

基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术

杨 芳^{1,2,3} 张 鑫^{1,2} 贺 岩^{1*} 陈卫标¹

(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上海电力学院计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要 构建了一套基于高速伪随机码调制和光子计数技术的激光测距实验系统, 系统采用 10 阶 M 序列伪随机码调制 1550 nm 光纤激光器和具有 3 级热电制冷能力的 InGaAs/InP 单光子探测器。利用光纤延时方法进行了测距性能验证实验, 在激光器调制速率为 622 MHz, 伪随机码序列长度 1.64 μ s 和探测器探测效率 10% 时, 当入射到探测器的信号光的平均功率为 -76.1 dBm 时, 得到 22.6 dB 的系统信噪比和 0.95 cm 的测距精度, 为实际系统验证提供了技术参考。

关键词 测量; 伪随机码调制; 光子计数; 激光测距; InGaAs/InP 单光子探测器

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0208001

Laser Ranging System Based on High Speed Pseudorandom Modulation and Photon Counting Techniques

Yang Fang^{1,2,3} Zhang Xin^{1,2} He Yan¹ Chen Weibiao¹

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 Computer Science and Information Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

Abstract A laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting technology is developed. 1550 nm fiber laser modulated by 10 order M sequence pseudorandom code and InGaAs/InP single photon detector with three-stage thermo-electric cooler are implemented in the system. The ranging performance is demonstrated using the optical fiber delay method indoor. Under condition of the laser modulation frequency of 622 MHz, the pseudorandom sequence length of 1.64 μ s and the detection efficiency of 10%, the signal-to-noise ratio of 22.6 dB and ranging accuracy of 0.95 cm are obtained with -76.1 dBm input signal average power. This demonstration is useful for developing practiced system.

Key words measurement; pseudorandom modulation; photon counting; laser ranging; InGaAs/InP single photon detector

OCIS codes 280.3400; 030.5260; 350.6090

1 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。在已发射的典型星载激光测距系统中, 所搭载的激光高度计均采用脉冲直接测距方式。如用于地球科学的激光高度计 GLAS^[1], 月球探测

的嫦娥一号^[2]、LALT^[3], 水星探测的 MLA^[4] 以及火星探测的 MOLA^[5] 等, 这些系统的特点是激光器的峰值功率高、重复频率低, 从而产生了测量点稀疏、地表分辨率低的问题, 不能满足高精度测绘的需求。因此研究人员不断探寻其他的测距体制, 其中

收稿日期: 2012-09-04; 收到修改稿日期: 2012-10-15

基金项目: 中国科学院支撑技术项目(61501010304)资助课题。

作者简介: 杨 芳(1978—), 女, 博士研究生, 主要从事新型激光雷达方面的研究。E-mail: 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。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: heyang@siom.ac.cn

基于伪随机码调制的激光测距方式很早就引起了研究人员的关注^[6,7],它的特点是采用伪随机码对连续光源进行调制后发射。近年来随着探测技术的日益成熟和探测性能的提高^[8],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的研究陆续展开。美国 NASA 戈德达空间飞行中心通过一系列的实验,提出该技术在未来空间激光高度计测距方面的应用前景^[9,10],文献[11]中将该技术应用到了激光三维成像领域。另外还有一些新的测距方案,如文献[12]提出一种联合采用伪随机码相位调制光纤激光器和外差探测的测距方法,以提高星载激光高度计的空间分辨率。

本课题组在前期工作中开展了基于伪随机码调制结合光子计数技术在星载测距方面的初步探索,进行了理论分析并模拟仿真星载条件下的参数设计^[13]。根据系统原理搭建了一套验证实验系统。对 1550 nm 的光纤激光器输出的信号光调制后经光纤延迟和衰减器衰减至离散光子序列状态后入射至离散放大光电探测器,获得了互相关的目标距离,说明该技术方案具有可行性^[14]。

在这套实验系统中,伪随机码调制速率为 100 MHz,在光纤内传播的距离分辨率只有 2 m;采用的离散放大光电探测器暗计数为 2.9 MHz,致使系统的信噪比和测距精度均不高。本文在前期工作的基础上对原有实验系统进行改进,对信号光进行高速调制并采用低噪声的单光子探测器,提高了系统的测距精度和信噪比。这种测距方式相比直接脉冲测距方式降低了系统对峰值功率的要求。这样在星载和空间应用的平台下,高能巨脉冲激光器不再是唯一的选择,光纤激光器将会成为其有力的竞争者。

