

基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统

杨芳^{1,2,3} 张鑫^{1,3} 贺岩^{1*} 陈卫标¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)
²上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090; ³中国科学院大学, 北京 100049)

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,采用不同的伪随机码,在光纤延时的方法下开展了基于不同伪随机码调制的测距实验并与 M 序列伪随机码进行对比。结果表明在相同的入射条件下, M 序列伪随机码具有更好的信噪比和测距精度。搭建了实际测距平台并开展了室外测距实验,在 10 阶 M 序列伪随机码, 1 GHz 调制速率,发射光输出峰值功率 12.1 W,测量 768.5 m 远的目标时,得到 3.2 cm 的测距精度。

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

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0614003

Fiber Laser Ranging System Based on Different Pseudorandom Code Modulation

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

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²School of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Different pseudorandom codes are adapted in laser ranging system based on high modulation rate and photon counting technology. Ranging performance is compared and demonstrated between different pseudorandom codes and M sequence using fiber delay method of ranging experiments. Under the same incident condition, better signal of noise ratio and ranging accuracy are acquired when using M sequence. The actual ranging platform is established and ranging experiment outdoor is carried out. Ranging accuracy of 3.2 cm is obtained when the laser transmit to a target which distance is about 768.5 m under the condition of the transmitter peak power of 12.1 W, 10 order M pseudorandom sequence and 1 GHz modulation rate.

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

OCIS codes 280.3400;030.5260;350.60901

1 引言

激光高度计广泛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,均采用传统的脉冲直接测距方法^[1-6]。激光高度计的光源大多采用高能窄脉冲 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲激光器的重复频率在 40 Hz 以下^[7]。为了获得高分辨率的

距离信息和三维图像,需要提高激光脉冲的重复频率和测量密度。在大气探测中广泛使用的伪随机码调制的激光测距方式^[8-12]将连续光源通过伪随机码进行调制,以脉冲串的形式发射,降低了系统对峰值功率的要求,提高了测距的重复频率。美国国家航空航天局(NASA)空间飞行中心早在 2005 年就

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-04-03

基金项目: 中国科学院支撑技术项目(61501010304)

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.shnc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: heyang@siom.ac.cn

进行了一系列的测距实验,提出了基于单光子计数的伪随机码调制技术在未来空间激光高度计测距方面的应用前景^[13-15]。德国的赫瑞瓦特(Heriot-Watt)大学在测距和三维成像的应用中用这种方法解决距离模糊的问题,得到了厘米量级的测距精度^[16]。在这些测距系统中,多采用 M 序列伪随机码,因为其易于产生的特点已被广泛用于通信波段。另外也有测距系统中采用其他的伪随机码,如用A1和A2序列进行云雾测量的仿真^[12]、用二次剩余序列(QRS)进行远距离测量^[17]等。为了比较不同伪随机码的测距特性,采用了4种常用的伪随机码,经过光纤延时衰减实验与 M 序列进行比较。结果表明在相同的实验条件下, M 序列伪随机码测距具有更高的测距精度和信噪比(SNR),更适用于伪随机码调制测距系统。

实验室在最初的工作中搭建了一套验证实验系统^[18]。对1550 nm光纤激光器输出的信号光通过13阶 M 序列伪随机码、100 MHz的速率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,对系统进一步改进,将信号光的调制速率进一步提高到622 MHz^[19]和1 GHz^[20]并采

用制冷型的低噪声单光子探测器^[19],在入射至探测器的信号光能量相同的情况下进行光纤延时衰减实验,证明了在高调制速率下系统可得到更高的信噪比和测距精度^[20]。本文搭建了实际测距平台,种子光经过10阶 M 序列伪随机码、1 GHz速率的调制后,由光纤放大系统放大到12.1 W的峰值功率后发射,采用多模耦合的单光子探测器接收回波信号,在测量距离约为768.5 m时得到3.2 cm的测距精度,该结果进一步为系统星载应用的可行性提供了实际测距的参考依据。

