系统信噪比和 0.95 cm 的测距精度。实验结果表明,改进后系统的信噪比和

测距精度都有较大幅度的提高<sup>[18]</sup>。为了实现更高的测距性能,文中在原有实验系统的基础上,将伪随机码的调制速率提高至 1 GHz,在入射至探测器信号光能量相同的情况下,进行了两种调制速率下的光纤内延迟衰减实验,实验结果表明在 1 GHz 调制速率下得到更高的测距精度。另外搭建了实际测距系统,进行了 1 GHz 调制速率下的室内测距实验,为后续进一步开展室外测距实验进行技术准备。

## 1 测距原理及实验装置

由测距精度的理论计算公式  $\sigma = \frac{\Delta d}{\sqrt{SNR}}$  可知,距离分辨率和信噪比越高,测距精度越高。高调制速率可提高距离分辨率,从而提高测距精度。文中将系统的伪随机码调制速率提高至 1 GHz,在入射至探测器的信号光能量相同的情况下,分别进行了 1 GHz 和 622 MHz 调制速率下的光纤内延迟衰减测距实验,分析了不同的距离分辨率对系统性能的影响。系统实验装置原理框图如图 1 所示<sup>[18]</sup>。

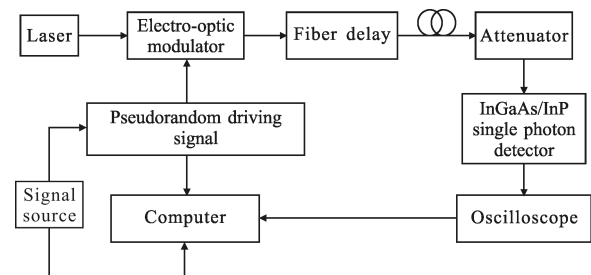


图 1 实验装置原理框图

Fig.1 Experiment system schematic diagram

## 2 不同调制速率下的测距实验结果对比

### 2.1 不同调制速率下的测距实验结果

发射激光经过约 5.8 m 的光纤延时后,通过可调光衰减器将入射光能量衰减至  $1.94 \times 10^{-17}$  J,由 5 GS/s 采样率的示波器采集单光子探测器的输出脉冲信号,重复测量 15 次。单光子探测器输出的每一个脉冲信号的上升沿代表探测器探测到一个回波信号或噪声。在计算机软件程序中设置探测阈值从而最大

限度地滤除噪声，对每次测量的数据中高于阈值的上升沿脉冲采样点判别为信号“1”，其余采样点判断为“0”，得到单次测量的信号序列。将每次判定后的信号序列进行叠加，叠加后的序列经过阈值鉴别后得到接收码元序列，与原始伪随机码序列进行互相关运算后的结果如图 2 所示。

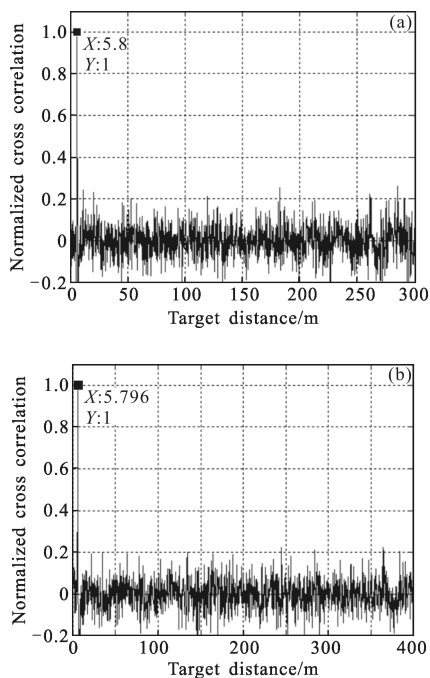


图 2 累加 15 次后的归一化相关图

Fig.2 Normalized cross correlation signal after 15 times accumulation

从图 2 中可以看出，通过确定互相关运算结果的峰值位置得到在 1 GHz 和 622 MHz 调制速率下的目标距离分别为 5.8 m 和 5.796 m，测得的距离值基本相同。对图中互相关后的结果经信号与噪声的均方统计后得到系统的信噪比分别为 22 dB 和 22.4 dB，信噪比基本一致。说明在采用同一个单光子探测器的情况下探测器噪声对系统信噪比的影响基本相同。

