

基于非对称 sinc 函数拟合的激光测距算法优化

郭荣幸¹, 赵亚飞¹, 马鹏阁¹, 陈恩庆²

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450046;

2. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 小型化的高重频多脉冲激光测距机采用数字化处理确定目标距离, 接收电路带宽、数字化采样精度以及滤波算法等因素会影响测距的精度, 文中在对测距误差分析的基础上提出改进测距精度的算法。首先, 在对激光回波信号积累以提高信噪比的基础上, 对回波信号波形进行中心差分处理、斜率阈值和幅度阈值条件处理, 剔除伪峰值点, 初步确定峰值点位置。然后, 根据初定位后的波形特点, 选择相应的指数函数进行非对称 sinc 函数波形拟合修正, 估计波峰点相对准确位置, 从而输出较为精确的目标距离。最后, 将改进算法在 matlab 中仿真, 实验结果验证了文中提出的修正算法对提高激光测距精度的有效性。

关键词: 激光测距; 高重频; 峰值点检测; 波形拟合

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0806008

Optimization of laser ranging algorithm based on asymmetric sinc function fitting

Guo Rongxing¹, Zhao Yafei¹, Ma Pengge¹, Chen Enqing²

(1. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: On the basis of the fact that digital processing algorithm is used by high repetition frequency multi pulse laser rangefinder, the bandwidth of the receiving circuit, the digital sampling accuracy and the filtering algorithm affect the accuracy of ranging. The algorithm of improving measuring precision was put forward by analyzing the error of ranging. Firstly, based on the accumulation of the laser echo signal to improve the signal to noise ratio (SNR), it was followed by the processing of center differential signal, slope threshold condition of echo signal and eliminated the pseudo peak point, thus peak position was determined preliminarily; and then according to the characteristics of the waveform after initial positioning, the corresponding exponential function was selected to modify the waveform of the asymmetric sinc function to obtain the relative exact position of the crest point, so as to calculate the more accurate target distance. Finally, the improved algorithm was simulated in MATLAB, the simulation results show that the proposed algorithm can improve the accuracy of laser range accuracy.

Key words: laser ranging; high repetition frequency; peak detection; waveform fitting

收稿日期: 2016-12-11; 修订日期: 2017-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61331021); 河南省科技攻关项目(172102410067, 152102210139, 144300510059);

航空科学基金(2014ZC13004); 河南省高校科技创新团队(17IRTSTHN014)

作者简介: 郭荣幸 (1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事信号与信息处理、目标探测与识别方面的研究。 Email: guogrx@163.com

0 引言

目前,便携式激光测距机或测距望远镜采用 10 kHz 以上的高重复频率发射激光信号^[1],可以降低激光器的发射功率,在探测器接收时采用多脉冲的积累提高接收信号的信噪比,提高作用距离。激光测距机的发射波形因采用的激光器不同而有高斯型、负抛物线型、sinc 函数型等类型,这些激光信号由于具有上升和下降“陡峭”、脉冲宽度窄、反射率高的特点而被广泛采用。采用时间测量的激光测距方法有脉冲计数法、时间扩展法、TDC 法等^[2],这些计时方法均依赖于对波峰所处时刻位置的精确定位基础上。目前,直接寻峰法、多项式拟合曲线法是比较常用的方法,但这些方法的寻峰精度有限,抗干扰能力差,不能有效提高测距精度。在大气能见度较好且近距离测距时测得的回波峰值点位置偏差较小,直接寻峰测距误差也较小。然而,在低信噪比时,受噪声、杂波及信道衰减的影响,为实际的波峰位置确定带来困难,并不能直接精确检测到峰值点位置^[3]。因此,对激光目标回波波峰位置的寻峰算法进行改进优化,并使之具有一定的自适应能力,对减小测距误差具有重要的工程意义。

文中基于无人机航测所用的机载激光测距系统,其特点是功率低、体积小、重量轻,其测距量程为 7 km、静态测距精度要求在 ±3 m 以内,激光器脉冲发射频率 f_0 、激光脉冲宽度 τ 、脉冲累积个数 N 、A/D 转换的采样频率 f 等参数均需满足上述要求。在对测距系统误差分析的基础上,文中提出了一种修正波峰位置的新方法,即运用指数修正 sinc 函数拟合寻峰算法,进行多脉冲累积波形拟合重构,提高寻峰精度,与直接寻峰法进行对比,文中提出的测距算法提高了测距精度。

