

基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位

孙俊灵¹, 孙光民¹, 马鹏阁², 董 涛³, 羊 毅³

¹北京工业大学信息学部, 北京 100124;

²郑州航空工业管理学院电子通信工程系, 河南 郑州 450015;

³中航工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

摘要 针对数字体制机载多脉冲激光测距机信号处理算法引入测距误差的问题, 提出减少脉冲激光回波波形失真的降噪算法以及改善激光测距精度的校正措施, 可用于脉冲激光目标的精确定位。结合数字体制多脉冲激光目标检测过程分析数字信号处理算法引入的测距误差, 指出信号采样率限制了目标定位的距离分辨率, 低通滤波环节的非线性相频特性是造成波形失真、峰值点偏移的主要因素。然后, 针对这些问题给出了改善多脉冲激光目标定位精度的具体算法: 基于对称小波基实施回波信号小波分解, 利用改进 Donoho 阈值处理小波系数, 用以减小重构目标波形峰值点位置的偏移; 采用差分组合函数搜索目标回波的峰值点, 基于非对称高斯脉冲模型进行高采样率拟合, 对峰值点位置加以校正, 改善定位的精确性。通过仿真选取合适的小波基, 对比不同算法信噪比改善及峰值点定位的性能。在室外高塔开展消光比激光测距实验, 结果显示信噪比为 1.5 的激光目标定位精度小于 2 m, 验证了多脉冲激光目标精确定位算法的性能。

关键词 测量; 测距; 机载多脉冲激光回波; 小波降噪; 非对称高斯脉冲; 目标精确定位

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604001

Laser Target Localization Based on Symmetric Wavelet Denoising and Asymmetric Gauss Fitting

Sun Junling¹, Sun Guangmin¹, Ma Pengge², Dong Tao³, Yang Yi³

¹Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Department of Electronic and Communication Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics Industry Management, Zhengzhou, Henan 450015, China;

³Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract Aiming at the problem of range error caused by signal processing algorithm of digital airborne multi-pulse laser rangefinder, a noise reduction algorithm to reduce the distortion of pulsed laser echo waveform and correction measures to improve the accuracy of laser ranging are proposed, which can be used for precise positioning of pulsed laser targets. First of all, the range error introduced by the digital signal processing algorithm is analyzed by combining target detection process of digital multi-pulse laser. It is pointed out that the signal sampling rate limits the range resolution of the target location, and the nonlinear phase frequency characteristic of the low-pass filtering is the main factor that causes the distortion of the waveform and the peak offset. Then, aiming at these problems, a specific algorithm for improving the accuracy of multi-pulse laser target localization is given. The wavelet decomposition of the echo signal is implemented based on the symmetric wavelet basis, and the wavelet coefficients

收稿日期: 2017-01-19; **收到修改稿日期:** 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61331021)、航空科学基金重点项目(2014ZC13004)、河南省高校科技创新团队支持计划(17IRTSTHN014)

作者简介: 孙俊灵(1975—), 女, 博士研究生, 主要从事激光雷达目标检测与识别方面的研究。

E-mail: sunjunling@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 孙光民(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达目标识别及神经网络方面的研究。

E-mail: gmsun@bjut.edu.cn

are processed by the improved Donoho threshold to reduce the offset of the peak position of the reconstructed target waveform. The peak point of the target echo is searched by the differential combinatorial function, and based on the asymmetric Gauss pulse model, the high sampling rate fitting is performed to correct the position of the peak point and improve the accuracy of localization. Finally, the suitable wavelet bases are selected through simulation, the improvement of signal-to-noise ratio (SNR) and the performance of peak point localization with different algorithms are compared. In the outdoor tower, the extinction ratio laser ranging experiment is carried out. The results show that the laser target localization accuracy is less than 2 m when the SNR is 1.5 and the performance of the multi-pulse laser target precise positioning algorithm is verified.

