

# 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距技术研究

邱子胜, 杨馥, 叶星辰, 李姝欣

东华大学理学院, 上海 201620

**摘要** 为实现远距离高精度激光测距,提出了一种联合利用伪随机码相位调制和相干探测技术的激光测距方法,并搭建实验验证平台对自由空间目标进行了测试。当激光出射功率为 2.0 mW、参考光功率为 117.8  $\mu$ W、调制速率为 100 MHz、单周期内伪随机码序列长度为 81.9  $\mu$ s、望远镜接收口径为 2 cm 时,该系统可对 8 m 处的自由空间目标实现 11.8 cm 的测距精度。实验证实了该套技术方案的可行性。将此实验结果反推至星载条件,并与 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 系统参数进行对比发现,该系统工作在低峰值功率、长脉冲宽度状态下,故可实现高重复频率探测。

**关键词** 测量; 激光测距; 伪随机码; 相位调制; 相干探测; 测距精度

中图分类号 TN959.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.052801

## Research on Laser Ranging Technology Based on Pseudo-Random Code Phase Modulation and Coherent Detection

Qiu Zisheng, Yang Fu, Ye Xingchen, Li Shuxin

College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract** In order to realize high precision long-distance laser ranging, a laser ranging method based on the techniques of pseudo-random code (PRC) phase modulation and coherent detection is proposed. An experiment system for the free space target detection is set up. When laser outputs power, local oscillator power, modulation rate, PRC sequence length in a single cycle and telescope aperture are respectively 2.0 mW, 117.8  $\mu$ W, 100 MHz, 81.9  $\mu$ s and 2 cm, the system can achieve a ranging accuracy of 11.8 cm for the free space target located in about 8 m far away. The experimental results prove the feasibility of the proposed method. The experimental results are back-propelled to the spaceborne conditions and compared with the GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) system parameters. The comparison results show that the system operates under lower peak power and longer pulse width conditions, so high-frequency detection can be achieved.

**Key words** measurement; laser ranging; pseudo-random code; phase modulation; coherent detection; ranging accuracy

**OCIS codes** 280.3400; 060.5060; 030.1670; 220.4830

## 1 引言

与传统微波雷达相比,激光雷达系统具有高方向性、强抗干扰能力、高测量精度、高时空及垂直分辨率等优点,目前已广泛应用于三维成像、星地同步观测、深空探测和自主安全着陆等领域<sup>[1-4]</sup>。随着激

光器和光电器件性能的不提高,应用于获取行星表面形貌、卫星姿态和定位信息的星载激光测距技术发展迅速<sup>[5]</sup>。1994年,美国向月球发射了无人导航航天器 Clenmentine<sup>[6]</sup>。该载荷搭载的激光高度计采用全固态 Nd:YAG 激光器作为光源,单脉冲能量为 200 mJ,脉冲重复频率为 1 Hz,在 640 km 的

收稿日期: 2017-09-26; 收到修改稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61108067)、东华大学励志计划

作者简介: 邱子胜(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: 867120098@qq.com

导师简介: 杨馥(1983—),女,博士,副教授,主要从事光电检测技术方面的研究。

E-mail: fuyang@dhu.edu.cn(通信联系人)