1 测距性能分析

1.1 高重频激光脉冲测距体制

激光测距是利用光波在待测距离上往返一次的时间与光速的乘积得到待测距离^[4-5]。采用高重频多脉冲方法不仅可以将回波的信噪比提高 \sqrt{N} 倍^[6-7] (N 为多脉冲的个数),而且有效降低激光器的发射功率,大大减小激光测距系统的体积。多脉冲的发射主

波与接收回波之间的关系如图 1 所示。

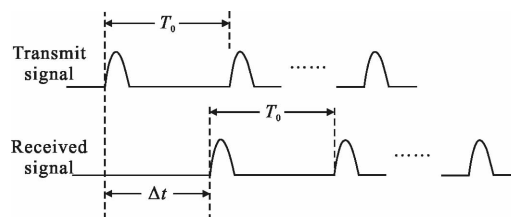


图 1 发送与接收脉冲信号

Fig.1 Send and receive pulse signals

为保证多脉冲正确累积,在单个脉冲回波接收到之后才能发下一个脉冲,即激光器主波与回波之间的时间间隔 Δt 与多脉冲发射周期 T_0 应满足:

$$\Delta t \leq T_0 \quad (1)$$

利用距离计算公式可以得出测距量程由多脉冲的周期 T_0 决定,由此计算出量程 D ,其对应关系为:

$$D = \frac{1}{2} C \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2} C \cdot T_0 \quad (2)$$

在该系统上,为了保证有效的测距量程不小于 7 km,可以取多脉冲发射周期 T_0 为 100 μ s,即发射频率 f_0 为 10 kHz,为提高接收回波的信噪比,可设定发射脉冲的个数 N 为 1 000,为了减小随机噪声对脉冲信号的干扰并尽可能降低激光器的发射功率,将激光器发射脉冲宽度 τ 设定为 120 ns.并选取高速 DSP 处理器,从而保证测距数据处理的实时性,提高测距能力,这样可以在单次耗时 0.1 s 的情况下实现多脉冲积累测距^[8]。

1.2 测距误差分析

便携式激光测距机采用半导体激光二极管激光器,发射的激光信号为对称 sinc 函数波形。在大气中传播并经过电路接收后,激光回波波形受接收电路带宽、激光传播距离、大气信道特性等因素影响^[9],其波形通常是左峰宽度 W_1 小于右峰宽度 W_2 (脉宽通常取峰值的一半处的峰宽),即接收的回波信号为“拖尾”的非对称 sinc 函数形式的波形,如图 2 所示,其中图(a)表示是发射对称 sinc 函数波形,图(b)为接收的有“拖尾”的非对称 sinc 函数波形。

回波波形是对称的 sinc 函数波形,其波峰位置不会发生偏移,只要找出波峰位置,根据发射和接收激光信号时间间隔即可得到被测距离^[10-11]。实际采集到回波数字信号处理器的回波信号是非对称的,峰值点受接收电路、噪声及杂波的影响会发生偏移,

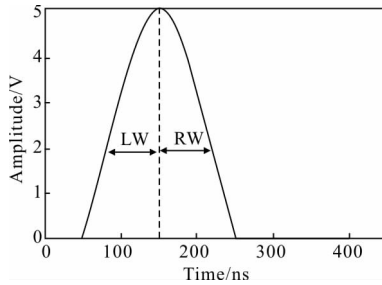
这会导致测距误差。

$$\Delta D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{1}{f} \quad (3)$$

因此 A/D 转换采样频率也是影响脉冲法测距精度的重要因素。

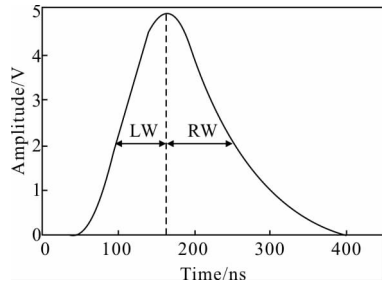
影响测距精度的另外一个重要因素是目标的运动速度。如图 4 所示,在对运动目标进行测距时,会造成 N 个回波信号在积累时发生偏移。