2 系统测距原理

基于伪随机码调制和光子计数的测距系统的测距原理是首先对信号光进行伪随机码调制,经光纤

波,输出的离散光子信号经单光子探测器转换为脉冲信号。光子计数卡对脉冲信号进行阈值甄别后得到信号码元序列,将其与原始伪随机码序列进行互相关运算,根据相关信号的峰值位置对应的时刻得到距离产生的延时量,从而提取出距离信息^[14]。

由测距精度的理论计算公式 $\sigma = \Delta d / \sqrt{R_{SN}}$ 可知,距离分辨率 Δd 和信噪比(SNR) R_{SN} 越高,精度越高。因此高调制速率可提高距离分辨率,制冷型低噪声单光子探测器的采用可提高探测信噪比。本文将伪随机码的调制速率提高至 622 MHz,并采用带制冷的单光子探测器,降低了探测噪声,从而提高了系统信噪比和测距精度。同时,随着调制速率的提高,伪随机码序列的长度得到压缩,系统测距的重复频率可得到有效提高,进而获得高空间分辨率,实现高精度的激光测距测绘。

3 系统实验装置

系统实验装置如图 1 所示。系统采用 1550 nm 的光纤激光器作光源,将波形发生器产生的 10 阶 M 序列伪随机码进行放大后通过电光调制器对光源进行调制,调制速率为 622 MHz。通过一段约 30 m 的光纤延迟后,经可调光衰减器对信号光进行衰减至光子序列状态后入射到单光子探测器。由高采样率的示波器采集探测器的输出脉冲信号。编写计算机软件程序完成对输出信号脉冲的甄别和有效码元判定。将原始的伪随机码信号与判定后的码元序列进行相关运算,由相关信号的峰值位置确定出目标的距离信息。

系统中使用的单光子探测器是 Princeton Lightwave 公司生产的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管(APD),探测器的有效光敏面为 25 μm ,单模光纤耦合输入。具有 3 级热电制冷能力,可将探测器温度由室温(27 $^{\circ}\text{C}$)降至 -50 $^{\circ}\text{C}$,从而显著减少由热噪声引起的暗计数。

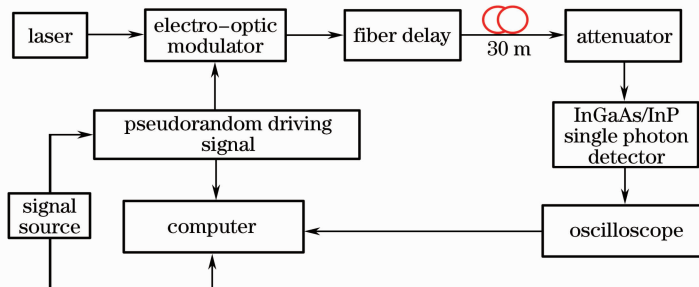


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

为获得高增益,用于单光子探测的 APD 一般在盖格模式下,即 APD 工作于雪崩电压之上。在盖格模式下,常用的控制电路有无源抑制、有源抑制和门模式。为了抑制后脉冲效应,提高探测器的计数率,在红外单光子探测器中多采用门模式控制电路。基于盖革门模式工作的单光子探测器的控制电路原理框图^[15]和输出脉冲波形分别如图 2、3 所示,图 2 中 HV 为偏置电压,LPF 为低通滤波器,AMP 为射频放大器。

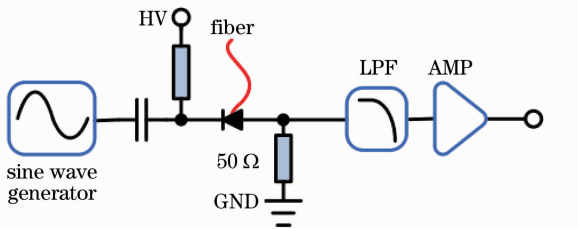


图 2 InGaAs/InP 单光子探测器控制电路原理图
Fig. 2 Schematic of the InGaAs/InP single photon detector control circuit

