

# 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用

倪旭翔 胡 凯\*

(浙江大学现代仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 基于单脉冲激光测距在远程激光测距中的局限性,提出了一种基于发射脉冲串与回波脉冲串互相关的信号处理方法。该方法将多个激光发射脉冲和回波脉冲作为一次连续信号同时数字化,然后进行互相关处理。采用激光强度与发射间隔可调的激光系统来模拟不同反射强度、不同距离的测距回波信号;通过处理不同信噪比的回波信号,来探究本方法对于回波信号信噪比的提升能力以及对于尖峰噪声的抑制能力。实验结果表明,该方法能够有效提高回波信号的信噪比,信噪比为 0.11 的弱回波信号经过处理后信噪比被提升到 5.92,从而扩展了激光测距系统的测程,有效降低了探测系统的探测虚警率,提高了远程激光测距系统的弱回波探测能力。

**关键词** 测量;信号处理;远程激光测距;脉冲串;互相关

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1112005

## Multi-Pulse Train Cross-Correlation Method in Remote Laser Ranging

Ni Xuxiang Hu Kai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** With the limitation of single-pulsed laser ranging technology in long distance laser ranging, a new ranging technology based on the cross-correlation between the transmitted pulse train is proposed. A laser system which can modulate pulse's intensity and intervals is applied to simulate different echo pulses. A series of experiments are designed to explore the abilities of the technology in improving signal to noise ratio (SNR), suppressing noise and measuring time, and good results are got. The SNR is improved from 0.11 to 5.92, which extends laser ranging, decreases alarm rate of the detection system and increases ability of exploring weak echo pulse.

**Key words** measurement; signal processing; remote laser ranging; pulse train; cross-correlation

**OCIS codes** 040.5160; 140.3538; 280.3400

## 1 引 言

脉冲式激光测距技术因其快速、无合作目标、测程远等优点被广泛应用于军事领域,尤其在侦察和火控系统中应用最普遍<sup>[1]</sup>。而目前实际应用中多采用单脉冲激光测距技术,但该技术受单脉冲能量的限制,使远距离探测存在回波信噪比差、探测虚警率高等问题<sup>[2,3]</sup>。国内外许多学者针对远距离激光测距提出了多脉冲的方法,如 Thiel 等<sup>[4]</sup>通过仿真实验比较了多脉冲互相关方法与传统定比门限法的测距精度;Jutzi 等<sup>[5]</sup>采用不同的物体模型仿真不同表面的测距回波,由此探究多脉冲互相关方法对于不

同表面测距回波的探测能力;章正宇等<sup>[6]</sup>对三回波脉冲互相关方法的信噪比提升能力进行了仿真研究;钟声远等<sup>[7]</sup>对脉冲串回波互相关方法的探测灵敏度进行了研究。

本文对远距离探测中多脉冲回波互相关方法进行了深入研究,提出了一种全新的基于多个发射脉冲与回波脉冲互相关的方法,将多个短间隔发射脉冲与回波脉冲作为一次连续信号同时接收后进行互相关处理。在理论研究基础上进行了仿真实验,并根据实验结果对该方法对于信噪比和探测能力的提高进行了分析。

**收稿日期**: 2012-05-14; **收到修改稿日期**: 2012-06-08

**基金项目**: 国家 973 计划(2009CB72400204)资助课题。

**作者简介**: 倪旭翔(1970—),男,副教授,硕士生导师,主要从事激光应用和光电检测等方面的研究。

E-mail: xuxiang@zju.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: beowulfhu@126.com

## 2 理论分析

多脉冲互相关方法是利用信号间的相关性和噪声间的不相关性对回波信号进行累加,使得深埋在噪声里的回波信号突显出来,放大器输出特性的数学模型为<sup>[7]</sup>

$$\zeta(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

式中  $s(t)$  为回波信号,  $n(t)$  为噪声信号, 将多脉冲信号进行叠加, 可表示为

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N [s_i(t) + n_i(t)], \quad (2)$$

