

# 基于伪随机码调制和单光子计数的 光纤激光测距研究

杨 馥 贺 岩 陈卫标

(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)

**摘要** 开展了基于伪随机码调制和光子计数的 1550 nm 光纤激光测距技术研究, 研制了一套测试实验系统。为了克服常规 InGaAs 单光子探测器由于抑制后脉冲而导致的探测速率低的问题, 系统采用离散放大光电探测器作为单光子探测器件, 单光子探测速率可达 100 MHz。在室温, 偏置电压 53 V, 伪随机码序列长度 81.91  $\mu\text{s}$  时, 系统探测灵敏度可达 -83.6 dBm。在不同信号功率及伪随机码序列长度情况下, 对系统性能进行了测试。在伪随机码序列长度 163.83  $\mu\text{s}$ , 信号平均功率 -78.6 dBm 时, 系统测距精度可达 12.7 cm。根据实验结果, 推算出一套星载条件下的系统参数。

**关键词** 测量; 伪随机码调制; 单光子探测; 激光测距

**中图分类号** O436.3; TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0314003

## Study of Fiber Laser Ranging System Using Pseudorandom Modulation and Single Photon Counting Techniques

Yang Fu He Yan Chen Weibiao

(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)

**Abstract** A 1550 nm fiber laser ranging experiment system combining pseudorandom modulation technique and single photon counting method is developed. In order to overcome the low detection rate problems of ordinary InGaAs single photon detectors due to restraining after pulses, a discrete amplification photo detector is used as the single photon detector with a counting rate of 100 MHz in this system. A sensitivity of -83.6 dBm is achieved under room temperature with the detector's biasing voltage of 53 V and the pseudorandom serial length of 81.91  $\mu\text{s}$ . The system performance is tested under different signal powers and pseudorandom serial lengths. A range accuracy of 12.7 cm is obtained with -78.6 dBm signal average power and 163.83  $\mu\text{s}$  pseudorandom serial length. The system parameters of a spaceborne laser altimeter with this technique are proposed according to the experimental results.

**Key words** measurement; pseudorandom modulation; single photon detection; laser ranging

**OCIS codes** 280.3400; 030.5260; 350.6090

### 1 引 言

激光雷达当前的应用日益广泛<sup>[1~3]</sup>, 其中激光高度计是激光雷达最原始的应用途径。搭载在卫星平台上, 激光高度计可以精确获取卫星平台到行星表面的距离, 结合卫星姿态、定位信息, 通过轨道的重复测量来获取高分辨率的三维数字高程, 因此在

地球科学、深空探测中得到广泛应用。目前, 已经成功进行发射的星载激光高度计, 如地球观测的 GLAS<sup>[4]</sup>, 月球探测的 Clementine<sup>[5]</sup>, 嫦娥一号<sup>[6]</sup>, 火星探测的 MOLA<sup>[7]</sup>等, 均采用传统的脉冲激光测距技术, 通过发射巨脉冲, 采用时间间隔测量技术来获取距离信息。这种方式结构简单, 但是激光器工

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2010-11-09

作者简介: 杨 馥(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事激光测高雷达的仿真以及实验方面的研究。

E-mail: yangfu\_sh@126.com

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

作在窄脉冲的高能脉冲状态下,进一步提高激光重复频率,势必会增加激光器的研制难度,导致研制风险大,成本高。因此,研发高探测灵敏度、小型化、高重复频率的激光高度计成为研究热点。

除了进一步提高传统脉冲测距的能力外,一些新的测量方案不断被提出,如基于微脉冲激光器的光子计数测距<sup>[8]</sup>。该方法通过发射高重复频率的微弱小脉冲,对回波信号进行累加,通过累加峰值来判断目标距离。这种方法结构简单,灵敏度可达到单光子量级,但是多次累加降低了系统的探测频率;基于啁啾调幅的相干测量机制等新技术<sup>[9]</sup>,该方法可通过本振信号放大回波小信号光,探测灵敏度高,但结构复杂,易受环境影响。在文献<sup>[10]</sup>中提出了基于连续激光器的伪随机调制测距技术用于大气探测激光雷达中,该方法采用光电倍增管探测回波信号,光电倍增管固有的死时间限制了系统的探测速率,因此文献将其用于云层这种对系统距离分辨率要求不高的探测。在文献<sup>[11,12]</sup>中,提出了基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测高技术,系统采用光电倍增管作为单光子探测器,采用高电光效率的光纤激光器以节约系统功耗。由于回波光电子数极其稀少,因此光电倍增管固有的死时间并未影响