Key words measurement; ranging; airborne multi-pulse laser echo; wavelet denoising; asymmetric Gauss pulse; target precise positioning

OCIS codes 120.4630; 140.3538; 280.3640

1 引 言

激光测距机按发射激光类型可分成脉冲式和相位式两种。相位测距的测程较短,测量精度高,需要合作目标。脉冲激光测距具有较高的脉冲峰值功率,具备测程远并且无需合作目标等优点。机载脉冲激光测距机采用重复频率为 1~5 Hz 的单脉冲激光进行测距,作用距离可达数十千米。通常,模拟信号处理体制的激光测距机采用时刻鉴别法确定回波脉冲信号的位置,时刻鉴别法主要包括前沿鉴别法、恒定比值鉴别法和高通容阻鉴别法等。测距精度主要依赖于接收电路的相频特性、激光脉冲的上升沿、信噪比和脉冲激光传输的时间间隔测量精度,其中时间间隔的测量精度对测距精度起决定作用^[1]。

受到机载条件对设备体积、重量的限制,机载激光测距机难以仅通过提高激光器功率的方式增大作用距离。随着数百兆赫兹高速模数转换器(ADC)及高性能数字信号处理器(DSP)的发展,数字体制多脉冲激光测距雷达出现并应用于机载火控系统。机载多脉冲激光测距雷达连续发射激光脉冲串照射目标,接收多个目标脉冲回波信号,并利用 DSP 累加实现信噪比积累,检测远程目标^[2]。远程激光测距机的目标回波信号信噪比低,通常采用峰值检测法确定目标距离。多脉冲数字式激光测距机和单脉冲模拟激光测距机相比,同样存在接收信号处理电路非线性相频特性导致的目标波形畸变、峰值点偏移的问题。但前者还受到数字化采样率对距离分辨率的限制,并且低信噪比下为了增强信噪比所采用的回波信号处理算法引入的目标距离判定误差也不容忽视^[3-4]。这些影响主要体现在激光目标回波信号滤波、目标波形提取、峰值点判决等处理环节。本文主要对比分析现有数字化多脉冲激光回波信号处理算法对目标定位精度的影响,提出可减小波形失真的小波降噪算法,并基于非对称高斯脉冲拟合改善定位精度。

2 多脉冲激光回波处理算法对目标定位精度的影响分析

机载多脉冲激光雷达的多脉冲串重复频率通常为 1~20 Hz。对于 10 Hz 的脉冲重复频率,机载多脉冲激光雷达每隔 100 ms 连续辐射多个激光脉冲,脉冲之间间隔数百微秒。如图 1 所示,多脉冲激光测距雷达依照一定采样率(数百兆赫兹以上)对探测接收的多脉冲回波信号进行数字化采集,在处理器内将多脉冲回波数据按照主波时刻对准后累加,再进一步滤除噪声从而提高信噪比,然后基于虚警概率设置的阈值处理提取多个潜在目标的峰值点位置,之后利用多个重复周期的运动特征进行相关匹配以剔除虚假目标,判决检测真实目标并输出目标距离^[5]。针对脉宽为 17~20 ns 的发射激光,经过大气传播、目标反射及光电探测接收等环节,目标回波信号会被展宽为约 50 ns 的脉冲波形^[6]。其中,接收通道的相频特性是影响目标回波波形

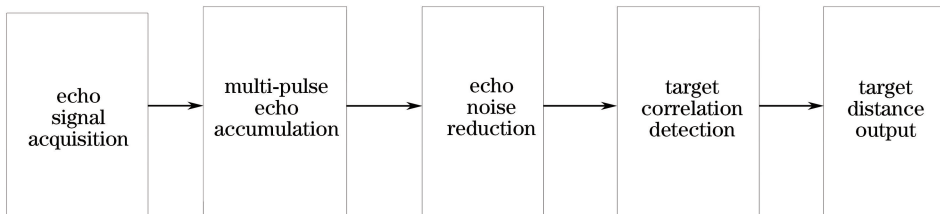


图 1 多脉冲激光目标检测流程

Fig. 1 Process of multi-pulse laser target detection

变化的主要因素。对接收的回波信号进行数字化处理能够改善信噪比,但由于处理过程不具备线性相频特性,因此目标脉冲回波波形会发生畸变,导致峰值点位置偏移,影响激光目标定位的精度。