式中  $N$  为回波脉冲个数, 多次叠加后, 信号因为良好的相关性得到增强, 噪声因为差的相关性而得到抑制, 这样信号就从噪声中突显出来, 信噪比得到提升。

对于远程激光测距来说, 回波信噪比本身就很低, 经过叠加相关后信号的信噪比提升仍然有限, 理论上分析可知,  $N$  个脉冲叠加相关后, 信噪比相对于单脉冲能提高  $\sqrt{N}$  倍<sup>[7]</sup>。章正宇等<sup>[6]</sup>采用三脉冲叠加相关的方式, 使原来信噪比为 0.516 的弱回波信号信噪比提高到了 0.9, 但是在该信噪比下仍然难以提取回波信号。同时, 叠加相关的方法由于要多次采样单个回波信号, 还存在时间漂移的问题, 这会影响最终的探测精度。

### 2.1 回波信号与发射信号互相关

针对多脉冲叠加相关方式存在的信噪比提升有限以及时间漂移的问题, 提出一种基于回波信号与发射信号互相关的脉冲串互相关方法, 设激光发射信号由  $N$  个激光脉冲  $x_1(t)$  组成, 其对应回波为  $x_2(t)$ 。 $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} x_1(t) = \sum_{a=0}^{N-1} f(t - at_0) + z_1(t) \\ x_2(t) = \sum_{a=0}^{N-1} b(t) f(t - at_0 - \tau) + z_2(t) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $f(t)$  为发射脉冲信号,  $z_1(t)$  为发射噪声信号,  $b(t)$  为回波信号的幅值衰减因子, 它跟时间以及噪声强度相关,  $\tau$  为回波脉冲和发射脉冲之间的时间延迟,  $t_0$  为脉冲串相邻脉冲的间隔,  $z_2(t)$  为回波噪声信号。将脉冲串的回波信号进行互相关处理:

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^T \sum_{a=0}^{N-1} [f(t - at_0) + z_1(t)] \times [b(t) f(t - at_0 - \tau) + z_2(t)], \quad (4)$$

在理想条件下, 由于信号与噪声以及噪声与噪声的非相关性<sup>[9]</sup>, (4)式最终可得

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^T \sum_{a=0}^{N-1} f(t - at_0) b(t) f(t - at_0 - \tau). \quad (5)$$

对于远程测距来说,  $b(t)$  远远小于 1, 则(5)式中的发射脉冲串信号幅值远远大于回波脉冲串信号幅值, 从理论上分析, 其互相关信号峰值将远远大于叠加相关后的信号峰值。考虑到信号脉宽  $\Delta z$ , (5)式的互相关方法相对于(2)式的叠加相关方法, 其信号峰值提高了  $\frac{\Delta z}{b(t)}$  倍。另外根据互相关性质<sup>[10]</sup>:

$$R_s(t - \tau) \leq R_s(0), \quad (6)$$

当  $t = \tau$  时, 互相关函数得到最大值。而时延估计值为相关函数的峰值, 即

$$\tau = \arg[\max R(\tau)]. \quad (7)$$

可见发射脉冲串与回波脉冲串互相关方法同回波多脉冲叠加相关方法相比, 主要有以下两方面的提高: 1) 由于发射脉冲串的信噪比要好于回波脉冲, 互相关后信噪比得到大幅提升; 2) 发射脉冲串与回波脉冲串作为一次连续信号, 由模数转换器(ADC)同时接收, 两路信号的时间轴是以 ADC 的时钟信号为基准, 故发射脉冲串的时间抖动并不影响信号接收的时间轴, 从而消除了各个发射脉冲的时间漂移的影响。

采用脉冲串发射信号与回波信号互相关的方法能够提高回波信号的信噪比, 从而能提高激光测距的测程。当然, 该方法也会存在激光发射脉冲后向散射造成的“死程”问题, 而且, 由于脉冲串信号连续发射, 后一个发射信号的后向散射信号可能与前一个回波信号叠加造成测距错误。为此, 可以根据测程来调节发射脉冲串的间隔, 使得回波会落在“死程”之外。

### 2.2 发射脉冲理想化处理

提高信号信噪比, 不仅要增大信号的值, 同时还要减小噪声的值。(4)式中有  $z_1(t)$  和  $z_2(t)$  两个噪声项,  $z_1(t)$  主要为电路噪声, 而  $z_2(t)$  则包括电路噪声、环境噪声和接收器噪声。因为噪声的来源有差别, 所以  $z_2(t)$ ,  $z_1(t)$ ,  $f(t)$  三者并非完全不相关, 这影响了信噪比的提升效果。对于发射脉冲来说, 信噪比非常好, 可以通过阈值门限法将其二值化处理, 使得发射脉冲的噪声项  $z_1(t)$  为 0, 使得(4)式中关于  $z_1(t)$  的噪声项为 0, 从而提高信噪比。