轨道高度提供了一幅从月球南纬  $60^\circ$  到北纬  $60^\circ$  的月形图。1996 年美国航空航天局 (NASA) 成功发射了“火星全球勘测者”(MGS)。该飞行器搭载了用于探测火星表面形貌的激光高度计 (MOLA), 采用的激光光源波长为 1064 nm, 激光单脉冲能量为 40 mJ, 脉冲宽度 8 ns, 发射频率为 10 Hz, 在 400 km 的轨道高度成功获取了火星表面形貌<sup>[7]</sup>。2003 年美国发射 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), 其轨道高度为 600 km, 采用脉冲能量为 70 mJ, 脉冲宽度为 4 ns, 脉冲重复频率为 40 Hz 的激光光源, 用于测量全球冰层<sup>[4]</sup>。2007 年日本发射了探月卫星月亮女神 SELENE, 该卫星携带的激光高度计 (LALT) 轨道高度为 100 km, 单脉冲能量为 100 mJ, 脉冲宽度为 5 ns, 脉冲重复频率为 1 Hz, 实现了 1 m 的测距分辨率<sup>[8]</sup>。2013 年嫦娥三号搭载的激光有效载荷探测距离约为 50 km, 脉冲能量为 200 mJ, 脉冲重复频率为 10 Hz, 获取的距离测量精度优于 0.2 m, 并成功实现了在月球表面软着陆<sup>[9]</sup>。

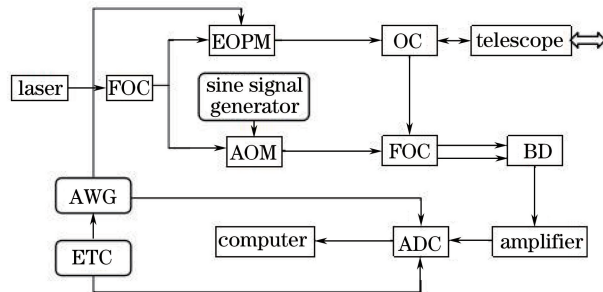
已发射的所有星载激光高度计载荷均采用了脉冲飞行时间测量法。该方法的优点是结构简单、技术成熟; 不足之处在于远距离模式下激光器工作在高峰值功率、低重复频率状态下, 导致测量的空间分辨率较低。在此背景下, 相继推出一些

新型的激光测距技术。例如相位/调频激光雷达系统利用脉冲压缩技术的基本原理提高距离分辨率<sup>[10]</sup>; 单光子测距技术通过使用单光子探测器使系统灵敏度达到单光子量级, 从而有效降低脉冲能量<sup>[11-12]</sup>。互补码对的非相干压缩测距技术对相位不敏感, 同时能抑制强的信号旁瓣<sup>[13]</sup>。此外, 还有一些其他技术, 如基于光子计数测距, 步进调频的稀疏重建, 基于啁啾调幅的相干测量机制等<sup>[14-16]</sup>。

本文同时采用伪随机码 (PRC) 相位调制和相干探测的激光测距技术, 利用伪随机码调制技术, 使系统在宽脉宽情况下也能获取高的距离分辨率, 利用相干探测技术提高系统灵敏度。基于此原理搭建了实验系统, 利用该技术在自由空间实现了较高的测距精度, 为远距离的激光测距技术开辟了一条新途径。

## 2 基本原理

基于伪随机码相位调制和相干探测的激光雷达测距系统结构图如图 1 所示, 激光经耦合器分成两部分。其中绝大部分通过电光相位调制器按照伪随机码信号进行相位调制, 并作为出射激光由望远镜发射出去; 另一部分通过声光调制器进行移频, 作为相干探测的本振信号光。



FOC: fiber optical coupler; EOPM: electro-optical phase modulator;  
AOM: acoustic optical modulator; OC: optical circulator; BD: balanced detector;  
ADC: dual channel AD card; AWG: arbitrary waveform generator; ETC: external trigger circuit

图 1 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距系统原理图

Fig. 1 Schematic of the laser ranging system based on the PRC phase modulation and coherent detection

伪随机码可表示为

$$C_R(t) = \sum_{n=1}^N a_n p(t - n \times \Delta t), \quad (1)$$

式中:  $a_n$  为 0 和 1 组成的伪随机码序列, 两个数值的取值概率均为  $1/2$ ;  $n$  的取值为 1 到  $N$  (总码元数) 之间的整数<sup>[16]</sup>;  $\Delta t$  为伪随机码宽度,  $\Delta t = 1/F$ ,  $F$  为相位调制速率;  $p(t)$  为门函数, 当  $|t| \leq \Delta t/2$  时取值为 1, 反之为 0。伪随机码由任意波形发生器