2.1 多脉冲激光回波累加

在多脉冲回波累加过程中 DSP 将各帧回波按主波同步时刻对准,然后把 N 帧脉冲回波数据累加起来。这一累加过程会获得 \sqrt{N} 的信噪比增益^[7]。但在目标运动、噪声等因素的影响下多帧回波数据对准存在随机误差,造成累加后的回波脉冲展宽,峰值点位置发生偏移,影响激光目标定位的精度。累加前滤波以及对目标运动速度的估计和补偿可以降低累加引入的误差。

2.2 激光回波信号降噪

2.2.1 脉冲激光目标回波波形

图 2 给出了幅度信噪比(SNR)分别为 7 和 3 的光电接收脉冲激光回波波形。可以看出,信噪比较大时脉冲回波信号波形表现出较强的下冲特性;信噪比较小时,下冲能量变小,波形上升沿陡峭,下降变化较为缓慢。脉冲激光目标回波波形总体上表现为非对称的高斯脉冲波形,这一波形特性与接收电路带宽、目标反射特性等因素有关,会导致峰值点位置通常出现在脉冲前沿。

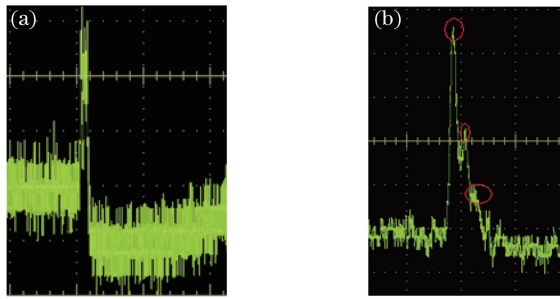


图 2 激光回波波形。(a) SNR 为 7;(b) SNR 为 3
Fig. 2 Laser echo waveform. (a) SNR is 7; (b) SNR is 3

2.2.2 时域数字平滑滤波

针对激光目标脉冲回波信号的特点,在时域通常采用隔点差分加平滑滤波算法降低噪声影响。首先,采用隔点差分去除信号中的直流分量。其中,差分相隔的点数 M 的选择应与目标脉冲宽度匹配。之后,再采用 N 点平滑滤波对高频噪声加以抑制。为了与目标脉冲宽度相匹配,通常取 $N=M$ 。数字平滑滤波的数学表达式为^[8]

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [x(n+i) - x(n+i-M)]. \quad (1)$$

时域平滑滤波的运算量较小,便于实时实现。实际激光目标检测应用采取多级脉冲宽度匹配数字滤波措施,起始时采取较窄的平滑窗口,在目标检测与跟踪过程中,可根据当前噪声状况对平滑窗口宽度进行适当调整。

2.2.3 小波域分解系数删除重构降噪

小波分析对低信噪比信号有很好的检测性能。Malla 算法采用正交镜像滤波器组对离散序列进行小波分解及重构。激光回波信号能量主要集中于低频信息,高频信息中 useful 信息较少。因此,对信号进行小波分解后的大部分高频系数可作为噪声删除。小波系数删除通常采用软阈值、硬阈值等处理算法^[9-10]。对处理后的小波系数再利用小波重构完成降噪。

2.2.4 低通滤波的非线性相频特性导致峰值点位置发生偏移

时域平滑及低频重构小波降噪算法均属于低通滤波算法。图 3(c)给出了删除全部高频小波分解系数后仅利用低频小波系数重构的回波信号波形,可以看出回波噪声得到了有效降低,但波形的细节特征丢失,峰值点位置发生了一定偏移。图 3(d)显示时域平滑滤波($M=6$)后输出信号的峰值点位置发生了较大的偏移。平滑滤波、低频小波重构等降噪方法都是对回波信号中占主要成分的低频能量进行积累平均,其结果导致原本陡峭的目标回波脉冲前沿变得平缓,峰值点位置发生偏移。从信号与系统的关系来看,低通滤波环节

