

文章编号: 1001-3806(2019)01-0063-06

基于小波阈值法的激光雷达回波信号去噪研究

王涛¹, 沈永辉¹, 姚建铨²

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130; 2. 天津大学 精仪学院激光与电子研究所, 天津 300130)

摘要: 为了对激光雷达探测回波信号去噪进行研究, 基于小波阈值法分析了激光雷达发射和探测回波信号, 创建了基于 MATLAB 仿真平台的模型, 研究了阈值法中选择各参量的策略, 结合激光雷达信号和噪声特性, 选取了去噪处理中的最佳参量, 并进行了4种阈值策略的仿真实验, 实现了对探测回波信号中目标信号的有效提取和去噪。结果表明, 对于低信噪比信号, 同一基函数分解层越高去噪效果越好, 在分解层数 j 为 4~5 时去噪效果最好; 对于高信噪比信号, 同一基函数分解层越低去噪效果越好, 在 $j=3$ 时去噪效果最好, 并且信号 db9 基函数去噪效果好于 db2 基函数去噪效果。此研究获得了较为理想的去噪结果。

关键词: 信号处理; 阈值去噪; MATLAB 仿真; 最佳参量

中图分类号: TN958.98; TN911.74 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2019.01.013

Research on laser radar echo signal denoising based on wavelet threshold method

WANG Tao¹, SHEN Yonghui¹, YAO Jianquan²

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjing 300130, China; 2. Institute of Laser and Electronics, Tianjin University, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to study the de-noising of laser radar detection echo signal, the laser radar transmitting and detecting echo signal were analyzed based on the wavelet threshold method, and a model based on MATLAB simulation platform was created. The strategy of selecting the parameters in the threshold method was studied, and the best parameters in the denoising were selected combined with the characteristics of the laser radar signal and noise. The simulation experiments of four kinds of threshold strategies were carried out to achieve the effective extraction and denoising of the target signal in the detection echo signal. The results show that, for the low signal-to-noise ratio signal, the higher the decomposition layer of one base function is, the better the denoising effect is. The de-noising effect is the best when the decomposition layer $j=4\sim 5$. For the high signal-to-noise ratio signal, the lower the decomposition layer is, the better the denoising effect is, the best at $j=3$. And the denoising effect of the signal db9 base function is better than that of the db2 base function. An ideal denoising result is obtained in this study.

Key words: signal processing; threshold denoising; MATLAB simulation; best parameter

引言

激光雷达^[1-2]作为现代激光与传统雷达技术相结合的崭新测量工具, 是集成了光、机、电等多领域的产物^[3]。它将能量辐射到空间并且探测由物体反射的回波信号, 确定目标的位置并获得与目标有关的其它

信息, 且激光雷达正在向多功能、多波段、高性能发展^[4], 在各领域展示着美好的应用前景^[5], 在航天、军事、民用邻域也发挥着越来越重要的作用^[6-7], 比如许多国家正在研制直升机用的障碍规避激光雷达^[8], 也可以利用激光雷达进行大气污染监控^[9]; 激光雷达可以利用差分吸收、差分散射、弹性后向散射、感应荧光等原理, 实现化学生物战剂的探测, 而化学和生物战剂探测激光雷达采用的激光器主要是 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器^[10-11]等。同时, 激光雷达广泛的应用也对目标回波探测信号处理能力提出新的挑战, 信号处理的目的是对回波信号进行准确分析、诊断、压缩和量化, 并

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775166)

作者简介: 王涛(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与激光一体化技术的研究。

E-mail: 473336389@qq.com

收稿日期: 2018-03-05; 收到修改稿日期: 2018-03-30

快速实现信号的传递和存储、精确重构^[12]。由于复杂多变的探测环境的影响,激光雷达回波信号不仅携带目标的信息成分,而且更多的是噪声信号,甚至表现为目标信号被淹没的情况,因此如何实现噪声的去除,有效提取目标对象信息成为探测系统的首要任务和难点。小波变换是在傅里叶变换基础上延伸的具有多分辨率的信号处理工具,不仅能够实现对信号的保留,还能够最大程度地实现噪声成分的去除,利用小波工具对信号进行去噪处理被称为最好的方法。本文中正是基于小波阈值法^[13]对激光雷达回波信号去噪分析处理。

1 激光雷达探测信号模型的建立与仿真

1.1 激光雷达发射探测脉冲模型的建立与仿真

激光雷达探测系统以大功率窄脉宽激光器为激光光源,且发射信号是脉冲宽度为纳秒量级的高斯脉冲信号,其理论模型为:

$$f(t) = A_0 \exp\left[-\frac{(t-u)^2}{b^2}\right] \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 是被分析信号, A_0 是激光脉冲最大幅度, u 是激光脉冲峰值位置, b 是纳秒量级激光脉冲宽度, t 是阈值。基于 MATLAB 平台获得激光雷达理想发射脉冲信号,如图 1 所示,本文中所有图的横纵坐标均无单位。