### 2.3 实验系统框图

现工程上三脉冲发射系统已经比较成熟, 故实验中采用三个脉冲的脉冲串作为激光驱动信号, 其实验框图如图 1 所示。延时电路产生的不同延时时间用

来仿真测距中不同距离的时延,多脉冲发射电路产生多脉冲信号用来驱动激光器。该脉冲串信号分为两路,一路通过通道 1 直接传输给高速 ADC,作为互相关的发射脉冲串信号以及另一路信号的同步信号;另一路经过延时电路传输给激光器,驱动激光器输出激

光,激光被 PIN 管接收后通过通道 2 传输给高速 ADC,模拟远程测距的回波信号,高速 ADC 得到的两路信号示意图如图 2 所示。两路信号传输到计算机,通过软件进行互相关处理,得到最后的结果。

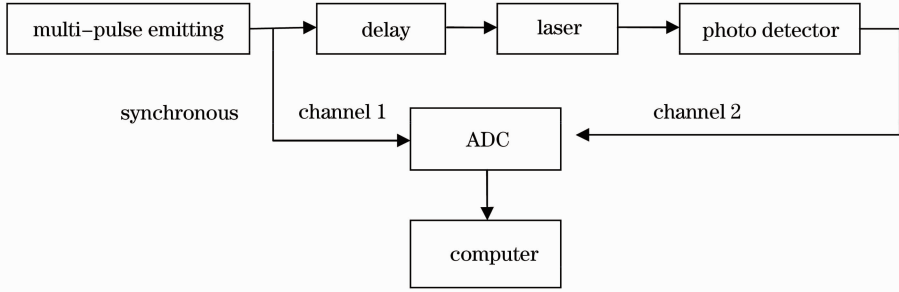


图 1 实验装置简易框图

Fig. 1 Block of experimental device

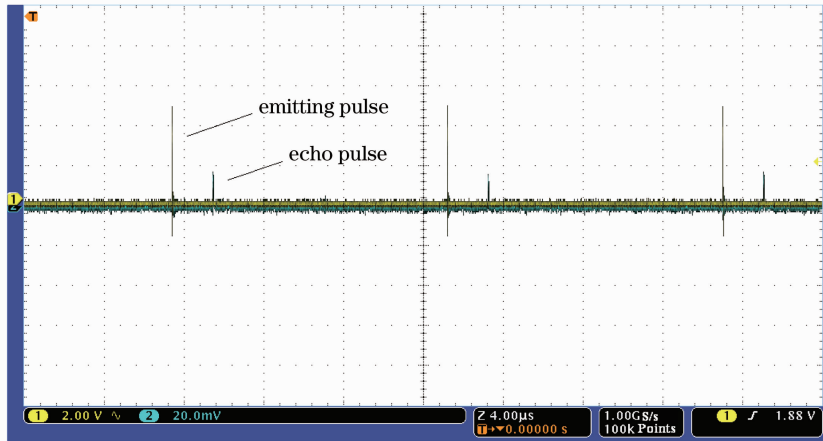


图 2 高速 ADC 两通道信号图

Fig. 2 Dual-channel signals of high speed ADC

实验中,选取 Thorlabs 公司的 L808P200 型号的半导体激光二极管,波长为 808 nm,峰值功率为 200 mW,探测器选用硅 PIN 管,中心波长为 850 nm,灵敏度为 0.62 A/W,高速 ADC 选用示波器 MSO4104 代替,最高采样率为 5 G/s,带宽为 1 GHz。

### 3 多脉冲互相关技术的实验论证

为了探究基于发射脉冲与回波脉冲互相关的多脉冲互相关技术的探测能力,从两方面入手:1)通过调节发射脉冲电路的电流大小来改变激光功率,以此来模拟不同强度的回波信号,探究脉冲串互相关技术对于不同强度的回波的信噪比提升能力;2)进一步控制激光输出功率,使得回波信号完全湮没在噪声中,模拟高虚警率条件下的回波信号,探究脉冲串互相关技术对于尖峰噪声的抑制能力。