(AWG) 提供。

激光经过伪随机码驱动的电光相位调制器调制后, 出射信号可表示为

$$S_1 = A_F \cos [\omega_c + C_R(t)\pi + \varphi_1], \quad (2)$$

式中:  $A_F$  为出射激光的振幅;  $\omega_c$  为激光载频;  $\varphi$  为随机相位。接收望远镜和发射望远镜为同一望远镜, 收发同轴便于调节, 望远镜接收的回波信号携带了目标距离信息, 目标距离为  $R$ , 在不考虑多普勒频

移的情况下,回波信号可表示为

$$S_2 = A_T \cos [\omega_c(t - 2R/c) + C_R(t - 2R/c)\pi + \varphi_2], \quad (3)$$

式中: $A_T$  为回波信号光的振幅。 $A_T = \sqrt{P_{\text{sig}}}$ ,  $\sqrt{P_{\text{sig}}}$  为回波信号光峰值功率,可根据文献[17]中式(2.2.6)的激光雷达方程求得。

另一分路的激光本振信号经声光调制器移频  $f_m$  后为

$$S_{LO} = A_{LO} \cos [(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_3], \quad (4)$$

式中: $A_{LO}$  为本振信号光的振幅,  $A_{LO} = \sqrt{P_{LO}}$ ,  $P_{LO}$  为本振信号光功率; $\omega_m = 2\pi f_m$ 。回波信号与本振信号在耦合器中相干,经平衡探测器后输出信号为

$$S = \eta A_T A_{LO} \cos [\omega_m(t - 2R/c) + C_R(t - 2R/c)\pi + \varphi_4], \quad (5)$$

式中: $\eta$  为系统的相干效率; $c$  为真空中的光速。

由(5)式可知,经过伪随机码相位调制后的相干信号为一列相位不连续的余弦信号。由于  $C_R(t - 2R/c)\pi$  为一系列 0 和  $\pi$  的序列,即(5)式中频率为  $\omega_m$  的余弦信号带有相位  $\pi$  的随机变化,根据余弦信号特性,可将  $S$  信号简化为

$$S = \eta A_T A_{LO} \times \cos [\omega_m(t - 2R/c) + C_R(t - 2R/c)\pi + \varphi_4] = \eta A_T A_{LO} C'_R(t - 2R/c) \times \cos [\omega_m(t - 2R/c) + \varphi_4], \quad (6)$$

式中: $C'_R(t) = \sum_{n=1}^N b_n p(t - n \times \Delta t)$ ,  $b_n$  取值 -1 或 1,分别对应于  $a_n$  取值 1 或 0。

平衡探测器的输出信号经过双通道数模采集卡(ADC)中的通道 1 采集,ADC 另一通道采集伪随机码驱动信号。为保证系统的同步性,外部触发电路(ETC)将同时给 ADC 和任意波形发生器提供触发信号。采集的两路信号在计算机进行信号处理,主要方法为电光相位调制器驱动信号依次移位,并与相干信号相乘并作傅里叶变换(FFT):

$$Y = \text{abs}\{\mathcal{F}[y(t)]\} = \text{abs}\{\mathcal{F}[S \times C'_R(t - n\Delta t)]\} = \text{abs}\{\mathcal{F}[\eta A_T A_{LO} C'_R(t - 2R/c) \times \cos [\omega_m(t - 2R/c) + \varphi_4] \times C'_R(t - n\Delta t)]\}, \quad (7)$$

式中: $\text{abs}(\ast)$  表示取绝对值。图 2 分别给出了经伪随机码 0、1 序列相位调制  $\pi$  的余弦信号与  $C'_R(t)$  序列在延迟匹配与不匹配时的相乘效果图,即(7)式中的  $y$ 。