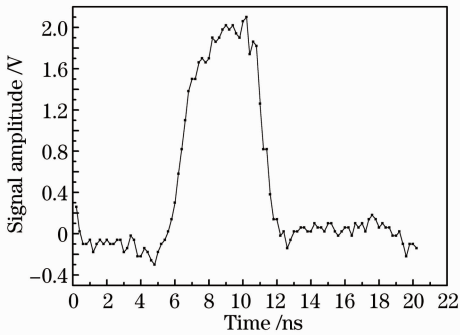


图 3 单光子探测器输出脉冲波形

Fig. 3 Output pulse waveform of the single photon detector

在探测器控制电路中,由正弦波发生器产生的 1.25 GHz 重复频率的正弦波信号作为门模式下的门控信号。APD 制冷至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,偏置电压 62 V。输出信号经过滤波、放大和整形后,以晶体管-晶体管逻辑电平(TTL)脉冲输出,脉冲宽度为 6 ns。经测试,探测器的暗计数为 8 kHz,探测效率为 10%。

4 实验结果及分析

4.1 测距实验结果

发射激光经过约 30 m 的光纤后,通过可调光衰减器将入射光衰减,由采样率为 5 GS/s 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。在软件程序中对每次测量的数据中符合条件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 4 所示。

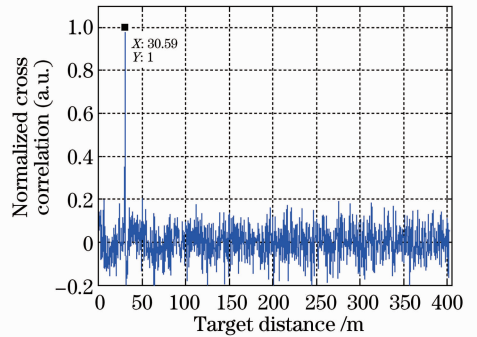


图 4 10 阶 M 序列伪随机码,622 MHz 的调制速率,入射信号光平均功率为 -76.1 dBm ,累加 15 次后的归一化相关图

Fig. 4 Normalized cross correlation signal after 15 times accumulation with the average signal power of -76.1 dBm , 10 order M sequence serial and modulation ratio of 622 MHz

从图 4 中可以看出,互相关信号峰值清晰,通过确定互相关峰值的位置,可得到目标距离为 30.59 m。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为 13.5(22.6 dB)。

4.2 系统测距精度

码元序列长度为码元个数与单个码元宽度的乘积。M 序列码的 m 阶码元个数为 $2^m - 1$,10 阶 M 序列码的码元个数是 1023 个。在 622 MHz 的调制速率下,伪随机码的码元宽度为 1.61 ns。因此 10 阶 M 码元序列长度为 $1.64\text{ }\mu\text{s}$ 。激光在光纤中的传播速度 $c=2\times 10^8\text{ m/s}$,根据距离分辨率与调制速率的关系 $\Delta d=c/f$,得到距离分辨率 $\Delta d=32\text{ cm}$ 。

为了得到准确、真实的目标距离,采用质心拟合的算法^[14]计算出准确的目标距离,继而求得测距精

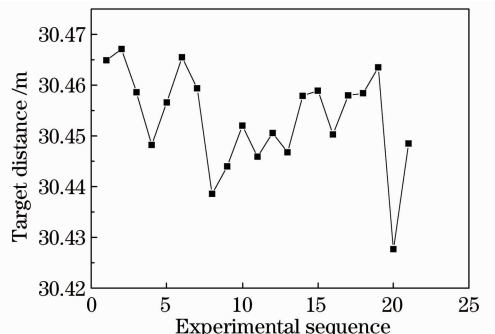


图 5 重复测量 22 组得到的目标距离

Fig. 5 Target distances after 22 times measurement

度。在入射信号光平均功率 -76.1 dBm的情况下,从每叠加 15 次测量数据的归一化互相关结果中获得一个距离值,重复 22 组后的距离数据如图 5 所示。

对 22 组测量的距离值进行平均后得到的目标平均距离是 30.45 m,求得每组实际距离偏离平均距离的均方差是 0.95 cm,即测距精度为 0.95 cm。

4.3 不同信噪比下的测距精度

在 10 阶 M 序列伪随机码,622 MHz 调制速率的情况下,对进入探测器的入射光进行 6 次不同功率的衰减,获得不同的系统信噪比。同时,对每个功率下测得的 20 组数据用质心拟合算法得到精确的距离值,计算出对应的测距精度。不同功率下系统测距精度与信噪比之间的关系如图 6 所示。