当被测目标缓慢运动时,由于本系统测距耗时很小,为 0.1 s,脉冲累积时偏移量也很小,对距离测量带来的误差也很小^[12],可以忽略,但运动目标以较高速度相对测距系统径向运动时对测距精度的影响明显,如果目标运动速度过大,最后发送的脉冲就不能正常累积,这会给测距带来较大误差,需要进行处理。



(a) 标准 sinc 函数

(a) Standard sinc function



(b) 非对称 sinc 函数

(b) Asymmetric sinc function

图 2 Sinc 函数模型图

Fig.2 Sinc function model diagram

在数字化处理过程中,以采样率 f 对回波信号进行采样,可以得到回波信号离散化后的样本点。为了将测距精度控制在系统要求的范围以内,并且不超过系统硬件实时处理数据的能力,回波采样频率 f 采用 50 MHz,即 20 ns 采一个点,这样在单个脉冲宽度上可以采集到 6 个点,如图 3 所示。这表明若检测到的目标位置(波峰)偏差一个采样点,误差就是 3 m。

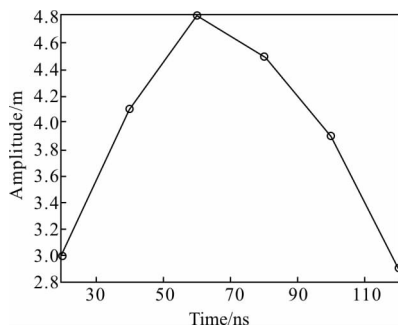


图 3 回波采样

Fig.3 Receiving waveform sampling

由以上分析,可以得出,测距精度 ΔD 与 A/D 采样芯片的采样频率的关系如公式(3)所示:

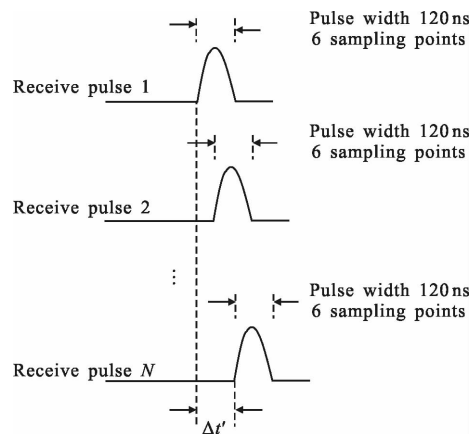


图 4 目标径向相对速度对回波累积影响

Fig.4 Influence of target radial velocity on received waveform

在文中讨论的测距系统中,设脉冲累积完成时目标真实距离和直接寻峰测距数值偏移一个采样点的情况下,目标与测距系统径向相对速度为 V_1 ,设最后一个脉冲能够累积上的情况下,目标最大径向相对速度为 V_2 ,分别讨论测距误差与径向相对速度的关系,可以得出 V_1, V_2 与采样频率 f 、脉冲发射频率 f_0 、发送脉冲个数 N 、脉冲宽度 τ 之间的关系如公式(4)和公式(5)所示:

$$N \cdot \frac{1}{f_0} \cdot V_1 \leq \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{1}{f} \quad (4)$$

$$N \cdot \frac{1}{f_0} \cdot V_2 \leq \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t' \quad (5)$$

由于脉冲累积是根据 A/D 采样后进行的采样点累积,所以由公式(5)可得:

$$N \cdot \frac{1}{f_0} \cdot V_2 \leq (\tau \cdot f - 1) \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{1}{f} \quad (6)$$

经计算可以得到 V_1 为 108 km/h, V_2 为 540 km/h, 由此可见, 要保证测距误差在 ± 3 m 以内, 目标径向相对速度不能超过 108 km/h, 常见的被测目标一般均小于该速度, 如舰船、客车。但是对于高铁等高速运动的目标, 测距精度就不能保证在 ± 3 m, 如果目标径向相对速度大于 540 km/h, 在利用多脉冲积累时, 会造成后面发送的脉冲不能有效被累积而导致检测不到目标真实距离的情况。