的非线性相频特性是造成激光目标波形发生畸变失真、峰值点偏移的主要原因。将时域数字平滑滤波设计为具有线性相位的有限脉冲响应(FIR)滤波器,或者选择具备对称特性的小波基进行小波变换,是减少滤波波形失真的有效途径。

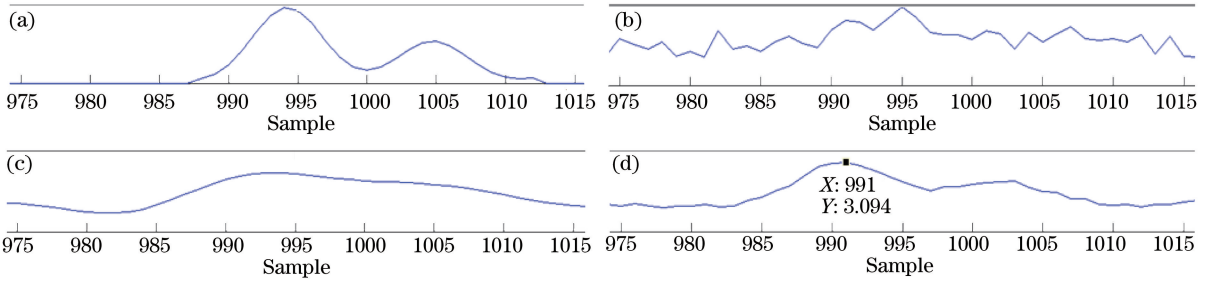


图3 (a)原始脉冲激光目标回波波形;(b)信噪比为1.5的含噪回波信号;
(c)小波分解低频系数重构降噪输出信号;(d)时域数字平滑滤波输出信号

Fig. 3 (a) Original pulse laser target echo waveform; (b) signal containing noise when SNR is 1.5;
(c) denoising output signal with wavelet decomposition and low frequency coefficient reconstruction;
(d) time domain digital smooth filtering output signal

2.3 峰值点位置的检测与估计

远程激光测距机的目标位置是通过目标回波波形的峰值点来定位的。回波中随机噪声的叠加使峰值点偏离回波脉冲中心。目标的精确定位在于准确提取目标回波波形的峰值点。这一问题可以看作在低信噪比下根据含噪信号波形估计出目标脉冲的峰值点位置。目前,极大值搜索的方法用于检测峰值点。需要强调的是,发射脉冲宽度及数字信号采样率会限制目标距离的最小分辨率。采样率为200 MHz,采样间隔为5 ns,在测距量程上一个样本点代表的测量距离为0.75 m。而基于已知脉冲激光目标回波的波形模型,利用获取的低采样率目标波形序列进行高采样率拟合,重构脉冲波形并对峰值点位置加以校正,可以改善目标定位的精度。

3 多脉冲激光目标精确定位算法

多脉冲激光目标精确定位算法是在对现有多脉冲激光目标检测算法加以完善的基础上得到的,用于检测到目标位置后,对一定距离波门内的原始回波信号数据进行再处理以获取精确的目标位置。需要精确定位的目标波门内的信号可以表示为

$$f(k) = s(k) + n(k), k = L - N, \quad (2)$$

式中 $f(k)$ 为含噪回波序列, $s(k)$ 为由长度 $L (L < N)$ 的目标波形序列补零得到的 N 点序列, $n(k)$ 为随机高斯白噪声。

算法步骤如下:

1) 对信号 $f(k)$ 进行离散小波分解,得到小波系数高频部分 $d_{j,k}$ 和低频部分 $c_{j,k}$, 尺度 $j = 0 \sim J$, 序列长度 $k = 1 \sim N$ 。考虑到回波处理过程的线性相频特性要求,选择具有良好对称性的小波基进行小波变换,这对于精确提取目标波形峰值点位置非常重要。