2.2 距离分辨率

激光在光纤中的传播速度  $c$  为  $2 \times 10^8$  m/s，由距离分辨率与调制速率的关系式  $\Delta d = \frac{c}{f}$  可得到不同调制速率下的距离分辨率。在 622 MHz 和 1 GHz 的调制速率下，距离分辨率  $\Delta d$  分别是 32 cm 和 20 cm。由于信号光在光纤内延时衰减，背景噪声可忽略，系统的信噪比主要由探测器的探测信噪比决定。当采用同一个单光子探测器时，不同调制速率下的系统探测信噪比基本一致，因此测距精度主要由距离分辨

率决定。根据测距精度的理论计算公式可知，系统在 1 GHz 调制速率下的测距精度约是 622 MHz 调制速率下的 1.6 倍。

2.3 系统测距精度

由质心拟合算法得到在两种调制速率下的 20 组目标距离数据如图 3 所示。

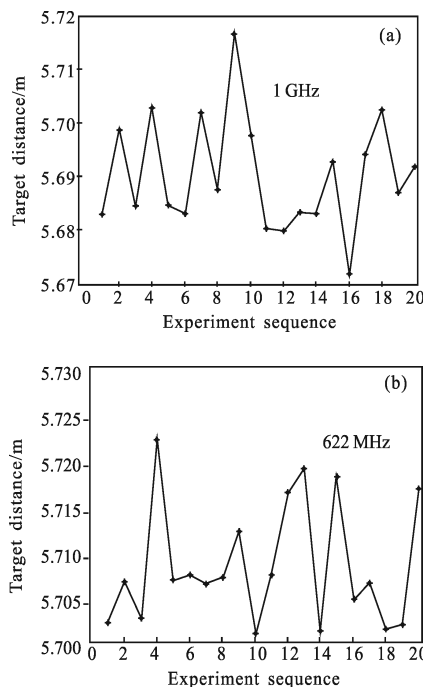


图 3 1 GHz 和 622 MHz 调制速率下重复测量 20 次的目标距离

Fig.3 Target distances of 20 times measurement at modulation frequency of 1 GHz and 622 MHz

对测量的 20 组距离值进行平均后得到 1 GHz 和 622 MHz 调制速率下的目标平均距离分别是 5.71 m 和 5.69 m，进一步求得两种调制速率下的测距精度分别是 0.65 cm 和 1.03 cm。从实验结果可以看出，调制速率为 1 GHz 的测距精度是 622 MHz 调制速率下的 1.58 倍，说明当相同的入射信号光能量进入到同一个单光子探测器时，随着调制速率的提高，系统的测距精度随之提高。该结果与理论计算结果基本一致。

3 实际测距实验结果及分析

3.1 室内测距实验装置

搭建了室内测距实验系统，系统结构框图如图 4 所示。波形发生器产生 10 阶  $M$  序列伪随机码，经电光调制器对 1 550 nm 的光纤激光器进行 1 GHz 调制速率的调制。调制后的信号光经发射望远镜系统水

平发射至一个高反射率的目标。从目标返回的信号光经接收望远镜接收后耦合到单光子探测器,由高采样速率的示波器采集探测器输出的脉冲信号。经计算机软件处理后得到距离信息。根据公式  $\Delta d = \frac{c}{2f}$  ( $c$  为激光在大气中的传播速度  $3 \times 10^8$  m/s) 可得到 1 GHz 调制速率下的实际距离分辨率为 15 cm。