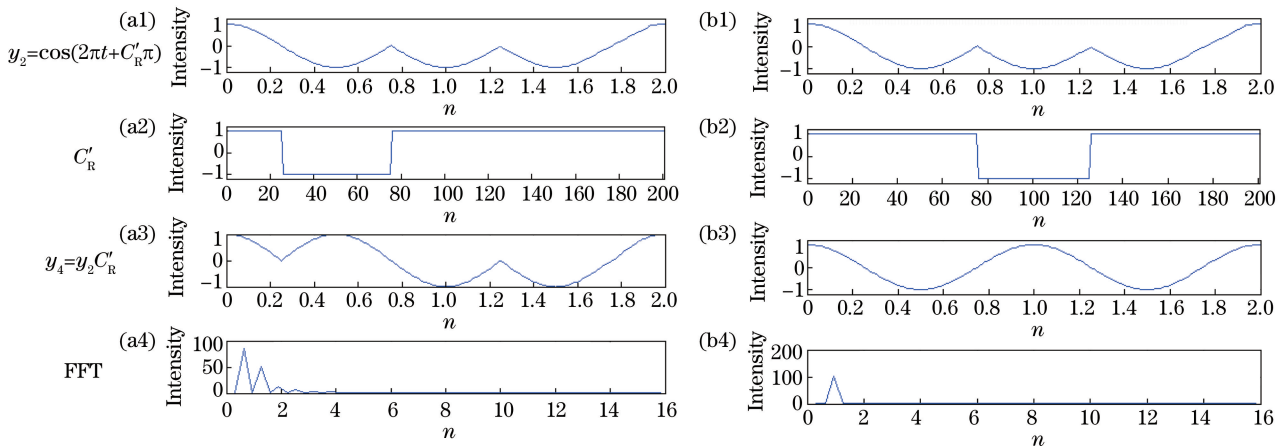


图 2 原理示意图。(a)调制信号与延迟不匹配效果图;(b)调制信号与延迟匹配效果图

Fig. 2 Principle diagrams of (a) when the delay doesn't match the target range and

(b) when the delay matches the target range

结合(7)式和图 2 可以得出,当移位延迟的码元时间  $n\Delta t$  和目标导致的延时量  $2R/c$  不匹配时,傅里叶变换频谱无明显峰值;当移位延迟的码元时间  $n\Delta t$  和目标导致的延时量  $2R/c$  一致时, $y$  将转变为相位连续的三角函数,其傅里叶变换频谱  $Y$  在中频  $\omega_m$  处具有显著峰值。因此,系统可根据傅里叶变换频谱出现最大峰值时对应的延迟码元数  $n$  得到目标距离信息,即目标距离  $R = c \times n\Delta t / 2$ 。系统距离分辨率  $\Delta R = c \times \Delta t / 2 = c / (2F)$ ,即系统通过在宽脉宽

中进行高速伪随机码调制,使得系统的距离分辨率不取决于脉冲宽度,而取决于调制速率。

### 3 实验结果

基于上述基本原理,搭建了基于伪随机码相位调制和相干探测的自由空间激光测距实验系统,如图 3 所示。

系统采用人眼安全的 1550 nm 单模窄线宽连续激光器作为光源,激光器输出功率为 11.3 mW。

激光器输出经隔离器后与 10:90 耦合器相连,其中绝大部分通过电光相位调制器按照 13 阶 M 序列伪随机码信号进行相位调制,调制速率为 100 MHz,调制器的驱动信号由任意波形发生器提供,调制后的信号经环形器后作为出射激光由望远镜发射出去,出射功率为 2.0 mW;另一部分通过声光调制器移频后作为本振信号光,用于相干探测,频移量为 25 MHz,本振信号功率为 117.8  $\mu$ W。望远镜口径