#### 3.1 回波信号信噪比提升能力分析

在测距实验中,通过调节脉冲发射电路的电流大小改变激光发射功率,以不同的回波强度模拟不同的测距距离,然后对比回波信号的信噪比和互相关信号的信噪比,探究互相关方法的信噪比提升能力。不同的激光功率得到的不同强度的回波信号及互相关信号如图 3 和图 4 所示。

在激光测距中,信噪比定义为

$$S_{NR} = V_s / \sqrt{V_n^2}, \quad (8)$$

式中  $V_s$  为输出电压最大值,  $\sqrt{V_n^2}$  为输出噪声均方根值<sup>[11]</sup>。要计算信噪比必须找到信号位置,当信号淹没于噪声时,如图 3 所示,根本无法测量信号对应的峰值,而互相关后,如图 4 所示,信号峰值突出,信噪比非常好。为了定义弱回波信号的信噪比,以

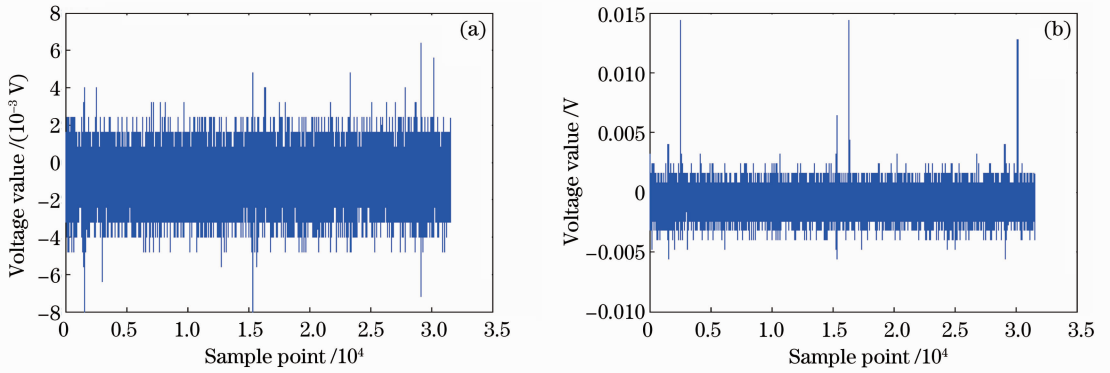


图 3 激光功率为(a) 110  $\mu\text{W}$  和(b) 401  $\mu\text{W}$  的回波信号  
Fig. 3 Echo signals with (a) 110  $\mu\text{W}$  and (b) 401  $\mu\text{W}$  power

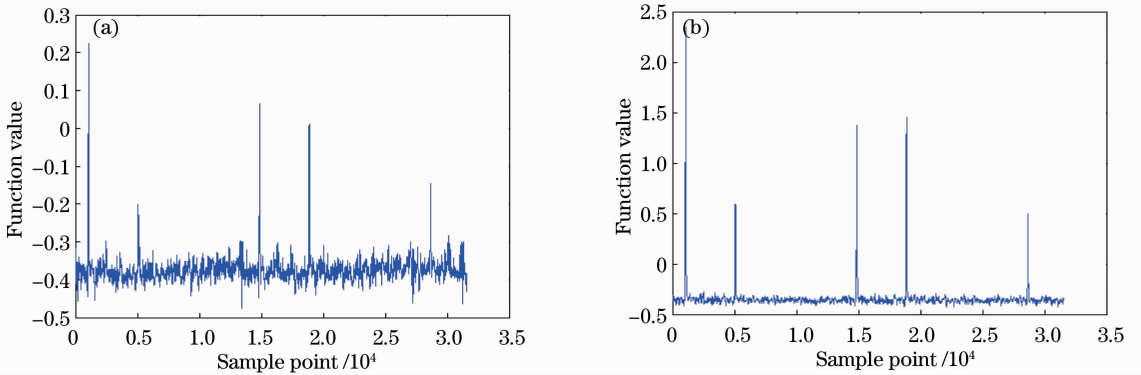


图 4 激光功率为(a) 110  $\mu\text{W}$  和(b) 401  $\mu\text{W}$  的互相关信号  
Fig. 4 Cross-correlation signals with (a) 110  $\mu\text{W}$  and (b) 401  $\mu\text{W}$  power