2 测距原理及实验装置

在伪随机码调制测距系统中,通常用电光调制器根据信号发生器生成的伪随机码序列对激光器进行调制的方法得到测距光源^[18]。本文采用自制的电路模块对半导体激光器进行1 GHz的高速伪随机码调制后作为信号光输出,信号光经光纤延迟后可调光衰减器衰减至光子序列状态后进入到单光子探测器,示波器采集探测器输出的脉冲信号。计算机完成对脉冲信号的阈值判决和相关运算,根据相关运算峰值位置的偏移量确定出目标距离。系统实验装置原理框图如图1所示。

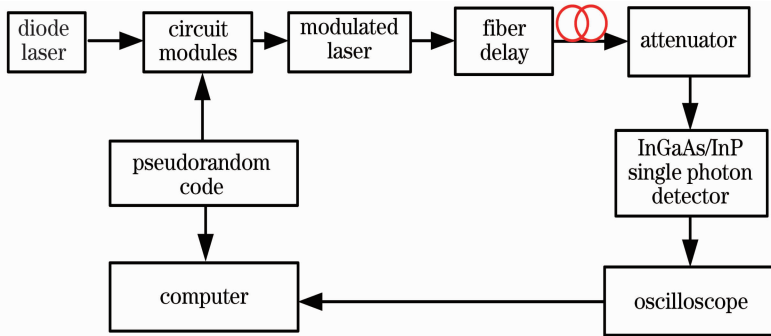


图1 实验装置原理框图

Fig. 1 Experimental system schematic diagram

采用四种不同的伪随机码:A1序列、A2序列、Gold序列和二次剩余(QRS)序列。A1和A2序列是以 M 序列为基础产生的^[12],若选用 n 阶 M 序列, M 序列的长度 $N=2^{n-1}$,则A1和A2序列的长度分别是 $2N$ 和 $4N$,两个序列的特点是“0”和“1”的个数相同。本文以10阶 M 序列为基础产生的A1和A2序列的长度分别是2048和4096;平衡Gold序列是在扩频通信中广泛使用的一种伪随机码,具有较好的自相关、互相关特性^[21],由 M 序列优选对构成。序列的特点是“1”的个数比“0”的个数多1。本文通过 M 序列优选对构成10阶和11阶的平衡

Gold序列,序列长度分别为1023和2047;QRS序列适用于码长较长的场合^[17],本文生成了长度为8191的QRS序列与13阶 M 序列进行比较。

3 不同伪随机码序列的测距实验结果对比

将不同伪随机码序列在同样的1 GHz速率调制下的信号光经过约3 m的光纤延时后,通过可调光衰减器衰减后进入到单光子探测器,由示波器采集探测器输出的脉冲信号。通过计算机软件对脉冲信号进行阈值鉴别后获得回波信号序列(“0”、“1”数

字序列),累加 10 次后与原始伪随机码序列进行互相关运算,得到归一化的互相关结果,对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。

3.1 不同伪随机码序列的测距信噪比对比

3.1.1 10 阶 Gold 序列和 10 阶 M 序列比较

10 阶 Gold 序列和 M 序列的长度均为 1023,从图 2 上可以看出,M 序列的信噪比要高于 Gold 序列。

3.1.2 A1 序列、11 阶 Gold 序列和 11 阶 M 序列比较

图 3 中显示 A1 序列、11 阶 Gold 序列和 M 序列的信噪比分别为 19.2 dB、19.9 dB 和 20.8 dB,显

然 M 序列的信噪比要优于其他两种序列。

3.1.3 A2 序列和 12 阶 M 序列比较

图 4 显示的是长度为 4096 的 A2 序列与 12 阶 M 序列的归一化相关图,可以看出 M 序列具有更好的信噪比。

3.1.4 QRS 序列和 13 阶 M 序列比较

图 5 中 M 序列的信噪比比 QRS 序列高约 1 dB.因此,在相同的人射条件下,通过不同伪随机码与 M 序列在光纤内延迟衰减后的相关图对比得出,M 序列具有更高的信噪比。