系统对信号光电子的探测,该套系统在0.5 ms积分时间及制冷情况下成功实现了50 fW平均功率信号的探测。本文基于以上研究机理,使用了离散放大光电探测器这一在常温下即可连续探测单光子序列的器件作为单光子探测器,搭建了一套激光测距实验系统。同时验证了该套系统的空间应用潜力。

## 2 基本原理及其模拟仿真结果

基于伪随机码调制和光子计数的光纤激光测距系统原理如图1所示。输出激光通过电光调制器,根据伪随机码序列对激光产生强度调制,经光放大器放大后由一小口径的发射望远镜耦合输出。目标激光回波信号由另一大口径望远镜接收,准直后经过干涉滤光片,经单光子探测器将离散光子信号转换为离散电脉冲信号输出。光子计数器中设有阈值甄别电路,对电脉冲进行判决,高于阈值的判决为码元1,低于阈值的判决为码元0。由单光子计数器甄别后的码元序列将与原始伪随机码做互相关运算,相关峰值对应的时刻给出了目标距离导致的延时量,从而可提取目标的距离信息。时序控制器用于控制系统的同步性,时序控制器输出作固定延时后,触发光子计数器对回波信号计数。

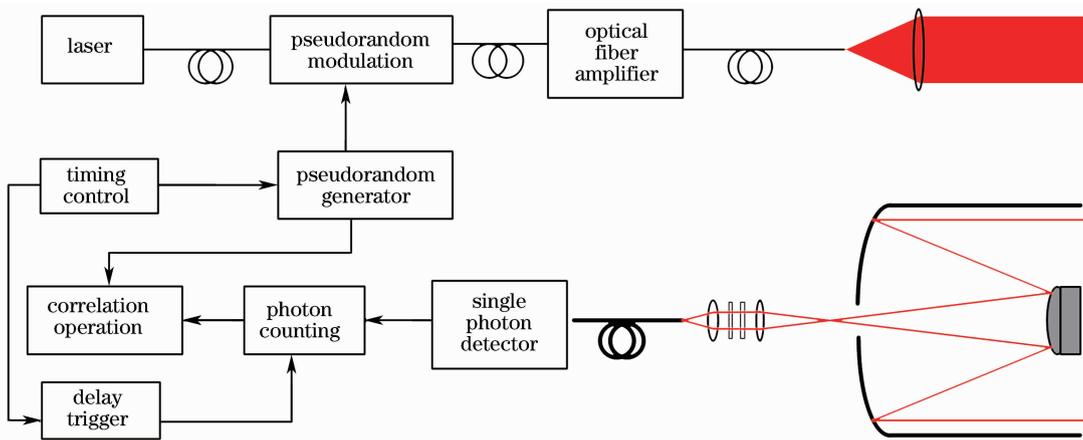


图1 激光测高原理图

Fig. 1 Principle schematic of laser altimeter

杨馥等<sup>[13]</sup>对该套系统进行了详细的理论分析和模拟仿真,并针对星载条件对系统参数进行了优化设计。优化结果表明,在出射功率为10 W,接收望远镜口径0.8 m,伪随机码序列长度600 μs的条件下,系统能够以10 dB的信噪比探测400 km处距离的目标。

## 3 实验装置

为了在实验中检验该套技术的可行性,构建了

一套性能验证实验系统,系统组成如图2所示。采用人眼安全波长的1550 nm光纤激光器作为光源。输出激光通过电光调制器根据伪随机码序列对激光产生强度调制。其中电光调制器的伪随机码驱动信号由任意波形发生器经放大后提供。电光调制器输出经一段约40 m长的光纤延迟和可凋衰减器将信号光衰减到离散光子序列状态,再入射到单光子探测器。该探测器输出经放大后由模-数采集卡进行数模转换,通过计算机中的软件程序进行阈值甄别