此来与互相关信号进行对比,设计了如图 5 所示的测量系统。在脉冲发射电路的控制下,激光器输出不同功率的激光,激光通过透射率较高的分光镜分为两路,一路透射光进入光功率计,另一路反射光进入 PIN 管。设 PIN 管的探测灵敏度为

$$R_v = V_s/P, \quad (9)$$

式中  $V_s$  为 PIN 管的输出均方根电压,  $P$  为 PIN 管上的平均光功率<sup>[12]</sup>。对于同一个 PIN 管,  $R_v$  为定值,所以均方根电压与平均光功率成正比,而噪声均方根值对于同一个电路和光路来说又是一个定值,

故根据(8)式的定义, PIN 管接收的光功率值与信噪比成正比。当激光输出功率较强时,设为  $P_1$ , 回波信号也较强,此时可以直接测得回波信噪比  $S_{NR1}$ ; 调节脉冲发射电路电流大小,当激光输出功率较小时,为  $P_2$ , 此时回波信号淹没在噪声中,无法直接测得,其信噪比  $S_{NR2}$  通过计算可得

$$S_{NR2} = S_{NR1} P_2/P_1, \quad (10)$$

根据(9)式和(10)式,计算不同回波强度(对应不同测距距离)的回波信号与互相关信号信噪比如表 1 所示。

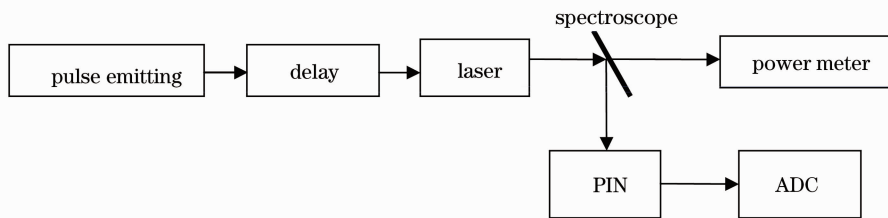


图 5 信噪比测量系统示意图  
Fig. 5 Signal to noise ratio measurement system

表 1 回波信号信噪比提升能力分析

Table 1 Analysis of improvement about signal to noise ratio

Number	Power / $\mu\text{W}$	Echo signal to noise ratio	Cross-correlation signal to noise ratio	Signal to noise ratio ascension proportion
1	632	10.5435	26.4949	2.5129
2	510	7.3688	25.7227	3.4908
3	292	5.4136	23.4197	4.3261
4	153	2.5527	17.0815	6.6915
5	110	1.8351	15.3627	8.3716
6	29	0.4838	7.6327	15.7766
7	7	0.1168	5.9299	50.7697

从表 1 可以看出,互相关后的信号相对于回波信号的信噪比有大幅提升,尤其是 4~7 组数据,初始回波信噪比已经低于阈值判断法要求的最低信噪比(最低信噪比为 3),而互相关后信号的信噪比都提升到了 6 以上,大大提高了脉冲激光测距的测程。根据主动探测距离方程<sup>[6,13]</sup>得

$$L = \left\{ \frac{P_s(\lambda) L K D_0^2 D^*}{4\Omega_1 (V_s/V_n) \sqrt{A_d \Delta f}} \exp[-2k(\lambda)L] \right\}^{1/4}, \quad (11)$$

式中  $L$  为探测距离,  $P_s(\lambda)$  为发射功率,  $K$  为利用效率,  $D_0$  为接收系统口径,  $D^*$  为探测器的比探测率,  $\Omega_1$  为激光发散角,  $V_s/V_n$  为信噪比,  $A_d$  为探测器面积,  $\Delta f$  为系统带宽,  $k(\lambda)$  为大气衰减系数。以表 1 的第 2 组数据为例,原始回波信号的信噪比  $S_{\text{NR1}}$  可探测的距离为  $L_1$ ,互相关后的信噪比  $S_{\text{NR2}}$  可探测的距离为  $L_2$ ,在其他条件相同的条件下,根据(11)式可得

$$\frac{L_2}{L_1} = \left( \frac{S_{\text{NR2}}}{S_{\text{NR1}}} \right)^{1/4} \left\{ \frac{\exp[-2k(\lambda)L_2]}{\exp[-2k(\lambda)L_1]} \right\}^{1/4}, \quad (12)$$