为 2 cm,望远镜的出射激光经目标漫反射后,携带目标距离信息的激光回波信号光经同一望远镜采集后通过环形器与本振信号光在耦合器中发生相干作用,经过光电平衡探测器转化为电信号,经双通道 ADC 转化为数字信号。双通道 ADC 另一通道采集电光相位调制器的驱动信号。ADC 的采样频率为 1 GHz。外部触发电路用于提供 ADC 和任意波形发生器的触发信号,从而保证系统的同步性。

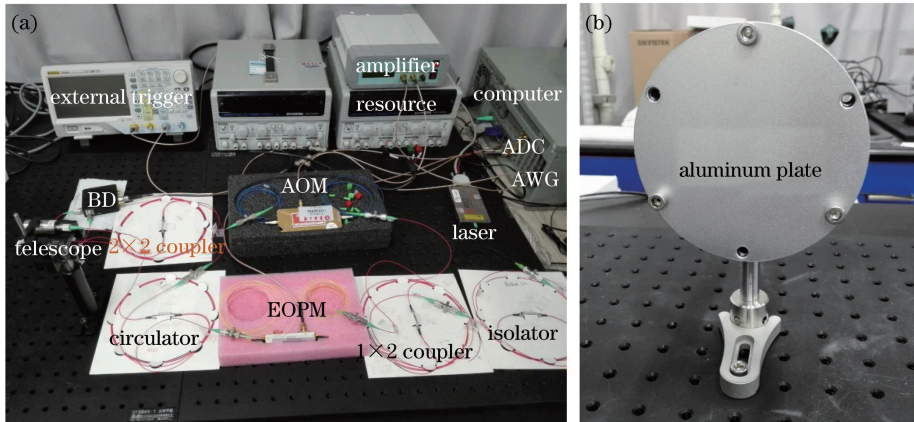


图 3 (a) 系统实验图; (b) 目标铝板

Fig. 3 (a) Experimental system diagram; (b) targeted aluminum plate

探测目标为常用铝板,放置于距离发射系统约 8 m 处的位置。伪随机码序列长度为 81.9  $\mu$ s,采样频率为 1 GHz。探测器输出的相干信号如图 4 所示。

由图 4 可知,相干信号表现为相位不连续的三角波信号。将 ADC 另一通道采集的伪随机码驱动信号依次作步长为 1 ns 的时间延迟。延迟后的伪随机码驱动信号与相干信号相乘。当移位置与目标距离延迟不匹配/匹配时,(7)式中的信号 Y 如图 5 所示。

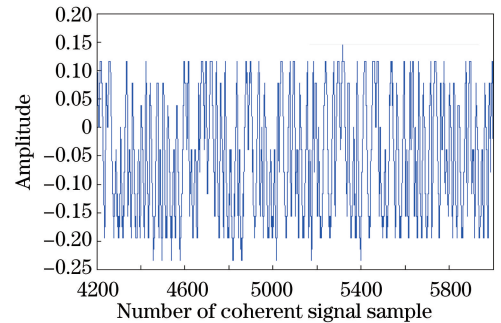


图 4 ADC 通道 1 采集的相干信号

Fig. 4 Coherent signal sampled by ADC channel 1

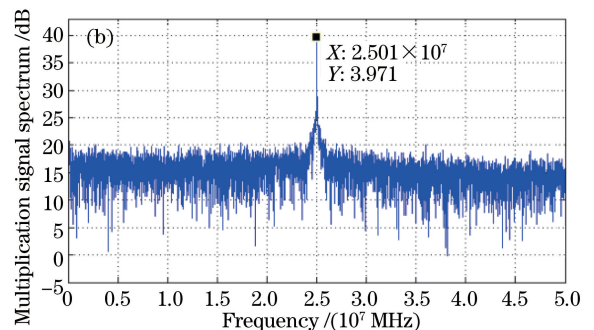
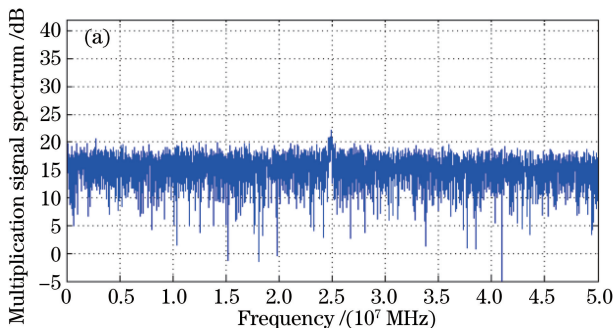