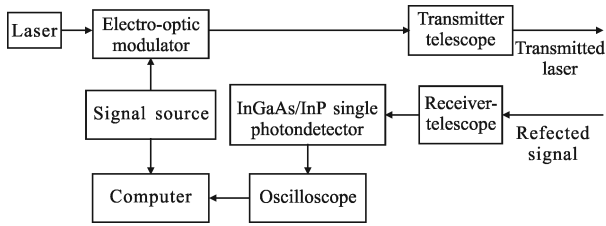


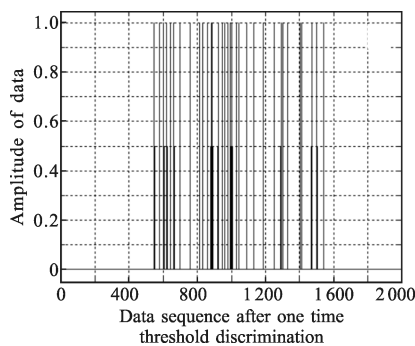
图 4 室内测距实验框图

Fig.4 Block diagram of experiment setup in door

### 3.2 测距实验结果

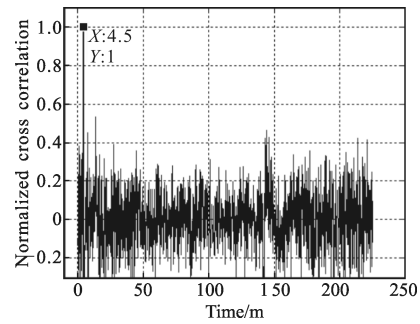
在实际测距中,发射信号光的峰值功率为 1.53 W。探测器接收到的信号中除了从目标返回的信号光外,还有传播过程中的噪声和探测器自身的噪声等。在计算机软件程序中要尽可能地鉴别噪声和信号光。通过设置探测器输出脉冲信号的阈值,摒除探测器输出信号中低于阈值的上升沿脉冲,获得有效的接收回波信号。示波器的采样率为 5 GS/s,每个测量点为 0.2 ns,采集到的探测器输出脉冲信号如图 5(a) 所示。在数据处理中将数字化后的数据进行判别后得到“1”(信号)和“0”(非信号)的信号序列。判定后的信号码元序列与原始伪随机码序列相关后的归一化波形如图 5(b)所示。

由图 5(b)可以看出,测量距离约为 4.5 m,经计算得到系统的信噪比为 16 dB。对所测量的 21 次数据进行质心拟合算法后得到测量的实际距离值如图 6 所示。



(a) 单次阈值鉴别后的码元序列

(a) Data sequence after one time signal threshold discrimination



(b) 信号码元与原始伪随机码的归一化相关图

(b) Normalized cross correlation between signal sequence and original PN code

图 5 10 阶  $M$  序列伪随机码,1 GHz 调制速率,发射信号光峰值功率为 1.53 W 下的室内测距结果

Fig.5 Ranging results indoor with 10 order  $M$  sequence PN code, 1 GHz modulation rate and peak signal power of 1.53 W

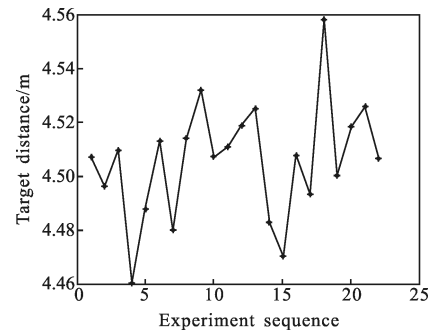


图 6 测量 21 次得到的目标距离

Fig.6 Target distances of 21 times measurement

通过计算得到室内的测距精度为 2.1 cm。结果表明,实际测距中,系统的信噪比和测距精度均比光纤内延时衰减的结果要低。在文中系统中,制冷型的探测器具有较低的暗计数,因此激光在传播过程中的背景噪声是影响系统信噪比的主要因素。根据理论计算得到系统的信噪比为 14.6 dB,与实际结果基本相符合。