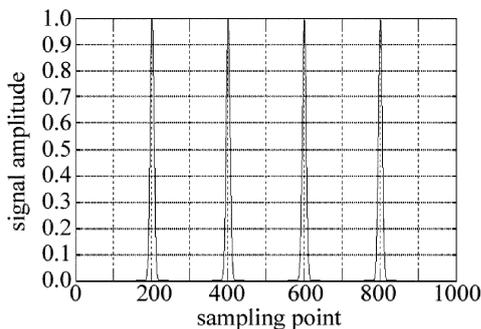


Fig. 1 Ideal Gaussian pulse signal model

1.2 激光雷达探测回波脉冲模型的建立与仿真

激光雷达回波信号中受到光电探测器和前置放大电路的噪声影响。通过对噪声特征的详细分析,通常将噪声的叠加和近似等效为高斯白噪声的模型。

模拟接收机端的回波信号是理想高斯脉冲信号与高斯白噪声的混合形式,并给出叠加噪声的数学模型:

$$f_i = g_i + \varepsilon_i, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中, f_i 是含噪信号; g_i 是理想回波信号,表现为低频; ε_i 是噪声信号,表现为高频;理想脉冲信号 g_i 与噪声

信号 ε_i 之间是相互独立的,利用 MATLAB 建立回波探测信号,如图 2 所示。

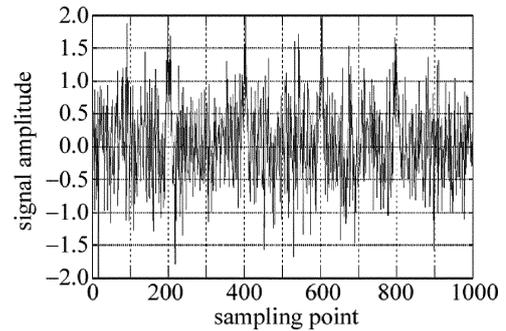


Fig. 2 Lidar echo detection signal

2 基于阈值法的激光雷达回波探测信号去噪

2.1 小波阈值去噪流程

在激光回波探测信号中,高频成分主要以噪声为主,转换到小波域,以高频系数为主要表现形式,因此,阈值法是通过一定的规则对小波域中表征噪声的高频系数执行置零、收缩或保留的操作,从而达到信号去噪的目的。

去噪的步骤如下:(1)结合激光雷达信号的特征,选择具有高相似性的小波基,并实现对含噪信号 $f(x)$ 的 j 层小波分解,小波分解的结果是产生信号的近似系数和细节系数;(2)对探测信号在小波域中的近似表征进行保留,通过一定选取规则对各细节表征计算选取合适的阈值 t ;(3)比较各细节系数与阈值 t 的大小,进行阈值处理;当第 j 层中的第 k 个系数 $w_{j,k}$ 较阈值 t 小时, $w_{j,k}$ 被认为是噪声的表征系数,对 $w_{j,k}$ 执行置零操作;当第 j 层中的第 k 个系数 $w_{j,k}$ 较阈值 t 大时, $w_{j,k}$ 被认定是信号的表征,对 $w_{j,k}$ 保留;(4)通过对小波域中处理后的表征系数执行重构操作后,去除噪声并恢复目标信息。

2.2 小波基和小波分解层数的确定

利用小波解决工程问题的第 1 步就是对问题选取合适的基函数,由于基函数的种类繁多,不同小波的性质也有巨大的差异,所以合适的基是解决问题的关键一步。通过分析与研究表明,使用相同的基对不同的工程问题执行去噪会产生不一样的结果;同样,对解决相同的问题由于基的不同,去噪结果也具有显著差异,因此,基函数的选择是至关重要的,并且小波的各种性质是作为进行不同类型信号处理问题时的基选择的基本原则;其次,小波与被分析的信号的相似程度也是进行合适基函数选取的重要原则,同时,具有较好相似性

的基函数能实现信号能量的集中,简化计算量,实现重构信号的最小失真。

影响小波分析的另一因素是进行处理时的分解层数的选择。层数通常与信号有着密切的关系,表现为层数越多,目标特征表现越明显,去噪重构后的信号也越好,去噪后信噪比越高。与此同时,在进行重构时,信号的失真现象也越明显,运算量也相应增加。在进行问题处理操作时,针对不同信噪比的信号,小波去噪具有最佳的层数,一般情况下, j 为3~5,信噪比越高,其值相对较小,信噪比越低,其取值越高才能实现更好的信噪分离。

2.3 阈值的确定

在小波的阈值去噪法中,阈值的选择关系到噪声成分去除的程度,而阈值通常跟噪声的方差紧密相关,因此,首先需要估计噪声方差。

根据小波分解理论的特点,通常能将目标成分能量聚集到大尺度上幅值较大的系数中,而小尺度中以高频能量为主要表征;对含噪波形而言,高频主要表现为部分信号与噪声的混合能量且噪声能量相对较大;通常对含较多噪声的信号,将小尺度或尺度 $m=1$ 的分解量看作噪声量,用来计算噪声方差。