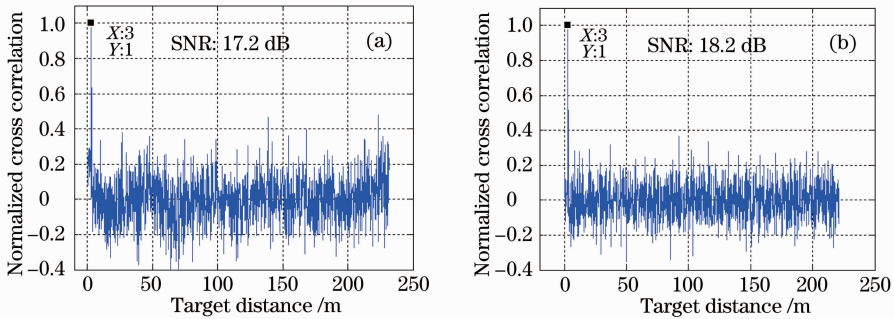


图 2 累加 10 次后的归一化相关图。(a)10 阶 Gold 序列;(b) 10 阶 M 序列

Fig. 2 Normalized cross correlation after 10 times accumulation. (a) 10 order Gold sequence; (b) 10 order M sequence

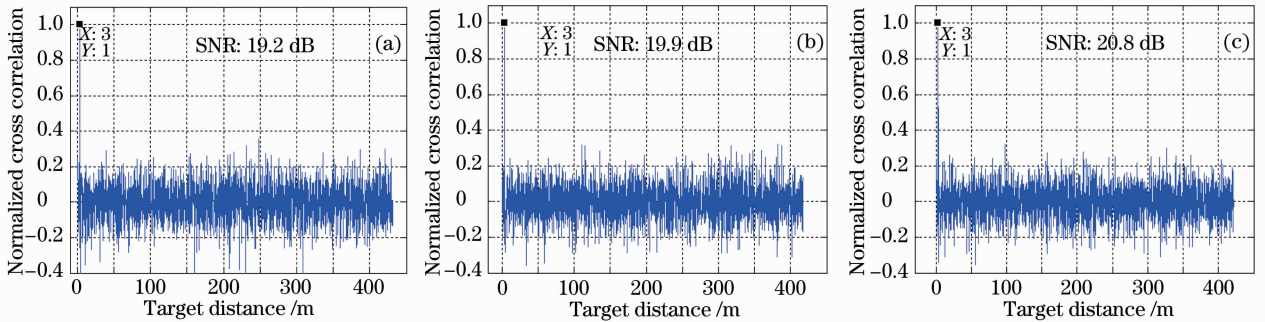


图 3 累加 10 次后的归一化相关图。(a) A1 序列;(b) 11 阶 Gold 序列;(c) 11 阶 M 序列

Fig. 3 Normalized cross correlation after 10 times accumulation. (a) A1 sequence; (b) Gold sequence; (c) 11 order M sequence

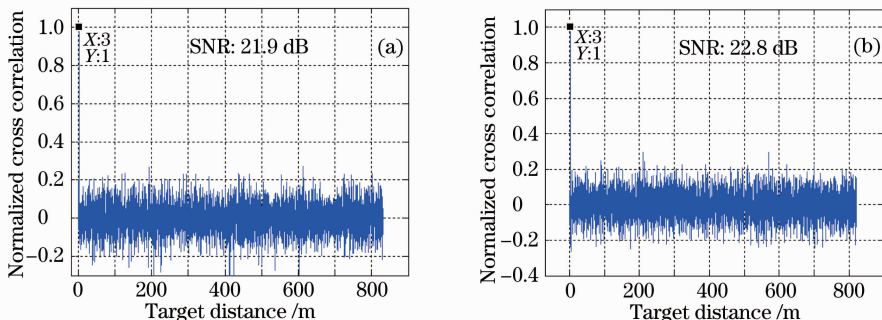


图 4 累加 10 次后的归一化相关图。(a) A2 序列;(b) 12 阶 M 序列

Fig. 4 Normalized cross correlation after 10 times accumulation. (a) A2 sequence; (b) 12 order M sequence