2 峰值点修正算法

以上是基于对称 sinc 函数进行分析计算出的误差理论值, 由于激光信号在大气中传播后, 接收的回波脉宽会被展宽, 峰值点随之发生偏移, 而且在探测器进行光电转换时由电路阻抗匹配也会造成脉宽发生展宽, 因此接收到的回波信号峰值点发生偏移而呈现非对称特点, 如果直接对回波信号进行采样处理得到的波峰是偏移过的波峰, 会给实际测量造成较大的误差^[13-14], 就文中讨论的测距系统而言, 如果直接计算, 误差往往会在 ± 3 m 以外, 经过实际测试证实了以上结论, 测距精度约在 ± 5 m。

为了减小测距误差, 文中提出用指数函数修正 sinc 函数改善寻峰精度, 即由指数函数和 sinc 函数的卷积得到修正波形, 其数学表达式为公式(7):

$$S_c(x) = \int_0^x r(t)f(x-t)dt \quad (7)$$

其中:

$$r(x) = A \cdot \text{sinc}(Bx) \quad (8)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\tau'} e^{\left(\frac{-x}{\tau'}\right)} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\tau' = \sqrt{X - \sigma^2} \quad (10)$$

$$X = W_d^2 g \left(\frac{rw}{lw} \right) \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{W_d}{g \left(\frac{rw}{lw} \right)} \quad (12)$$

式中: t 为积分变量; $r(x)$ 为 sinc 函数; $f(x)$ 为衰减函数; τ' 为修正常量; W_d 为峰值的全宽; $g \left(\frac{rw}{lw} \right)$ 为左右半宽波形的不对称量; σ 表示 sinc 函数的标准差; $S_c(x)$ 的波形如图 5 所示。

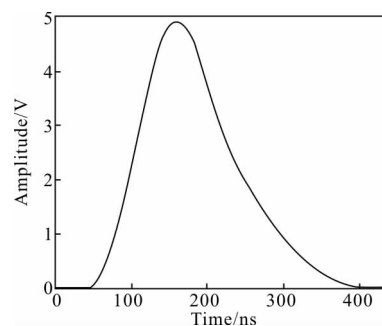


图 5 修正 sinc 波形图

Fig.5 Correction of sinc waveform

根据接收回波的非对称特性, 重新定义修正函数, 如公式(13):

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau'} e^{\left(\frac{t}{\tau'}\right)} & A_L > A_R \\ \frac{1}{\tau'} e^{\left(\frac{-t}{\tau'}\right)} & A_L < A_R \end{cases} \quad (13)$$

式中: A_L 和 A_R 分别为以 τ_B 为回波峰值点的左半峰与右半峰面积; τ' 为修正常量, 由 sinc 函数回波模型可做以下合理估值, $\sigma = \Delta\tau_B$, $W_d = 2\Delta\tau_B$, $\Delta\tau_B$ 为回波的 -3 dB 带宽, 代入公式(10)~(12)可以得到以下关系, 即公式(14):

$$\tau' = \sqrt{X - \sigma^2} = \sqrt{W_d^2 g \left(\frac{rw}{lw} \right) - \sigma^2} = \sqrt{7} \Delta\tau_B \quad (14)$$

寻找峰值较为精确的位置主要分为峰值初定位和峰值补偿校正两部分内容。首先利用多脉冲累积算法, 将各帧回波按主波发射时刻对准累加起来, 得到一个新的脉冲信号 $p(i)$, 并把该信号滤除大部分噪声, 其中保留了真实的波峰和噪声带来的伪峰值点, 对脉冲信号 $p(i)$ 进行求差分信号得到 $c(i)$, 满足差分信号等于零的点为所有可能的峰值点, 对斜率阈值进行设置可以剔除伪峰值点。由于噪声造成的伪峰也满足 $c(i)$ 为零的情况, 所以需要对 $c(i)$ 进行滤波, 可以选择高斯滤波的方法滤除噪声, 再利用幅度阈值对信号中幅度较小的伪峰值点进行滤除。通过以上步骤可以初步确定波峰位置。

然后进行峰值点校正。根据找到的波峰位置对信号进行波形重构, 计算波峰左半部分面积 A_L 和右半部分面积 A_R , 并比较二者大小, 分别对两部分波形利用指数修正函数 $f(x)$ 进行相应的指数修正^[15]。