2) 利用改进 Donoho 阈值处理得到的高频小波分解系数 $d'_{j,k}$, 结合低频小波系数 $c_{j,k}$, 重构时域目标回波波形 $f'(k)$ 。针对小波分解的高频系数 $d_{j,k}$, 设定合适的阈值,认为小于该阈值的小波系数由噪声产生而将其去除,大于该阈值的小波系数由信号产生而将其保留或收缩。基于 Donoho 阈值处理的小波降噪可以较好地保留原始信号的波形。考虑到激光回波信号和噪声的小波变换系数模值随尺度 j 变化,因此在固定阈值的基础上,随尺度及噪声因子改进阈值,改进阈值的表达式为^[11]

$$T_{LW} = \frac{\gamma\sigma\sqrt{2\ln N_j}}{\ln(j+1)}, \quad (3)$$

式中 σ 为噪声强度, N 为信号的长度, γ 为噪声调整因子,可根据噪声类型评估进行调整,高斯白噪声为1,非高斯脉冲噪声 γ 小于1。 j 为小波尺度, N_j 为第 j 层信号的长度。当 j 增大时,噪声的小波系数减小,阈值也

减小。 $d'_{j,k}$ 可以表示为

$$d'_{j,k} = T_h(d_{j,k}, \lambda) = \begin{cases} 0, & |d_{j,k}| < \lambda \\ d_{j,k}, & |d_{j,k}| \geq \lambda \end{cases} \quad (4)$$

T_h 为处理函数。

3) 针对小波降噪后的时域序列 $f'(k)$, 结合时域阈值比较, 得到目标波形序列 $s'(k-i)$, 其中 $i = N_0 \sim N_0 + L'$, $s'(k - N_0)$ 为目标波形的起点, 序列长度为 L' 。回波信号噪声状况可通过选取噪声数据样本计算其均方根值 V_{RMS} 加以评估, 可以表示为

$$T_{\text{TD}} = a \times V_{\text{RMS}} = a \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [n(k) - \bar{n}]^2}, \quad (5)$$

式中 a 为调整系数, 通常可依据虚警率要求取值为 $2 \sim 5$ 。

4) 针对得到的目标波形, 按极大值点计算搜索得到峰值点。峰值点位置可在时域由差分计算的组合构建检测函数得到。定义一阶前向差分为 $\Delta f(n)$, 一阶后向差分为 $\nabla f(n)$, 二阶前向差分为 $\Delta^2 f(n)$, 二阶后向差分为 $\nabla^2 f(n)$ 。若 $n = k \in N$, 在 k 的 $\epsilon > 0$ 邻域内, k 为局部极大值点, 则有以下关系成立:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f(k) &< 0 \\ \nabla f(k) &> 0 \\ \Delta^2 f(k) &< 0 \\ \nabla^2 f(k) &> 0 \end{aligned} \right\} \circ \quad (6)$$

考虑到噪声的影响, 设定一个峰值检测门限 T_r , 有

$$\left. \begin{aligned} f(k) &\geq T_r \\ \Delta f(k) \nabla f(k) &< 0 \\ \Delta^2 f(k) \nabla^2 f(k) &< 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

式中 $n = k$ 时对应的 $f(k)$ 为序列 $f(n)$ 的一个峰值点, 由此可以计算出 $f(n)$ 的所有峰值点及其对应位置。

5) 基于非对称高斯脉冲拟合校正目标波形峰值点位置。如前所述, 脉冲激光回波信号的波形可采用非对称高斯脉冲函数表示, 如图 4 所示。

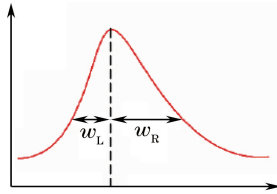


图 4 非对称高斯脉冲波形示意图

Fig. 4 Diagram of asymmetric Gauss pulse waveform

定义这一非对称高斯脉冲波形的数学表达式为高斯函数与衰减函数的卷积^[12]:

$$h_{\text{pulse}}(x) = \int_0^x G(t) H(x-t) dt, \quad (8)$$

式中

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{x}{\tau}\right), & x \geq 0 \end{cases}, \quad (10)$$