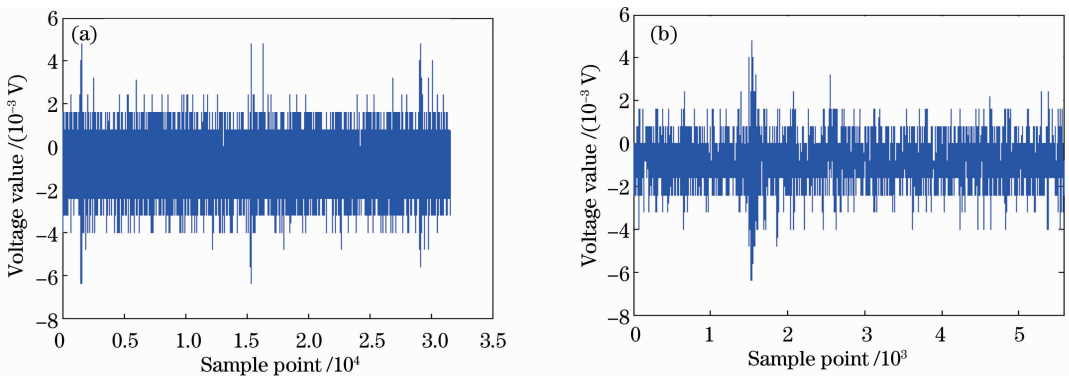
当能见度较好时<sup>[2]</sup>, (12) 式中的  $\left\{ \frac{\exp[-2k(\lambda)L_2]}{\exp[-2k(\lambda)L_1]} \right\}^{1/4} \approx 1$ , 则

$$\frac{L_2}{L_1} = \left( \frac{S_{\text{NR2}}}{S_{\text{NR1}}} \right)^{1/4}, \quad (13)$$

结合表 1 的第 7 组数据,互相关后测程提高了近 2.6 倍,大大拓展了远程激光测距的应用。

### 3.2 对于尖峰噪声的抑制能力分析

在远程测距中,回波信号除了因为信噪比低而难以直接用阈值判别法检测外,信号中还常常会带有尖峰噪声,其值有时会是信号峰值的 2~3 倍,这时尖峰噪声就会引起误判。图 6 和图 7 分别为信号淹没在噪声中时回波信号和互相关信号的整体图和局部放大图。

图 6 67  $\mu\text{W}$  回波 (a) 整体图和 (b) 局部放大图Fig. 6 (a) Overall diagram and (b) partial enlargement of echo signal with 67  $\mu\text{W}$  power

从图 6(a)和图 7(a)的对比可以看出信号淹没在噪声中时,噪声中往往带有幅值超过信号峰值的尖峰信号,而采用发射脉冲与回波脉冲互相关的方法,只有当回波三脉冲平移相应的延时时间后才会与发射三脉冲完全重合,使信号峰值突显出来,其值

远远大于原回波信号中的尖峰噪声值,这样尖峰噪声得到有效抑制。从图 6(b)和图 7(b)可以看出,原始回波信号的峰值呈锯齿状,这在时间点判定时会造成很大误差。而信号经过互相关后,其峰值突出且尖锐,其最大值点就对应了延时时间,精度很高。

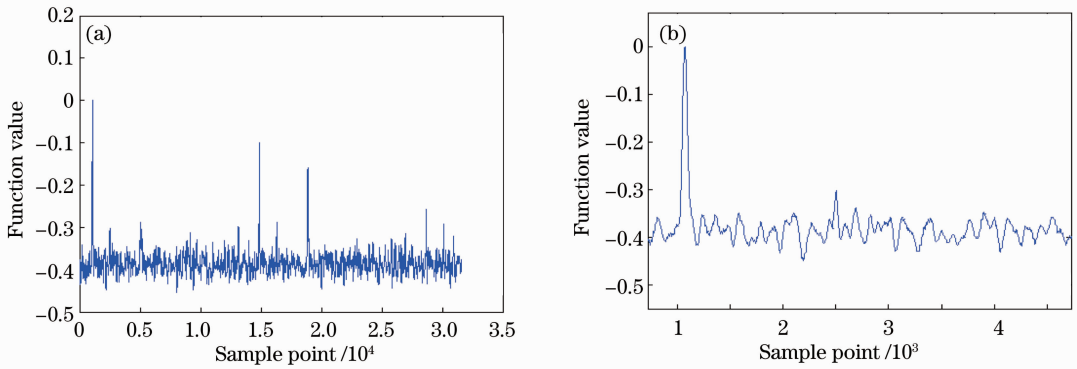
图 7 67  $\mu\text{W}$  互相关(a)整体图和(b)局部放大图