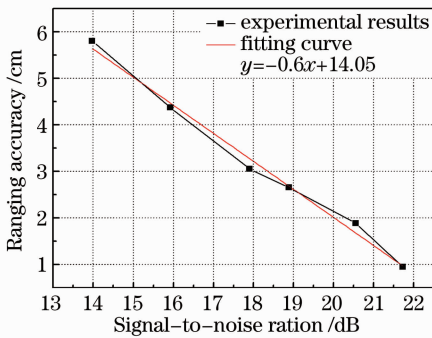


图 6 系统测距精度与信噪比的关系

Fig. 6 Relationship between system ranging accuracy and signal-to-noise ratio

图 6 采用线性坐标表示系统测距精度与信噪比的关系。由图中看出,二者基本满足线性关系。说明在距离分辨率一定的情况下,测距精度随系统信噪比的增加而提高。通过选用带制冷的低噪声探测器,可提高系统信噪比,使系统具有获得更高测距精度的能力。

4.4 制冷型探测器对系统信噪比的影响

当探测器自身的噪声较大时,对整个系统噪声影响较大的是探测器的暗计数。根据单光子探测器的暗计数随温度变化的关系,仿真模拟制冷型探测器温度的变化对系统信噪比的影响,得到系统信噪比与探测器温度的关系如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,系统信噪比随探测器温度的降低而提高。说明降低温度可以减少探测器热噪声引起的暗计数,从而提高探测信噪比。另外,从图中可以看出,随着温度的降低,系统信噪比的变化逐渐减小,说明探测器的温度在 -20 °C后继续降低对系统信噪比的改善不大,在 -20 °C后探测器的暗计数已不再是影响系统噪声的主要因素。考虑到后脉

冲会随温度的降低而增加,故将探测器的工作温度设定在 -20 °C。

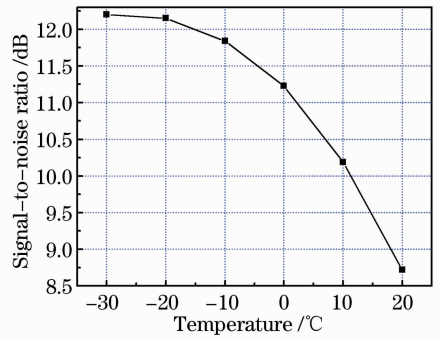


图 7 系统信噪比与探测器温度的关系

Fig. 7 Relationship between system signal-to-noise ratio and detector temperature

4.5 与课题组前期测距结果对比

在本课题组的前期工作中,采用质心拟合算法,在调制速率 100 MHz,调制序列为 14 阶 M 序列码,信号平均功率 -78.6 dBm(脉冲序列的能量 2.26×10^{-15} J)的情况下,系统的距离分辨率为 2 m,系统信噪比为 10(20 dB),多次测量后获得 22 组距离数据的测距精度为 12.7 cm^[14]。将实验结果与改进后的实验系统在 622 MHz 调制速率,10 阶 M 序列码,入射信号光平均功率 -76.1 dBm(脉冲序列的能量为 2.03×10^{-16} J)的情况下得到的结果对比如表 1 所示。

表 1 系统改进前后实验结果对比

Table 1 Comparison of the experimental results before and after the system improvement

Parameters	Previous work	Current work	Difference analysis
Pulse sequence length	8.192 μ s	1.64 μ s	5/1
Energy of M sequence	2.26×10^{-15} J	2.03×10^{-16} J	11/1
Modulation frequency	100 MHz	622 MHz	1/6.22
Distance range resolution	2 m	32 cm	6.2/1
SNR	10	13.5	1/1.35
Ranging accuracy	12.7 cm	0.95 cm	13.4/1

从表 1 的对比结果可以看出,后者的发射脉冲序列能量只有前者的 1/11,而信噪比为前者的 1.35 倍。由于本文采用的制冷型探测器大大降低了暗计数,提高了单光子探测的信噪比。同时,采用更高的调制速率,将距离分辨率提高到原来的 6.2 倍,测距