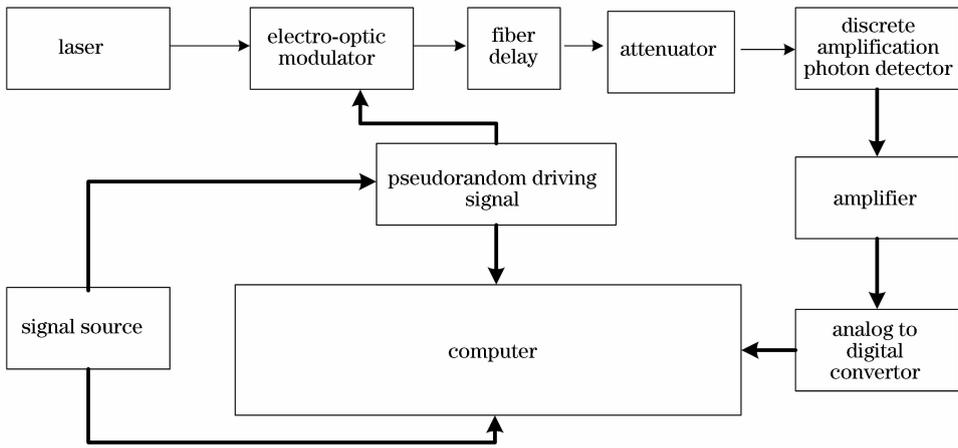
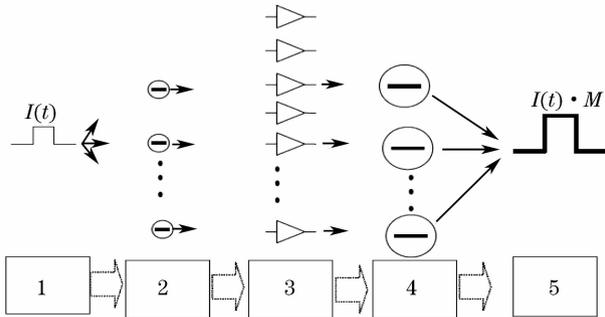


图 2 光纤激光测距实验系统框图

Fig. 2 Experimental schematic of laser range finder

和码元判定,判定后的码元和原始伪随机驱动码做互相关运算,相关峰值对应的时刻给出了目标距离导致的延时量,从而获取目标距离信息。信号源用于提供任意波形发生器和模-数采集卡的外触发信号,从而保障系统的同步性。

系统所用单光子探测器为一款离散放大光电探测器,该产品采用离散放大机制,即将探测器输出的  $N$  个光电子自动分开,让每个光电子进入单独的放大通道放大,  $N$  个光电子被分别放大后再汇合,原理图如图 3 所示<sup>[14]</sup>。该离散放大器用于单光子探测的优势在于,当一个入射光子转化为一个光电子时,该光电子可在任意一个放大通道发生雪崩放大作用;紧随该光电子的其他入射光电子可以选择其他的放大通道发生雪崩放大,无需等待之前光电子放大通道的后脉冲抑制时间。因此基于该探测机制的离散放大器可工作在连续状态下,能够满足系统探测速率大于等于 100 MHz 的要求。



1: current pulse of  $N$  electrons is divided into  
2:  $N$  separated electrons  
3:  $K > N$  of avalanche threshold amplifiers with gain  $M$   
4:  $N$  packages, each of  $M$  electrons  
5: sum of output signal consists of  $N \times M$  electrons

图 3 离散放大机制原理图

Fig. 3 Principle of discrete amplification mechanism

该离散放大光电探测器增益为  $10^5$ ,过剩噪声因子小于 1.05,上升、下降时间小于 500 ps。只需工作在连续的偏置电压下(非门控模式)即可以实现单光子量级的探测灵敏度。探测器工作在盖革模式下,室温环境,偏置电压 53 V,示波器显示的放大后单电子响应曲线如图 4 所示。可以看出单电子响应峰值为 1.54 V,半峰全宽(FWHM)为 614 ps。通过控制入射光功率,测量探测器的单光电子脉冲输出个数可测试系统暗计数及其量子效率。测量结果表明偏压 53 V 时,该离散放大光电探测器每秒暗计数为  $2.9 \times 10^6$  个,探测概率为 8.57%。