以上方法的具体步骤如下:

Step1: 对回波信号 $p(i)$ 求差分得到信号 $c(i)$, 接

近零的点为所有可能的峰值点；

Step2: 滤除噪声和假峰。对差分信号用高斯滤波滤除满足差分信号接近零的毛刺和伪峰值点得到信号 $G_a(i)$ 。为了保持波形不变,避免峰值点处过平滑处理,降低峰值点检测的误差,此处采用高斯滤波滤除高斯白噪声；

Step3: 利用幅度阈值和斜率阈值对波峰位置进行初定位。首先将高斯滤波后的信号 $G_a(i)$ 与 $G_a(i+1)$ 的差值和斜率阈值 S_{LR} 相比较,大于 S_{LR} 的峰值点保留;然后通过幅度阈值进行定位,将经过第一次阈值定位保留下的信号与 U_A 进行对比,大于的保留,其中, $U_A=0.5\max[p(i)]$,取 $p(i)$ 为最大值的点作为中心点左右各取 M 个进行波形重构,找到初定位波峰位置 τ_B 。

Step4: 峰值点校正。以 τ_B 为中心分别求左半边和右半边波形的面积,选取合适的指数函数,进行波形拟合修正,以便得到校正后峰值点位置 τ_p 。

(1) 若 $A_L > A_R$, 则回波波峰偏左,利用指数修正函数 $f(t) = \frac{1}{\tau'} e^{\frac{t}{\tau'}}$, $\tau' = \sqrt{7} \Delta\tau_B$, 修正后得到波峰 τ_p ;

(2) 若 $A_L = A_R$, 则进行 sinc 函数拟合,得到的 τ_B 即是 τ_p 的位置。

(3) 若 $A_L < A_R$, 则回波波峰偏右,利用指数修正函数 $f(t) = \frac{1}{\tau'} e^{-\frac{t}{\tau'}}$, $\tau' = \sqrt{7} \Delta\tau_B$, 修正后得到波峰位置 τ_p 。

根据修正后所得峰值点 τ_p 的位置,可以较为精确计算发射脉冲和接收脉冲之间的时间差,从而减小测距误差。

3 实验结果与分析

实验用的激光脉冲发射波模型和峰值点位置如图 6 所示。

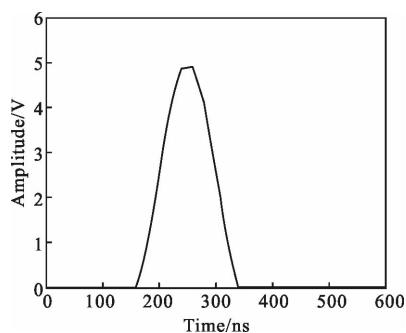


图 6 激光器发射激光波形图

Fig.6 Laser emission waveform

探测器接收的回波信号中,噪声信号的幅度可能大于信号幅度,导致无法直接检测到有用的脉冲信号,接收的回波信号中有 sinc 模型的脉冲信号和白噪声信号的叠加,在不同的信噪比下接收回波的峰值点位置会发生不同程度的偏移,如图 7 所示。

其中(a)、(c)、(e)、(g)、(i)分别表示是信噪比为 0、-2、-5、-10、-20 dB 的单次回波,(b)、(d)、(f)、(h)、(j)分别表示的是回波利用多脉冲累积 1 000 次后得到波形。

由图 7 分析可知,信噪比越低峰值点位置发生偏移越大,将图 7 中不同信噪比的回波信号多次仿真,统计分析多次仿真结果中峰值点最大偏移点数(偏移一个采样点对应的误差距离为 3 m),如表 1 所示。