Fig. 7 (a) Overall diagram of cross-correlation and (b) partial enlargement of correlation signal with 67  $\mu\text{W}$  power

## 4 结 论

提出了基于发射脉冲串与回波脉冲串互相关的多脉冲互相关方法。通过控制激光发射功率的脉冲发射电路和延时电路来模拟不同强度不同距离的回波信号,以探究该脉冲串互相关方法对于回波信号信噪比的提升能力和对于尖峰噪声的抑制能力。通过实验得出结论:该方法可以有效提高回波信噪比,并且能较好地抑制回波中的尖峰噪声,对信噪比为 0.11 的弱回波信号进行互相关处理后信噪比能提升到 5.92,对应测程提高了 2.6 倍。该方法并未改变原激光测距系统的发射系统和接收系统,仅仅改变了数据处理方法,就能大大提高系统的探测信噪比和测程,因此对远程激光测距具有理论价值和实践意义。

## 参 考 文 献

- Chen Li. Study on the Echo Signal Processing Technology of Diode Laser Range Finder [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. 1~3  
陈 利. 半导体激光测距回波信号处理技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008. 1~3
- Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong. Research on ranging property of laser radar and it's range accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001  
姜海娇, 来建成, 王春勇. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0514001
- Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Theoretical analysis of influence of laser signal strength on range precision in single photon ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2771~2775  
王 飞, 赵 远, 张 宇等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2771~2775
- K. Thiel, A. Wehr, C. Hug. A New Algorithm for Processing Fullwave Laser Scanner Data[M]. Porto: EARSel 3D—Remote Sensing Workshop, 2005
- B. Jutzi, U. Stilla. Precise range estimation on known surfaces by analysis of full-waveform laser[C]. Istanbul: Symposium of ISPRS Commission III, 2006. 234~239
- Zhang Zhengyu, Sui Xiaolin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging: study and simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(7): 661~665  
章正宇, 眭晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术的研究和仿真[J]. *中国激光*, 2002, **29**(7): 661~665
- Zhong Shengyuan, Li Songshan. Study of multi-pulsed laser ranging technology [J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(9): 797~799  
钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(9): 797~799
- Huang Zhen, Xu Guoxiong, Ni Xuxiang. Digital correlation detection technology on enlarging the range of pulsed laser rangefinder[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(4): 266~268  
黄 震, 徐国雄, 倪旭翔. 数字相关检测技术扩大脉冲式激光测距测量范围的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(4): 266~268
- Zhou Jian, Long Xingwu. Research on multipoint layer-type Doppler self-velocimeter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1837~1844  
周 健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1837~1844
- Xu Wei, Chen Qian, Gu Guohua. Laser fuze long-distance ranging based on cross-correlation time delay estimation[J]. *J. Detection and Control*, 2011, **33**(3): 6~9  
徐 伟, 陈 钱, 顾国华. 基于互相关时延估计的激光引信远距离定距[J]. *探测与控制学报*, 2011, **33**(3): 6~9
- Jiang Hongbin. Selecting optimum of signal-to-noise ratio and laser beam divergence for laser range-finder [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(1): 31~34  
姜宏滨. 激光测距仪信噪比与激光发散角最佳值的选取[J]. *光学与光电技术*, 2003, **1**(1): 31~34
- Zeng Guangyu. Photoelectric Detection Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 19~20  
曾光宇. 光电检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. 19~20
- Yang Yi, Lu Zukang, Hu Leili *et al.*. Numerical simulation of ranging performance for an airborne laser ranger finder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 75~78  
羊 毅, 陆祖康, 胡磊力等. 机载激光测距机测距性能的数值仿真[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 75~78

栏目编辑: 何卓铭