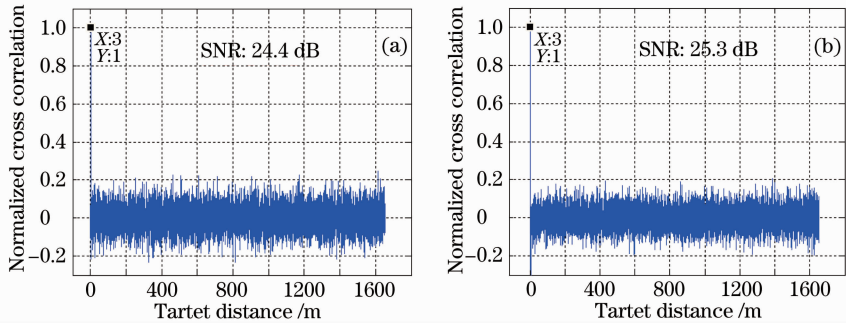


图 5 累加 10 次后的归一化相关图。(a) QRS 序列；(b) 13 阶 M 序列

Fig. 5 Normalized cross correlation after 10 times accumulation. (a) QRS sequence; (b) 13 order M sequence

3.2 不同伪随机码序列的测距精度对比

在每个伪随机码序列下重复光纤延时衰减实验 100 次,每 10 次累加得到一个距离值,经过质心拟合算法得到较准确的距离值,并计算出对应的测距精度。不同伪随机码序列的测距精度对比如图 6 所示。

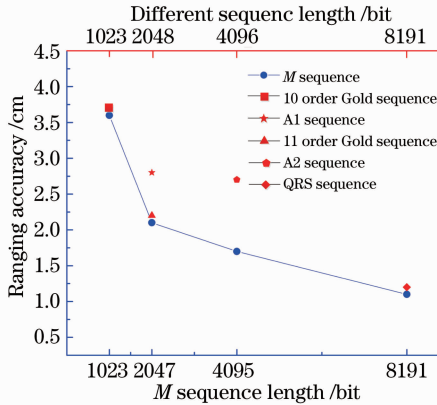


图 6 不同伪随机码序列与 M 序列的测距精度对比

Fig. 6 Ranging accuracy comparison between different pseudorandom sequences and M sequence

从图 6 中可以看出,不同伪随机码的测距精度均低于对应码长的 M 序列。图中的结果还显示出随着 M 序列码长的增加,测距精度也在增加。由测距精度的理论计算公式 $\sigma = \Delta d / \sqrt{R_{SN}}$ 可知,距离分

辨率和信噪比越高,测距精度越高。在调制速率为 1 GHz 的情况下,光纤内的距离分辨率均为 20 cm,因此测距精度与信噪比成反比,与实验结果吻合。

仅从测距结果的信噪比和测距精度分析, M 序列伪随机码的测距性能明显优于其他的伪随机码。另外,从伪随机序列的生成条件来说,A1、A2 和 Gold 序列均需在 M 序列的基础上产生,生成条件复杂;而 QRS 序列的构成也需要满足一定的条件。因此基于多个因素考虑本实验室测距系统中选择 M 序列伪随机码。

4 实外测距实验结果及分析

4.1 室外测距实验装置

搭建了室外测距实验系统,系统结构框图如图 7 所示。采用 10 阶 M 序列伪随机码,对半导体激光器进行 1 GHz 的高速调制后,作为伪随机码测距的种子光。种子光经 MOPA 结构的光纤放大器放大得到 12.1 W 的峰值功率后输出。通过一个 1:99 的光纤分束器,将 1% 的信号光输入到一个 1 GHz 带宽的雪崩管探测器 (APD),APD 输出的脉冲信号作为测距的触发信号;99% 的信号光作为测距信号光水平出射。发射和接收望远镜同轴,接收望远镜