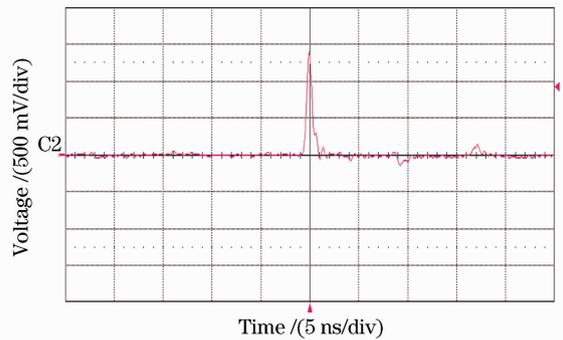


图 4 放大后的单电子响应效果

Fig. 4 Response effect of single electron after amplification

## 4 实验结果与性能分析

### 4.1 固定入射功率

利用 3 节的实验装置,当入射到单光子探测器的平均功率为 -81.6 dBm,偏压 53 V,伪随机码驱动序列为 13 阶 100 MHz 时,根据测得的暗计数及其量子效率可知室温情况下一个完整采样序列包含的信号光电子数为 362 个,噪声光电子数(包含暗计数)为 254 个,是信号光电子数的 70.2%。噪声和信

号光电子的唯一区别在于,噪声光电子会随机出现在任意码元位置,而信号光电子只会出现在出射码元为“1”的位置。所以当多次测量并对接收码元序列进行累加时,包含真实信号光电子码元对应的累加强度较只有暗计数的码元对应的累加强度要大。重复测量 15 次,并将每次测量判定后的码元序列叠加,叠加后的接收码元序列和原始驱动伪随机码序列的归一化互相关强度如图 5 所示。

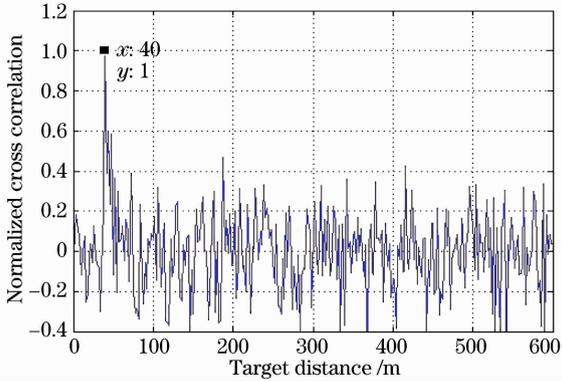


图 5 信号平均功率为-81.6 dB,调制速率 100 MHz,驱动 M 序列码 13 阶,累加 15 次的最终归一化互相关强度图  
Fig. 5 Normalized cross correlation signal after 15 times accumulation with the average signal power of -81.6 dBm, modulation ratio of 100 MHz, and 13 order driving M sequence serial

从图 5 可以看出,相关峰值对应的目标距离为 40 m,信噪比为 5(7 dB),从而通过实际实验有效证明了采用离散放大光电探测器作为单光子探测器的基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距技术方案的可行性。

#### 4.2 不同入射功率的系统性能及系统最小可探测功率

保持离散放大光电探测器的偏压为 53 V,电光调制器驱动码仍为 13 阶 100 MHz 的 M 序列码。将信号平均功率分别设定在 -78.6 dBm(13.8 pW), -81.6 dBm(6.92 pW) 及 -83.6 dBm(4.37 pW),在每种功率下均重复测量 15 次,并将每次测量判定后的码元序列叠加后与原始伪随机码序列做互相关运算,得到的系统信噪比和信号平均光功率的关系如图 6 所示。

图 6 采用对数坐标。可以看出系统信噪比和信号平均光功率基本满足线性关系。将系统的最小可探测功率定义为信噪比为 3 (4.77 dB) 时的信号平均功率。那么当偏压为 53 V,室温情况下,针对 13 阶 100 MHz 的伪随机码驱动序列,系统的最小可探测功率为 -83.6 dBm。