图 5 相乘信号幅度谱。(a) 距离延迟与移位置不匹配; (b) 距离延迟与移位置匹配

Fig. 5 Amplitude spectrum of the multiplication signal. (a) Delay doesn't match the target distance;

(b) delay matches the target distance

由图 5 可知,当伪随机码驱动信号延迟量和目标距离延迟不匹配时,(7)式中的相乘信号  $y$  仍为相位不连续的三角波,经过傅里叶变换得到的频谱峰值不明显;反之当伪随机码驱动信号延迟量和目标距离延迟匹配时,傅里叶频谱在声光调制器频移量处的峰值显著,信噪比( $R_{SN}$ )约 20 dB。

在相干信号与不同时间延迟的伪随机码驱动信号相乘过程中,得到不同的傅里叶幅度谱峰值。因为系统采样频率为 1 GHz,对应的距离延迟分辨率为 0.15 m。(7)式中信号  $Y$  峰值与伪随机码驱动信号不同延迟距离的关系如图 6 所示。

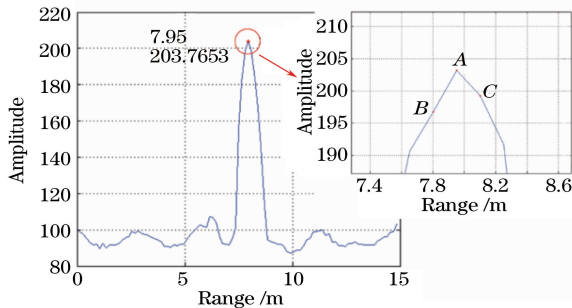


图 6  $Y$  频谱峰值与不同延迟距离的关系

Fig. 6 Relationship between the peak value of the  $Y$  amplitude spectrum and the distance corresponding to the different time delays

由图 6 可知,最大的傅里叶频谱峰值所对应的延迟距离为 7.95 m。从图 6 放大的插图中可看出,最大峰值点的相邻点非完全对称,说明目标距离不是距离延迟分辨率的整数倍。此时的真实峰值距离介于相邻的两个码元延迟长度之间。选取包含最大峰值点  $A$  和与之相邻的点  $B$ 、 $C$ ,利用重心法<sup>[18-19]</sup>进一步提取峰值距离,可得目标距离为 7.938 m。

为获取系统的测距稳定性,重复实验 50 次并利用重心法提取峰值得到目标距离,测量结果如图 7 所示。

对图 7 中的数据统计可知,目标平均距离为 7.975 m,测距精度为 11.8 cm。即在目前实验系统中,当激光出射功率为 2 mW、本振功率为 117.8  $\mu$ W、出射脉冲宽度为 81.9  $\mu$ s、望远镜口径为 2 cm 时,系统能以约 20 dB 的信噪比、11.8 cm 的测距精度探测到 8 m 处的目标。根据文献[17]中的激光雷达方程以及文献[20]中脉冲宽度和本振功率的影响,可将实验系统参数反推至星载条件,即出射激光峰值功率从 2 mW 增长至 111 W,脉冲宽度从 117.8  $\mu$ W 增长至 1 mW,脉冲宽度从 81.9  $\mu$ s 增长