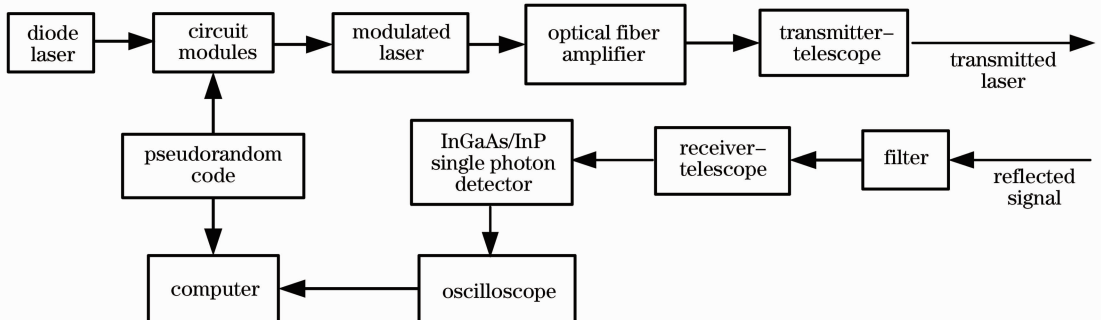


图 7 室外测距实验框图

Fig. 7 Block diagram of the experimental setup outdoor

的口径是 50 mm。从目标返射回的信号光经接收望远镜接收后首先由带宽为 10 nm, 波长为 1550 nm 的滤光片滤波后进入到单光子探测器, 由示波器采集探测器输出的脉冲信号, 计算机软件对探测器脉冲回波信号的处理方法与光纤延时衰减实验相同。

实验室之前的测距系统中采用的是单模光纤耦合的单光子探测器^[19], 光敏面较小, 耦合效率较低, 虽然探测器的暗计数较小, 但是探测器整体的接收效率较低。为了提高接收效率, 系统采用多模光纤耦合输入的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管单光子探测器, 其有效接收光敏面和多模光纤耦合口径分别为 40 μm 和 62.5 μm , 均较单模光纤耦合的单光子探测器有了较大提高, 从而可以有效地提高探测器的接收效率, 因此能在同等条件下实现更远距离的测量。探测器工作在盖格正弦波门模式下, 与单模耦合的单光子探测器的工作电路原理一致^[19]。探测器输出的脉冲波形如图 8 所示, 从图中可以看出, 探测器的输出脉冲宽度约为 10 ns, 经测试, 暗计数为 30 kHz, 探测效率为 10%。

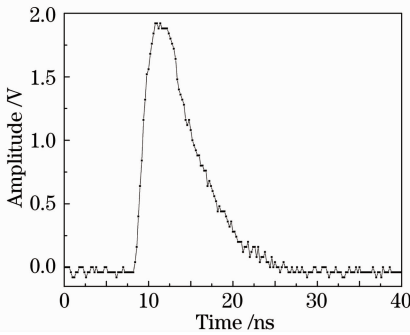


图 8 单光子探测器输出脉冲波形

Fig. 8 Output pulse waveform of the single photon detector

4.2 室外测距实验结果

实验在晚上进行, 能有效降低背景噪声对系统性能的影响。信号光经发射望远镜照射到远处目标, 探测器接收到的目标回波信号用示波器采集后由计算机软件经过阈值鉴别后与原始伪随机码序列相关, 得到归一化的测距结果如图 9 所示。

由图 9 中看出, 目标距离约为 768.5 m, 经计算得到系统的信噪比为 15 dB。对所测量的数据进行质心拟合算法后得到 11 个实际距离值如图 10 所示。通过计算得到测距精度为 3.2 cm。该测距结果为后续远程测距和三维成像研究提供了技术参考。

后续工作将继续提高输出信号功率并采用更高阶数的伪随机码序列, 这将进一步提升测距性能。另外考虑进一步完善回波信号接收和数据处理模

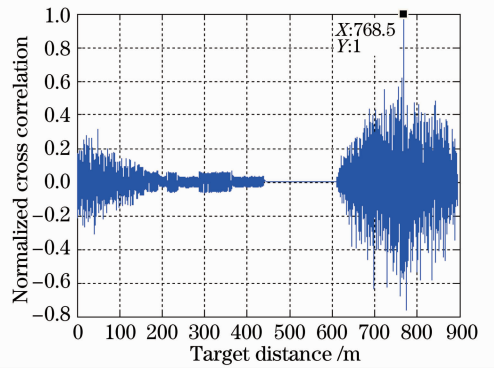


图 9 10 阶 M 序列伪随机码, 1 GHz 调制速率, 发射信号光峰值功率为 12.1 W 下的室外测距结果

Fig. 9 Ranging results outdoor with 10 order M sequence pseudorandom code, 1 GHz modulation rate and peak signal power of 12.1 W