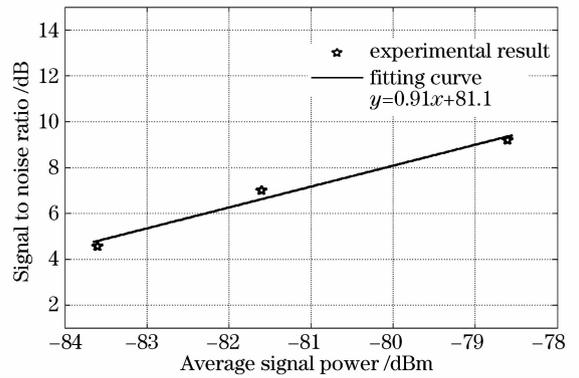


图 6 系统信噪比和信号平均功率的关系  
Fig. 6 Relation between system signal to noise ratio and signal average power

#### 4.3 不同序列长度

保持信号平均功率为 -83.6 dBm,离散放大光电探测器偏置电压 53 V,调制速率 100 MHz,将驱动 M 序列码的阶数分别设置为 14 阶,13 阶和 12 阶(即伪随机码序列长度分别为 163.83, 81.91, 40.95  $\mu$ s),在每种驱动序列长度下均重复测量 15 次,并将每次测量判定后的码元序列叠加后与原始伪随机码序列做互相关运算,得到的系统信噪比和伪随机码序列长度的关系如图 7 所示。

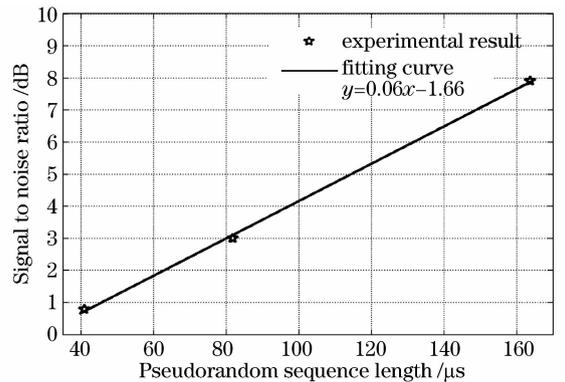


图 7 系统信噪比和伪随机码序列长度的关系  
Fig. 7 Relation between system signal to noise ratio and pseudorandom serial length

图 7 采用线性坐标。可以看出系统信噪比和伪随机码序列长度呈正比关系。为满足系统 1 kHz 的重复测量频率,当伪随机码调制速率为 100 MHz 时,允许的 M 序列码阶数 n 应满足  $(2^n - 1) \times 10 \text{ ns} < 1 \text{ ms}$ ,即最长的 M 序列码为 16 阶 M 序列码,序列长度为 655.35  $\mu$ s。

#### 4.4 系统测距精度

当信号平均功率 -78.6 dBm,调制速率 100 MHz,伪随机码序列长度 163.83  $\mu$ s 时(即采用 14 阶伪随机码序列),重复测量 15 次,并将每次测量

判定后的码元序列叠加, 叠加后的码元序列和原始伪随机码驱动序列做互相关运算得到的最终归一化互相关强度如图 8 所示。

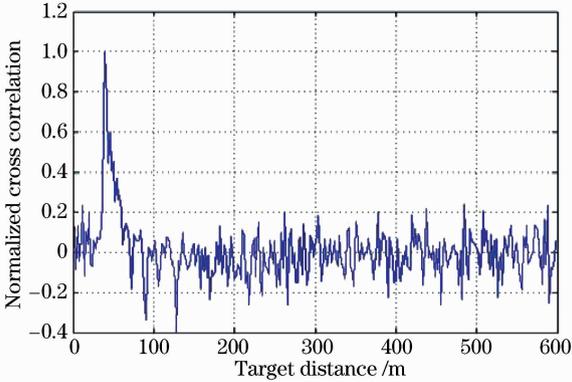


图 8 信号平均功率 -78.6 dBm, 100 MHz 调制速率, 驱动  $M$  序列码 14 阶, 累加 15 次的最终归一化互相关强度图  
Fig. 8 Normalized cross correlation signal after 15 times accumulation with the average signal power of -78.6 dBm, modulation ratio of 100 Hz, and 14 order driving  $M$  sequence serial