式中 t 是积分变量, $G(t)$ 是高斯函数, $H(x)$ 是衰减函数, τ 为修正常量。非高斯脉冲波形标准差可表示为

$$\sigma = \frac{W_a}{f(w_L/w_R)}, \quad (11)$$

式中 W_a 表示峰值的全宽, $\tau = \sqrt{M - \sigma^2}$, $M = W_a^2 f(w_L/w_R)$ 。根据上一步检测到的目标波形序列估计 w_L 、

ω_R 及 W_a , 进一步计算修正参数 τ , 按照 500 MHz 采样率依(8)式拟合重构非对称高斯脉冲波形, 获取高精度的峰值点位置。

综上所述, 采取对称小波降噪和非对称高斯脉冲拟合等措施, 可以对数字化处理体制的单脉冲及多脉冲激光目标实施精确定位。

4 仿真实验及分析

多脉冲激光目标精确定位算法的核心在于如何减小波形畸变, 因此小波基函数的选择以及算法的降噪性能需要加以仿真验证, 而外场实验可以获取在接近真实应用条件下的实验数据。

4.1 激光回波小波降噪的小波基函数选择

依照信噪比为 1.5 对仿真的高斯脉冲激光目标波形混合高斯白噪声, 选择阶数 N 为 4 的三种小波基 (Daubechies 小波族、Symlets 小波族、Coiflet 小波族) 进行正交离散小波分解, 分解尺度为 3 级, 得到改进 Donoho 阈值处理降噪后的波形。

图 5 给出了利用 Db4、Coif4、Sym4 三种小波基对含噪激光目标回波信号进行 Donoho 小波阈值处理, 重构降噪后的波形。可以看出, 采用非对称特性的 Db4 小波基时, 目标波形峰值点局部波形存在一定畸变失真, 峰值点出现较大偏差。选择对称性较好的 Sym4 和 Coif4 小波基降噪后的目标波形失真及峰值点位置偏移较小。下述仿真选用 Sym4 小波基。

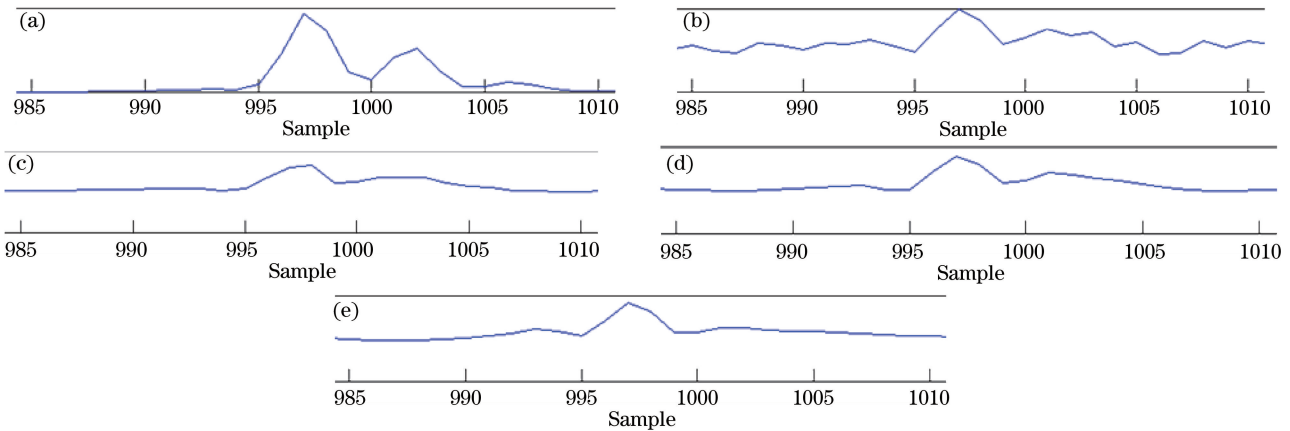


图 5 (a) 目标波形; (b) SNR 为 1.5 时的回波信号; (c) 采用 Db4 时 Donoho 阈值去噪; (d) 采用 Coif4 时 Donoho 阈值去噪; (e) 采用 Sym4 时 Donoho 阈值去噪