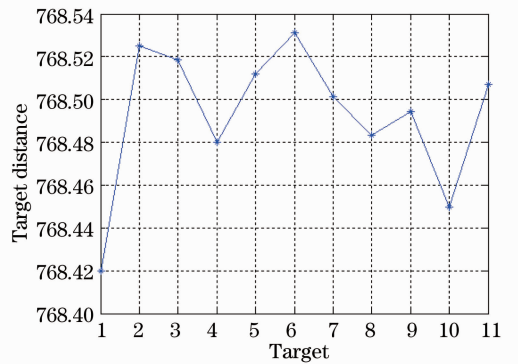


图 10 重复测量得到的 11 个目标距离

Fig. 10 11 target distances of multi-measurement

块, 由现场可编程逻辑器件 (FPGA) 电路模块完成对探测器输出脉冲信号的阈值鉴别、数字量转化和互相关运算, 直接得到距离信息, 以实现实时测距和三维成像。

5 结 论

采用 4 种不同的伪随机码进行光纤延时衰减实验, 结果表明在相同的入射条件下, M 序列伪随机码具有更好的测距性能。改进实验系统, 采用多模耦合的单光子探测器, 搭建了实际测距平台; 在 10 阶 M 序列伪随机码, 1 GHz 调制速率下, 发射光输出峰值功率为 12.1 W, 测量 768.5 m 远的目标时, 得到 3.2 cm 的测距精度, 结果表明该系统具有远程测距的潜力。若能进一步提高信号光功率、扩大望远镜口径并采用更高阶数的伪随机码, 该套系统将在远程高性能的空间探测方面有广阔的应用前景。

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的团队提供

的在单光子探测器方面的技术支持。

参 考 文 献

- 1 Afzal R S, Yu A W, Melek A, *et al.*. The geoscience laser altimeter system (GLAS) laser transmitter[J]. *IEEE J 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]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2007. ThG1-4.
- 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]. *Appl Opt*, 2005, 44(9): 1748—1760.
- 5 Afzal R S. Mars observer laser altimeter: laser transmitter[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(15): 3184—3188.
- 6 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 候霞, 周翠云. 星载激光测高技术发展现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020006.
- 7 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.
- 8 Takeuchi N, Sugimoto N, Baba H. Random modulation cw lidar [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(9): 1382—1386.
- 9 Norman D M, Gardner C S. Satellite laser ranging using pseudonoise code modulated laser diodes[J]. *Appl Opt*, 1988, 27(17): 3650—3655.
- 10 Rall J A R, Abshire J B, Manizade S S. Lidar Measurements of clouds and aerosols using AlGaAs lasers modulated with pseudorandom codes [J]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 1992. 206—207.
- 11 Matthey R, Mitev V. Pseudo-random noise-continuous-wave laser radar for surface and cloud measurements[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2004, 43(3~5): 557—571.
- 12 Y Emery, C Flesia. Use of the A1- and the A2-sequences to modulate continuous-wave pseudorandom noise lidar [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(12): 2238—2241.
- 13 Sun X L, Abshire J B, Krainak M A, *et al.*. Photon counting pseudorandom noise code laser altimeters [C]. *SPIE*, 2007, 6771: 67710O.
- 14 Abshire J B, Sun X L, Krainak M A. Laser altimetry using pseudo-noise code modulated fiber lasers and photon counting detectors [C]. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2005. JTh4.
- 15 Sun X L, Abshire J B. Modified PN code laser modulation technique for laser measurements [C]. *SPIE*, 2009, 7199: 71990P.
- 16 Krichel N J, McCarthy A, Buller G S. Resolving range ambiguity in a photon counting depth imager operating at kilometer distances[J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9192—9206.
- 17 James Murray, Joseph Triscari, Gregory Fetzer, *et al.*. Tomographic lidar[C]. *Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications*, 2010. LSWA1.
- 18 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.
- 19 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.
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.
- 20 Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.*. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3234—3238.
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 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[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3234—3238.
- 21 Li Ting, Sun Jiaoyan. Research on the qualification of generating balance Gold sequences[J]. *J Dalian Maritime University*, 2006, 32(2): 93—95.
李婷, 孙娇燕. 平衡 Gold 序列的生成条件[J]. *大连海事大学学报*, 2006, 32(2): 93—95.

栏目编辑: 何卓铭