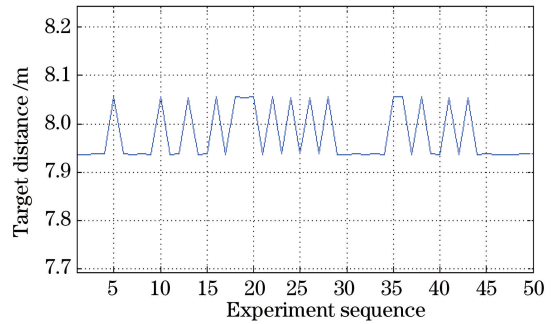


图 7 经重心法提取峰值后的 50 次测量结果

Fig. 7 50 times detection results after core amendment

至 400  $\mu$ s,望远镜口径由 2 cm 增长至 70 cm,系统能以约 10 dB 信噪比探测到 600 km 处的目标。此时系统的目标回波信号峰值功率约为  $1.48 \times 10^{-11}$  W(脉冲宽度为 400  $\mu$ s 的单脉冲回波能量约为  $6 \times 10^{-15}$  J,包含的信号光子数约为  $4.6 \times 10^4$  个)。该回波信号峰值功率非常微弱,但信号回波信号并非直接进入探测器,而是和本振光(即经过声光调制器后的光)相干后再进入探测器,如图 1 所示。进入探测器的光可视为本振光和回波信号光的叠加,因此不会出现探测器无法探测的情况。在相干探测体制中,本振信号能够将回波小信号光有效放大,从而提高系统探测灵敏度。为体现该套测量系统的特点,将此反推参数与文献[4]中采用典型巨脉冲飞行时间法的 GLAS 参数进行对比,得到的对比结果如表 1 所示。

表 1 GLAS 参数与实验系统反推星载参数的对比

Table 1 Comparison of the GLAS parameters and the experiment system parameters

Parameter	GLAS	System proposed in this paper	Difference
Laser	Nd:YAG	Fiber laser	
Peak power	15 MW	111 W	-51.31 dB
Pulse width	5 ns	400 $\mu$ s	+49.03 dB
Pulse energy	75 mJ	44.4 mJ	-2.28 dB
Pulse frequency	40 Hz	1000 Hz	25 times
Optical power	3 W	44.4 W	14.8 times
Electro optical efficiency	5%	20%	4 times
Electric power	60 W	222 W	3.7 times
Telescope diameter	1000 mm	700 mm	49% (area)
Orbital altitude	600 km	600 km	

由表 1 可知,基于伪随机码相位调制和相干探测技术激光测距系统反推星载参数较 GLAS 参数,其光功率增加 14.8 倍,电功率增加 3.7 倍,且在接收

望远镜面积只有 49% 的情况下, 可以获得 25 倍的测量频率, 即 25 倍的空间分辨率, 充分显示了该测量机制在空间应用的优势。

## 4 结 论

讨论了基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距系统实施方案, 并搭建了自由空间验证实验系统。在激光出射功率为 2 mW、本振功率为 117.8  $\mu$ W、伪随机码序列长度为 81.9  $\mu$ s、望远镜口径为 2 cm 时, 对约 8 m 处的自由空间目标进行测量, 统计得到的目标平均距离为 7.975 m, 距离精度为 11.8 cm。与 GLAS 参数对比发现, 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距系统的光功率增加 14.8 倍, 电功率增加 3.7 倍, 且在接收望远镜面积只有 49% 的情况下, 可以获得 25 倍的测量频率, 即 25 倍的空间分辨率。因该系统工作在宽脉宽、低峰功率状态下, 脉冲重复频率可大幅提高, 为高精度远距离目标探测开辟了一条新途径。受限于激光器的功率和望远镜的口径, 目前实验系统中的测量距离还比较近。下一步实验将通过使用大功率激光器或激光放大器来提高测量目标距离, 并通过对多普勒频移的解析将该套系统的应用拓展至距离和速度的同时高精度测量。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng M J, Liu X. The development and principle of laser range measurement technology at home and abroad [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014(1): 35.  
郑明杰, 刘鑫. 激光测距技术国内外发展状况及原理 [J]. 科技创新导报, 2014(1): 35.
- [2] Luo Q S, Guo T Y, Yao Y S, *et al.* Analysis of laser retro-reflector on GRACE gravity satellite [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 112301.  
罗青山, 郭唐永, 姚运生, 等. GRACE 重力卫星激光反射器分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112301.
- [3] Zhang Z P, Cheng Z E, Zhang H F, *et al.* Global laser ranging observation of Beidou satellites and data application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0404004.  
张忠萍, 程志恩, 张海峰, 等. 北斗卫星全球激光测距观测及数据应用 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0404004.
- [4] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, *et al.* Application