Fig. 5 (a) Target waveform; (b) echo signal when SNR is 1.5; (c) Donoho threshold denoising with Db4; (d) Donoho threshold denoising with Coif4; (e) Donoho threshold denoising with Sym4

4.2 激光回波降噪性能对比

多脉冲激光测距机接收的回波信号脉宽为 50 ns, 依照幅度信噪比 1.5 混合高斯白噪声, 采用数字平滑滤波(SF)算法、低频重构小波降噪(LFRD)算法、改进 Donoho 小波降噪(IDTD)算法进行 100 次降噪处理, 统计回波信噪比增益改善。

表 1 给出了信噪比增益改善的统计结果。可以看出, 经三脉冲累加后信噪比可以提高 1.7 倍。采用窗口宽度为 3 点的平滑滤波, 其信噪比改善没有窗口宽度为 6 点的效果好。这是因为 $M=6$ 与目标脉冲宽度更为匹配。要指出的是, 由于 IDTD 算法保留了一部分高频小波系数, 因此该算法的信噪比改善没有 LFRD 显著, 但 IDTD 降噪后的回波波形峰值点位置更接近真实值。

表 1 不同信号处理算法的信噪比增益

Table 1 SNR gain of different signal processing algorithms

Algorithm	Sum(3)	SF($M=3$)	SF($M=6$)	LFRD	IDTD
SNR gain	1.7	1.8	2.5	4.1	3.5

4.3 基于室外高塔开展消光比测试的激光目标测距实验

如图 6 所示,消光比测试实验中,实验系统包括光学平台、三脉冲激光测距机、大口径光学衰减片、显示控制台等,这些实验设备放置在近场高塔,目标为 4.176 km 远的外场高塔。激光测距机发射脉宽为 20 ns、波长为 1064 nm 的激光,脉冲串重复频率为 5 Hz,多脉冲间隔为 500 μ s。按照一定倍率(5 dB~50 dB)更换衰减片,采集目标距离信息。数字处理器采用 DSP 和现场可编程门阵列(FPGA)双核处理器,FPGA 用于回波采集与信噪比积累的处理,DSP 负责目标距离检测及精确定位(DSP 同时输出回波信号的幅度信噪比)。回波信号数字化采样率为 200 MHz,重构过采样率为 500 MHz。

采用三种降噪算法滤波后直接检测峰值点的位置,与采用 IDTD 降噪后利用非对称高斯脉冲拟合校正所得到的峰值点位置进行对比。图 7 给出了不同算法在不同信噪比下进行 100 次目标检测后的目标定位精度变化曲线。

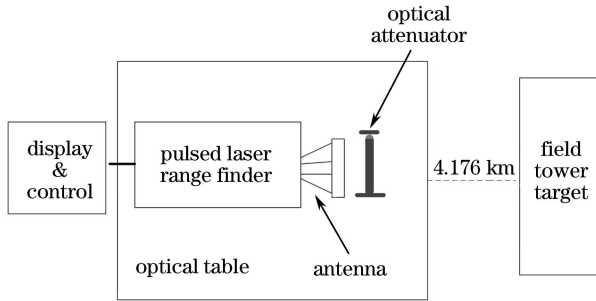


图 6 实验系统配置示意图

Fig. 6 Diagram of test system configuration

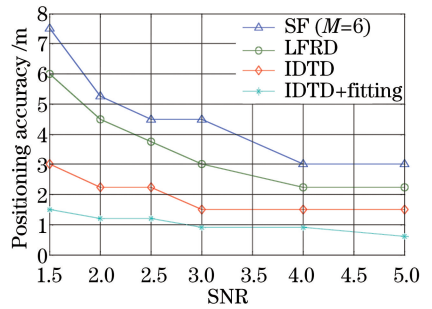


图 7 不同算法目标定位精度变化曲线

Fig. 7 Curves of target positioning accuracy with different algorithms

由图 7 可以看出,大信噪比时激光目标定位偏差小,各算法的定位精度差别不大;信噪比较低时目标定位偏差逐渐变大,采用对称小波基 IDTD 降噪后检测峰值点的定位精度明显优于数字平滑滤波及低频重构滤波算法;在进行 IDTD 降噪后再利用非对称高斯脉冲拟合对峰值点位置进行校正,多脉冲激光目标定位精度改善至 2 m 以内。