因为伪随机码码元宽度为 10 ns, 光纤中的传播速度为  $2 \times 10^8$  m/s, 所以对应的距离分辨率为 2 m。为获取距离精度, 系统采用质心法拟合目标对应的真实距离。首先从归一化互相关强度中获取目标距离的先验知识, 即目标位于第  $n$  个和第  $n+1$  个距离量化点之间; 其次计算归一化互相关强度在这两点的比值, 即  $\alpha = S(n+1)/S(n)$ ; 最后按照  $\Delta n = \alpha/(1+\alpha)$  获取真实目标距离量化点的小数部分。即真实目标距离为  $L_{dis} = (n + \Delta n) \times 2$  m。

在信号平均功率 -78.6 dBm, 调制速率 100 MHz, 调制序列长度 163.83  $\mu$ s (14 阶  $M$  序列码) 时, 以从重复测量 15 次并累加得到的归一化互相关强度图中提取的目标真实距离为一组测量数

表 1 GLAS 系统参数和根据实验结果反推的光纤激光测距系统星载参数对比

Table 1 Comparison of the GLAS system parameters and the deduced spaceborne parameters based on experiment results

	GLAS	Fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting	Difference analysis
Type of laser	All solid state Nd:YAG laser	Fiber laser	
Peak power	$15 \times 10^6$ W	33.7 W	-56.50 dB
Pulse length	5 ns	600 $\mu$ s	+50.79 dB
Pulse energy	75 mJ	20.2 mJ	27%
Pulse repeat frequency	40 Hz	1000 Hz	25 $\times$
Optical power	3 W	20.2 W	6.7 $\times$
Electro optic efficiency	5%	20%	4 $\times$
Electric power	60 W	101 W	1.7 $\times$
Telescope aperture	1000 mm	1000 mm	
Orbit altitude	600 km	600 km	

据, 重复测量得到 22 组目标距离数据如图 9 所示。

统计结果表明目标距离平均值为 40.95 m, 均方差为 12.7 cm, 即测距精度为 12.7 cm。

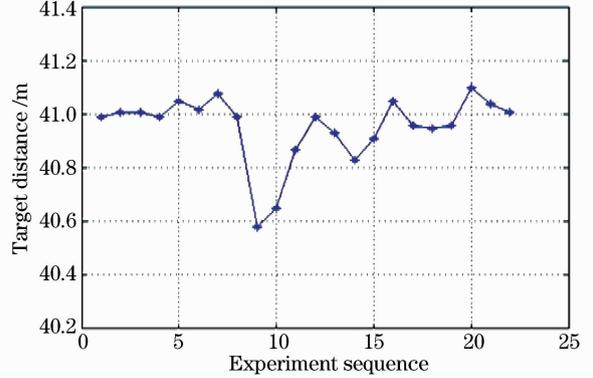


图 9 重复测量 22 次测得的目标距离  
Fig. 9 Target distances of 22 times measurement

## 5 与理论分析的结果对比及其星载应用的可行性

目前系统能够在常温情况下, 离散放大器偏置电压 53 V, 伪随机码序列长度 81.91  $\mu$ s 时, 以 3 倍的信噪比探测 -83.6 dBm 的信号平均功率。这较文献[13]的理论优化结果差 12 dB。导致这 12 dB 差异的主要原因是 1550 nm 离散放大光电探测器每秒高达  $2.9 \times 10^6$  的暗计数以及量子效率低于仿真设置的 20%。如果采用热电制冷的方式, 将探测器光敏面的温度由室温降至 -30  $^{\circ}$ C, 每秒暗计数可降至 64000 个, 在现行实验条件下, 采用泊松分布理论, 即使单次测量, 也可获得近 20 倍的信噪比, 此时系统和理论优化结果的差异由 12 dB 降至 3.7 dB。