## 4 结论

在高速伪随机码调制和光子计数的激光测距系统中,系统采用 10 阶  $M$  序列伪随机码,分别在 1 GHz 和 622 MHz 的调制速率下对 1 550 nm 光纤激光器进行调制。当对系统光源的调制速率提高到 1 GHz 后,室内测距的距离分辨率提高到 15 cm,较 622 MHz 调制速率下提高了 2.13 倍。在入射到同一个单光子

探测器的信号光能量均为  $1.94 \times 10^{-17} \text{ J}$  时, 用光纤延时方法进行的测距结果得到二者测距精度分别为 0.65 cm 和 1.03 cm, 结果表明在高调制速率下, 系统的测距精度随之提高。而随着调制速率的提高, 码元序列进一步压缩, 可实现高重频的测距体制。搭建了 1 GHz 调制速率下的实际测距验证系统。当测量室内一个距离约为 4.5 m 的高反射目标时, 得到 2.1 cm 的测距精度。该测距结果为后续室外测距研究提供了技术参考。

## 致 谢

感谢华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室的曾和平教授和吴光副教授在单光子探测器控制电路制作方面提供的帮助。

## 参 考 文 献 :

- [1] Afzal R S, Yu A W. The geoscience laser altimeter system (GLAS) laser transmitter [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 511-536.
- [2] Chen W B, Hou X, Bi J Z, et al. Solid-state laser for laser altimeter in Chang'E lunar explorer [C]//CLEO Baltimore, MD USA, 2007, 1-2.
- [3] Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Observation of the lunar topography by the laser altimeter LALT on board Japanese lunar explorer SELENE [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 317-322.
- [4] Ramos-Izquierdo L, Scott III V, Schmidt S, et al. Optical system design and integration of the Mercury Laser Altimeter [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1748-1760.
- [5] Afzal R S. Mars observer laser altimeter: laser transmitter [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(15): 3184-3188.
- [6] Anthony W Y, Li S X, Shaw G B, et al. Overview of space qualified solid-state lasers development at NASA goddard space flight center [C]//SPIE, 2009, 7193: 719305-1-719305-7.
- [7] Takeuchi N, Sugimoto N, Baba H. Random modulation cw lidar [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1382-1386.
- [8] Machol J L. Comparison of the pseudorandom noise code and pulsed direct-detection lidars for atmospheric probing [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6021-6023.
- [9] Matthey R, Mitev V. Pseudo-random noise-continuous-wave laser radar for surface and cloud measurements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 43: 557-571.
- [10] Rall J A R, Abshire J B, Manizade S S. Lidar measurements of clouds and aerosols using AlGaAs lasers modulated with pseudorandom codes [C]//*IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 1992: 206-207.
- [11] Norman D M, Gardner C S. Satellite laser ranging using pseudonoise code modulated laser diodes [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(17): 3650-3655.
- [12] Sun X L, Abshire J B, Krainak M A, et al. Photon counting pseudorandom noise code laser altimeters [C]//SPIE, 2007, 6771: 67710O.
- [13] Abshire J B, Sun X L, Krainak M A. Laser altimetry using pseudo-noise code modulated fiber lasers and photon counting detectors [C]//CLEO Baltimore MD USA, 2005, 3: 1991-1993.
- [14] Sun X L, Abshire J B. Modified PN code laser modulation technique for laser measurements [C]//SPIE, 2009, 7199: 71990P.
- [15] Krichel N J, McCarthy A, Buller G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9192-9206.
- [16] Liu Lisheng, Zhao Shuai, Guo Jin. Pseudo-random frequency modulated laser heterodyne detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1890-1895. (in Chinese)  
刘立生, 赵帅, 郭劲. 伪随机序列调制的激光外差探测 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1890-1895.
- [17] Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting techniques [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0314003-1-0314003-6.  
杨馥, 贺岩, 陈卫标. 基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0314003-1-0314003-6.
- [18] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0208001-1-0208001-5.  
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0208001-1-0208001-5.