and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-19.

赵一鸣, 李艳华, 高雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势 [J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-19.

- [5] Yu Z Z, Hou X, Zhou C Y. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.  
于真真, 侯霞, 周翠芸. 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.
- [6] Neumann G A. Some aspects of processing extraterrestrial LIDAR data: clementine NEAR MOLA [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing, 2001, 3: 73-80.
- [7] Zhang Y F, Yang H. Laser altimeter and its application [J]. Aerospace China, 2007(12): 19-23.  
张翼飞, 杨辉. 激光高度计及其应用 [J]. 中国航天, 2007(12): 19-23.
- [8] 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.
- [9] Huang Y, Chang S Q, Li P J, *et al.* "Chang'e III" lunar probe orbit determination and lunar surface positioning [J]. China Science Magazine, 2014, 59(23): 2268-2277.  
黄勇, 吕胜骐, 李培佳, 等. "嫦娥三号"月球探测器的轨道确定和月面定位 [J]. 中国科学杂志社, 2014, 59(23): 2268-2277.
- [10] Pillet G, Morvan L, Dolfi D, *et al.* Wideband dual-frequency lidar-radar for simultaneous velocity and high-resolution range profile measurements [C]. SPIE, 2009, 7323: 73230Z.
- [11] Shen S S, Chen Q. Research and implementation of performance optimization of single photon range system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 1-5.  
沈姗姗, 陈钱. 单光子测距系统性能优化研究和实现 [J]. 激光与红外工程, 2016, 45(2): 1-5.
- [12] Chen Y, Yang Y. Extended pseudo-random coding rules with different repetition frequency based on single photon detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 051204.  
陈雨, 羊毅. 基于单光子探测的不同重频下扩展伪随机编码规则 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051204.
- [13] Kravitz D, Grodensky D, Zadok A, *et al.* Incoherent compression of complementary code pairs for laser

- ranging and detection [C]. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems, 2013: 1-5.
- [14] Luo Y, He Y, Geng L M, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (5): 0514001.  
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达 [J]. 中国激光, 2016, 43 (5): 0514001.
- [15] Chimenti R V, Dierking M P. Sparse frequency LFM lidar signals [J]. Optics Express, 2009, 17 (10): 8302.
- [16] Yang F, He Y, Shang J, *et al.* Experimental study on the 1550 nm all fiber heterodyne laser range finder [J]. Applied Optics, 2009, 48(34): 6575-6582.
- [17] Allen C T, Chong S K. Development of a 1319 nm laser radar using fiber optics and RF pulse compression [D]. Kansas: The University of Kansas, 2002.
- [18] Zhu X Y, Ding K. Comparative comparison of discrete spectrum correction methods [J]. Signal Processing, 2005, 17(1): 91-97.  
朱小勇, 丁康. 离散频谱校正方法的综合比较 [J]. 信号处理, 2005, 17(1): 91-97.
- [19] Liu F, Jin S L. Frequency analysis technology in laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1463-1468.  
刘帆, 金世龙. 激光多普勒测速仪中的频谱分析技术 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1463-1468.
- [20] Yang F, He Y, Chen W B. Parameter design of space-borne altimeter [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 572-577.  
杨馥, 贺岩, 陈卫标. 星载激光相干测高计的参数设计 [J]. 光学学报, 2008, 28(3): 572-577.