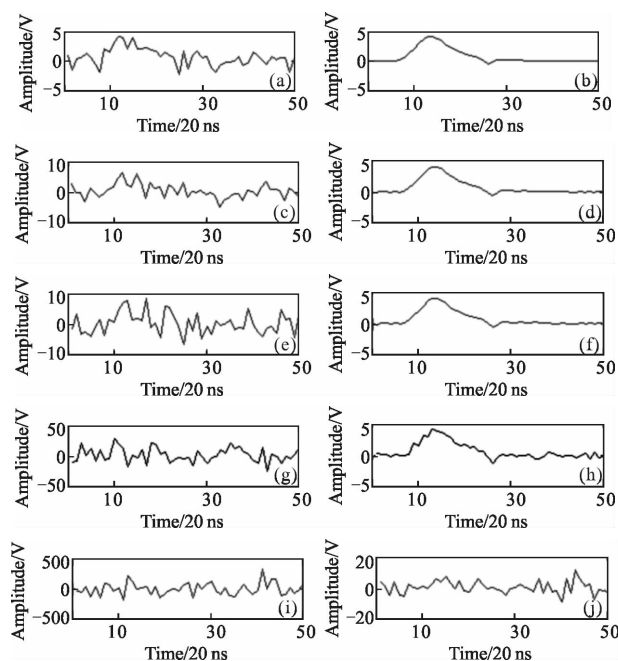


图 7 不同信噪比回波信号峰值点偏移

Fig.7 Different SNR received signal peak point offset

表 1 不同信噪比下峰值点位置平均最大偏移

Tab.1 Peak point offset of different SNR

SNR/dB	Maximum number of offset points
0	0
-5	1
-10	1
-20	2
-40	>6

对信噪比为-10 dB 的回波信号进行多脉冲积累,剔除伪峰值点并滤波后对峰值点进行初步定位,找到的峰值点如图 8 所示。

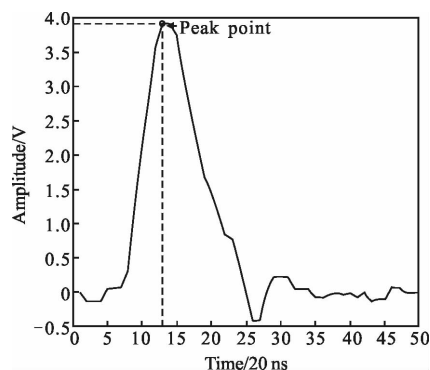


图 8 滤波和剔除伪峰后的波形

Fig.8 Waveform after filtering and eliminating spurious peaks

利用文中提出的方法对多脉冲累积波形重新拟合,拟合后的波形的点间隔为 1 ns,根据拟合重构后的波形,将波形中幅度最大的点作为峰值点位置,找到的峰值点位置与直接寻峰法找到的峰值点对应的位置如图 9 所示。

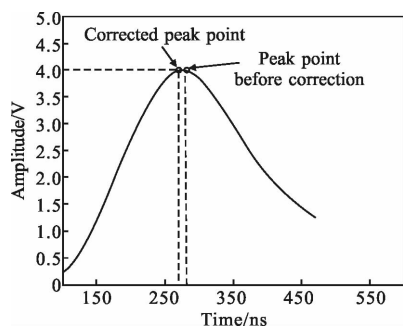


图 9 探测器接收回波峰值点校正图

Fig.9 Peak echo correction diagram of detector receiving echo

通过对不同距离的目标多次进行测量仿真实验,分别用文中提出的算法和直接寻峰算法计算被测距离,并进行测距误差比较,如表 2 所示。

把表 2 中测距数据误差分布绘制到误差分析图上,如图 10 所示。

根据对实际信号分别进行直接寻峰和利用文中提出的峰值点校正的方法进行对比分析可知,对峰值点采用指数修正函数的方法重新拟合,可以对峰值点的位置进行修正,提高被测距离的精度,减小测距误差。

表 2 不同算法的测距误差

Tab.2 Range error of different algorithms

Actual distance /m	Detecting peaks directly		Improved algorithm to detect peaks	
	Test distance/m	Error/m	Test distance/m	Error/m
100	97.0	3.0	100.9	0.9
200	203.0	3.0	201.0	1.0
500	503.0	3.0	499.1	0.9
1 000	1 003.0	3.0	1 001.1	1.1
1 500	1 497.0	3.0	1 499.0	1.0
2 000	2 003.0	3.0	1 998.8	1.2
2 500	2 497.0	3.0	2 500.8	0.8
3 000	2 997.0	3.0	3 001.3	1.3
3 500	3 497.0	3.0	3 498.8	1.2
4 000	4 003.0	3.0	4 000.9	0.9
4 500	4 504.0	4.0	4 501.3	1.3
5 000	4 995.0	5.0	4 998.5	1.5
5 500	5 505.0	5.0	5 501.5	1.5