因此依据当前实验装置的探测灵敏度及其探测器能够达到的暗计数水平, 可以预测在星载条件下, 采用表 1 中的技术参数, 系统可以 10 dB 信噪比实现

600 km处的测高功能,且测高重复频率可达1000 Hz。表1为GLAS系统参数和根据实验结果反推的基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距系统星载参数的对比。将此套系统参数与2003年美国发射的采用传统脉冲激光测距方法的GLAS激光高度计参数做比较,可以看出,本套系统工作在低峰值功率宽脉冲宽度情况下,缓解了激光器的压力;并且利用光纤激光器的高效优势,在光功率增加到6.7倍,而电功率仅增加到1.7倍的情况下,却可以获得25倍的空间分辨率。充分显示了基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距机制较传统脉冲测距机制在远距离探测方面的优势。如果换用其他材料的探测器,例如硅探测器,那么每秒暗计数可进一步降低至每秒100个,测量信噪比可进一步提升,更能体现该测量机制的优越性。

## 6 结 论

使用离散放大光电探测器,搭建了一套基于伪随机码调制和单光子计数的1550 nm光纤激光测距系统。在偏置电压53 V,常温,伪随机码序列长度81.91  $\mu\text{s}$ 时,能够实现-83.6 dBm的最小可探测功率;系统信噪比和信号光功率及伪随机码序列长度呈正比关系,在信号平均光功率-78.6 dBm,伪随机码序列长度163.83  $\mu\text{s}$ 时,系统测距精度可达12.7 cm。通过和GLAS系统参数的对比,显示该套系统在空间应用的广阔前景。且该套系统为直接探测系统,结构简单、操作便利、对环境敏感程度低,可应用于探测所有星球。当然基于全光纤回路来推算该系统的性能,诸多假设还比较理想化,实际应用时,光学系统的对准误差、大气衰减、望远镜接收耦合效率都会影响系统性能。好在目前光纤激光器输出功率已经大幅提高,1 m以上星载望远镜也可实现,另外在探测模式上也可采用多孔径、阵列探测,因此可以通过提高发射、接收的规模来弥补,从而达到系统的预期性能。

## 参 考 文 献

- 1 Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing *et al.*. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1):19~25  
伯广宇,刘 博,钟志庆等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):19~25
- 2 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2):315~320  
董云升,刘文清,刘建国等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2):315~320
- 3 Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7):1721~1725  
袁 林,刘 博,王邦新等. 车载式1064 nm米氏散射激光雷达的研制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7):1721~1725
- 4 J. B. Abshire, Xiaoli Sun, H. Riris *et al.*. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICES at mission: pre-launch and on-orbit performance [C]. IGARSS, 2003, **3**:1534~1536
- 5 Stewart Nozette, P. Rustan, L. P. Pleasance *et al.*. The clementine mission to the moon: scientific overview [J]. *Science*, 1994, **266**(5192):1835~1839
- 6 W. Chen, X. Hou, J. Bi *et al.*. Solid-state laser for laser altimeter in Chang'E lunar explorer [C]. CLEO, Baltimore, MD, USA, Aug. 2007. 1~2
- 7 Robert S. Afzal. Mars observer laser altimeter: laser transmitter [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15):3184~3188
- 8 John J. Degnan. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. *J. Geodyn.*, 2002, **34**(3-4):503~549
- 9 Christopher T. Allen, Sek Ken Chong. Development of a 1319-nm Laser Radar Using Fiber Optics and RF Pulse Compression [R]. Information and Telecommunication Technology Center, Kansas, 2002. ITTC-RSL-FY2002-TR-18680-01
- 10 N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba *et al.*. Random modulation cw lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9):1382~1386
- 11 James B. Abshire, Xiaoli Sun, Michael A. Krainak. Laser altimetry using pseudo-noise code modulated fiber lasers and photon counting detectors [C]. CLEO, Baltimore, MD, USA, 2005, **3**:1991~1993
- 12 Xiaoli Sun, James B. Abshire, Michael A. Krainak *et al.*. Photon counting pseudorandom noise code laser altimeters [C]. *SPIE*, 2007, **6771**:677100
- 13 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua *et al.*. Simulation of spaceborne 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 K. Linga, E. Godik, E. V. Levin *et al.*. Bio-sensing: the use of a novel sensitive optical detector [C]. *SPIE*, 2005, **6083**:60830F