精度提高到原来的 13.4 倍。从而有效证明了改进后的系统性能有了较大提高。

根据伪随机码和单光子探测结合的测距技术来看,如果伪随机码的调制速率提高至 1 GHz,可以使空间距离分辨率达到 15 cm。若仍采用 10 阶 M 序列码,在系统信噪比相同的情况下,系统的测距精度可提高 2 倍。而 M 序列伪随机码的长度对系统的信噪比也有一定影响,根据分析^[13],在激光发射功率和接收望远镜口径一定的情况下,伪随机码序列越长,系统信噪比越高。因此若选用更高阶数的 M 序列码,测距精度还可进一步提高。这在对远距离、高精度要求的空间激光测距和空间激光三维成像等应用方面,无疑具有突出的优势。

随着系统调制速率的提高,整个码元序列可继续压缩,能够实现高重频的测距体制。在当前系统下,码元序列长度为 1.64 μs ,系统的重复频率为 1 kHz,占空比较低。若采用 13 阶的 M 序列码,1 GHz 的调制速率,码元序列长度为 8.191 μs ,重复频率可提高至 100 kHz,不仅提高了系统的效率,还可以获得更高的测距精度。

5 结 论

在对原有实验系统进行改进的基础上,搭建了高速伪随机码调制和光子计数技术的激光测距实验系统。622 MHz 的调制速率将距离分辨率提高到 32 cm,采用低噪声高性能的 InGaAs/InP 单光子探测器,在伪随机码序列长度为 1.64 μs ,入射信号光平均功率为 -76.1 dBm 的情况下,获得 22.6 dB 的系统信噪比,测距精度达到 0.95 cm。将本次实验结果与前期 100 MHz 调制速率下的系统距离精度对比,测距精度有较大的提高。说明采用高调制速率和制冷型的探测器对基于伪随机码调制的光子测距的距离分辨率和测距精度的改善起主要作用。随着调制速率的进一步提高和更高性能单光子探测器的采用,可进一步扩大该技术的优势,有望应用到未来空间激光探测系统中。

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 R. S. Afzal, A. W. Yu, J. L. Dallas *et al.*. The geoscience laser altimeter system (GLAS) laser transmitter[J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 511~536
- 2 Weibiao Chen, Xia Hou, Jinzi Bi *et al.*. Solid-state laser for laser altimeter in Chang'E lunar explorer[C]. Baltimore: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). 2007. 1~2
- 3 Hiroshi Araki, Seiichi Tazawa, Hirotomo Noda *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 Luis Ramos-Izquierdo, V. Stanley Scott III, Stephen Schmidt *et al.*. Optical system design and integration of the mercury laser altimeter[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1748~1760
- 5 R. S. Afzal. Mars observer laser altimeter:laser transmitter[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3134~3188
- 6 David M., Norman, Chester S. Gardner. Satellite laser ranging using pseudonoise code modulated laser diodes[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(17): 3650~3655
- 7 Janet L. Machol. Comparison of the pseudorandom noise code and pulsed direct-detection lidars for atmospheric probing[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 6021~6023
- 8 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0414003
徐璐,张宇,张勇等.盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J].中国激光,2012, **39**(4): 0414003
- 9 Xiaoli Sun, James B. Abshire, Michael A. Krainak *et al.*. Photon counting pseudorandom noise code laser altimeters[C]. *SPIE*, 2007, **6771**: 67710O
- 10 James B. Abshire, Xiaoli Sun, Micahael A. Krainak. Laser altimetry using pseudo-noise code modulated fiber lasers and photon counting detectors[C]. Baltimore: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2005, **3**: 1991~1993
- 11 Nils J. Krichel, Aongus McCarthy, Gerald S. Buller. Resolvign range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9192~9206
- 12 Yang Fu, Zhan Yage, Yang Qinyu *et al.*. Simulation of the space-borne laser altimeter based on pseudorandom code phase modulation and heterodyne detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s114007
杨馥,詹亚歌,杨沁玉等.基于伪随机码相位调制和外差探测的星载激光高度计仿真研究[J].中国激光,2011, **38**(s1): s114007
- 13 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua *et al.*. Simulation of space borne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 21~26
杨馥,贺岩,周田华等.基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J].光学学报,2009, **29**(1): 21~26
- 14 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
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
- 15 Min Ren, Xiaorong Gu, Yan Liang. Laser ranging at 1550 nm with 1-GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(14): 13497~13502