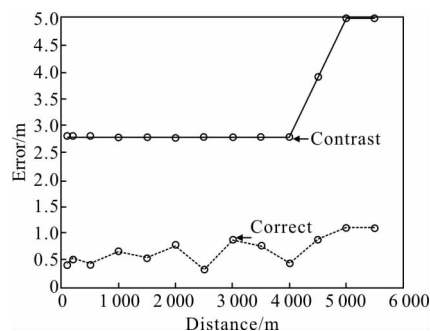


图 10 误差分析图

Fig.10 Error analysis diagram

4 结论

文中提出的算法是在高重频多脉冲积累的基础上对回波波形进行拟合修正,可以更为精确地寻找峰值点位置,从而提高测距精度,仿真结果表明,中距离测距时误差在±2 m 以内,近距离测距时误差优化在±1 m 以内,在 A/D 转换采样频率一定的情况下有效提高了测距精度,具有重要的工程意义。

参考文献:

[1] Li Xiao. High frequency and high frequency pulse ranging

- technique for laser fuze [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 李泉. 激光引信高精度高频率脉冲测距技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong. Time interval measurement method for pulse laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 99–104. (in Chinese)
- 陈瑞强, 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 99–104.
- [3] Sun Junling, Sun Guangmin, Ma Pengge, et al. Laser target localization based on symmetrical wavelet denoising and asymmetric Gauss fitting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0604001. (in Chinese)
- 孙俊灵, 孙光民, 马鹏阁, 等. 基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604001.
- [4] Shi Qiwei. Research on pulse laser range finding system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 史芪纬. 脉冲式激光测距系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [5] Shen H, Wang S, Gao Y, et al. Digital correlation detection of multi-pulse laser ranging[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(7): 161–164.
- [6] Huang Kairen, Wang Shouzeng, Zhang Xin. Research on signal process of multi-pulsed laser rangefinder [J]. *Digital Technology & Application*, 2012(11): 125–126. (in Chinese)
- [7] Occhiello E, Garbassi F, Malatesta V. The real-time realization of detecting weak multi-pulse laser echo signal[C]// International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2014: 92970I–92970I–6.
- [8] Cai Hongxia. Research on pulsed laser ranging system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014. (in Chinese)
- 蔡红霞. 脉冲式激光测距系统研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [9] Shen Z, Lan T, Liu H, et al. Dispersion and compensation of temporal pulse width for femtosecond pulse laser ranging [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(19): 5884–5887.
- [10] Zhang Xianghong, Zhang Ze. Method for improving precision of pulse laser ranging [C]// National Symposium on Signal and Intelligent Information Processing and Applications, 2014: 5. (in Chinese)
- 刘相宏, 张泽. 一种提高脉冲激光测距精度的方法[C]// 全国信号和智能信息处理与应用学术会议, 2014: 5.
- [11] Zhang Ze. Research on distinguishing technique of high precision pulsed laser ranging[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 张泽. 高精度脉冲激光测距时刻鉴别技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [12] Gao X, Qian R, Zhang Y, et al. Improved pulse laser ranging algorithm based on high speed sampling [C]// International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2016: 1015316.
- [13] Ying Huan, Wang Shaoping. Research on improving the accuracy of pulse laser ranging [J]. *Electronic Measurement Technology Electr Measur Technol*, 2014, 37 (10): 25–28. (in Chinese)
- 应欢, 王少平. 提高脉冲激光测距精度的方法研究 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 25–28.
- [14] Huang Zhao. Research on high precision key technology of pulsed laser range finding [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 黄钊. 脉冲激光测距高精度关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [15] Chen Yong, Yang Xue, Liu Huanlin, et al. Exponential modified Gaussian fitting algorithm for FBG sensing signal processing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36 (5): 1526–1531. (in Chinese)
- 陈勇, 杨雪, 刘焕淋, 等. 指数修正高斯拟合寻峰算法处理 FBG 传感信号[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1526–1531.