5 结 论

分析了机载多脉冲激光回波信号数字化处理引入的测距误差,指出了低通滤波算法导致目标波形失真、峰值点偏移以及采样率对最小距离分辨率的限制是影响目标定位精度的主要因素。针对滤波后波形失真给出了基于对称小波基及改进 Donoho 阈值处理的小波降噪算法,该算法有效减小了峰值点位置的偏移。在此基础上,采用提出的激光回波波形非对称高斯脉冲拟合方法进一步校正峰值点位置,实现目标的精确定位。室外消光比法激光测距实验证明,所提算法可以有效改善低信噪比时目标定位的精度。要指出的是,远程运动目标的机载多脉冲激光测距需要考虑目标距离、运动速度、大气展宽及目标反射展宽等因素。针对动态目标的精确定位问题,在晴朗、高空条件下已经进行了多次外场实验,基于所提算法提取目标波形,结合三脉冲激光目标检测过程得到的运动状态、目标波形宽度等信息对非高斯脉冲拟合加以修正及补偿,降低了远程运动目标的定位误差,其性能与静态目标消光比实验的结果基本符合。复杂天气条件下,发射脉冲个数更多、发射脉冲宽度更窄的多脉冲体制动态目标精确定位还需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] Zhang Haifeng, Meng Wendong, Wu Zhibo, *et al.* One way laser ranging and its measuring experiment[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308005.
 张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.

[2] Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi, *et al.* Algorithm of improving multi-pulsed LADAR range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2540-2545.
 马鹏阁, 齐 林, 羊 毅, 等. 机载多脉冲激光雷达作用距离增强算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2540-

2545.

- [3] Wang Dan, Zhao Xin, Zou Yonggang, *et al.* Research on filtering algorithm based on laser ranging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101402.
王 丹, 赵 鑫, 邹永刚, 等. 基于激光测距系统的滤波算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101402.
- [4] Cheng Pengfei. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 86-108.
程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 86-108.
- [5] Xia Guifen, Zhao Baojun, Han Yueqiu. Target detection in three pulse laser radar[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(3): 137-140.
夏桂芬, 赵保军, 韩月秋. 三脉冲激光雷达的目标检测[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 137-140.
- [6] Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi, *et al.* Study on airborne multi-pulse lidar target signal simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0128001.
马鹏阁, 齐 林, 羊 毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0128001.
- [7] Duan Yihao, Zhang Aiwu, Liu Zhao, *et al.* A combination method of wavelet transform and generalized Gaussian model for airborne laser scanning waveform decomposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122802.
段乙好, 张爱武, 刘 诏, 等. 一种用于机载激光雷达波形分解的小波变换与广义高斯模型组合法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122802.
- [8] Wu Guifang, He Yong. Application of wavelet threshold denoising model to infrared spectral signal processing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(12): 3246-3249.
吴桂芳, 何 勇. 小波阈值降噪模型在红外光谱信号处理中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3246-3249.
- [9] Peng Yuhua. An improved thresholding method in wavelet transform domain for denosing[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(8): 119-123.
彭玉华. 一种改进的小波变换阈值去噪方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 119-123.
- [10] Ma Pengge, Liu Yi, Qi Lin, *et al.* Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR[J]. Electronics Optics and Control, 2011, 18(4): 26-29.
马鹏阁, 柳 毅, 齐 林, 等. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. 电光与控制, 2011, 18(4): 26-29.
- [11] Zeng Chang'e, Wang Qianqian, Chang Gang, *et al.* Novel method for maximum range measure of pulse laser range finder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 664-668.
曾嫦娥, 王茜茜, 常 岗, 等. 脉冲激光测距机最大测程测试方法研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 664-668.
- [12] Chen Yong, Yang Kai, Liu Huanlin. A Self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
陈 勇, 杨 凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.