DONOHO 和 JOHNSTONE 给出了噪声方差的估计:

$$\sigma = \frac{\text{mid}(w_{1,k}, 0 \leq k \leq 2^{m-1} - 1)}{0.6745} \quad (3)$$

式中, m 为尺度数, σ 为噪声方差, $w_{1,k}$ 为第一尺度上的分解系数,mid表示取中值运算。由于用此计算的噪声方差对信噪比较大的信号偏大,因此提出了全局方差和局部方差两种改进方法。

2.3.1 全局方差 全局方差就是对含噪信号进行小波分解,然后对所有高频系数求中值来计算方差^[14]。经实验验证,运用全局方差去噪后,虽然具有突出的去噪效果,但基于计算数据多造成了其计算速率较慢。

2.3.2 局部方差 局部方差是对含噪信号进行小波分解后,对各个高频尺度上的系数分别计算噪声方差^[15]。经实验验证,该方法的去噪性能一般,但计算速率较快。合适的阈值能达到对目标信息的最大保留和噪声的最大滤除。若使用阈值不合适,则去噪重构后依然存留噪声或是目标关键信息过度去除,容易造成还原失真;在建立激光雷达信号噪声为白噪声的模型下,估计噪声强度。

下面介绍几种经典的选择阈值规则。

(1)通用阈值 T_1 (sqtwolog 规则)。对 $f(n)$ 执行 m

尺度分解操作后,在尺度 $1 \sim m(1 < i < m)$ 上的系数个数为 n ,则阈值为 $T_1 = \sigma\sqrt{2\ln(n)}$ 。阈值是基于信号长度的,通常,较长的信号计算的结果越大,处理后的系数更多被置零,易于实现对系数的“过扼杀”现象,效果不理想。

(2)Stein 无偏风险阈值 T_2 (rigrsure 规则)。该阈值是利用无偏似然估计原理的自适应阈值估计^[16],且有如下规则:设 s 是以分解处理后的系数的平方为元素的量,即 $s = [w_1^2, w_2^2, \dots, w_n^2]$,且有各元素之间的关系为 $w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_n$,存在风险值 r 为:

$$r = \frac{[n - 2i - (n - i)w_1 + \sum_{i=1}^n w_i]}{n}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

取上述元素中的最小 r_i 为风险值,找出相应的 w_i ,则阈值为 $T_2 = \sigma\sqrt{w_i}$ 。

(3)启发式阈值 T_3 (heursure 规则)。启发式阈值是上述两类阈值的结合,且计算所得为最优预测变量的结果^[17]。

具体阈值选取规则为:

$$T_3 = \begin{cases} T_1, (\eta < \mu) \\ \min(T_1, T_2), (\eta > \mu) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\eta = (s - n)/n$, $\mu = (\log_2 n)^{\frac{3}{2}}\sqrt{n}$ 。

(4)最大最小则阈值 T_4 (minimaxi 规则)。该阈值是固定阈值形式^[18],是基于统计学极值定理的估计方法,并有阈值选取规则为:

$$T_4 = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.1829\log_2 n), (n > 32) \\ 0, (n < 32) \end{cases} \quad (6)$$

式中, n 为系数个数, σ 为噪声方差。

对上述4种阈值模型进行总结:minimaxi 规则和 rigrsure 规则估计的值比较保守,往往产生的是欠去噪的表现,去噪结果中还存留噪声成分;sqtwolog 规则和 heursure 规则能实现噪声彻底去除,同时信号重构具有失真影响。4种规则都不能实现最合适的去噪效果,以分析不同噪声类型、不同强度的工程问题选择不同符合标准的规则很重要,需对不同情况仔细斟酌后选取。

2.4 阈值函数的选取

在运用阈值法解决问题过程中,上述几个参量的选择会明显影响去噪结果,但由于分解的实质是将信号和噪声能量表现在一系列不同幅值的系数上,因此,采取怎样阈值处理策略执行不同系数的处理也是一个

重要问题, 阈值函数就是一类实现对不同系数执行不同操作的规则。

2.4.1 硬阈值 硬阈值函数是对存在于某一门限两侧的系数执行不同置零或保留处理操作的函数, 即:

$$W_t = \begin{cases} W, & (|W| \geq t) \\ 0, & (|W| < t) \end{cases} \quad (7)$$

式中, W 表示小波系数的值; W_t 是处理后的小波系数值; t 是阈值, 取值可按上面的 4 种模型计算得到。

2.4.2 软阈值 软阈值函数是对存在于某一门限两侧的系数执行不同置零或收缩处理操作的函数, 即:

$$W_t = \begin{cases} \left(1 - \frac{t}{|W|}\right)W, & (|W| \geq t) \\ 0, & (|W| < t) \end{cases} \quad (8)$$

小波的硬、软阈值法被普遍应用, 验证了在实际问题中的去噪性能, 但对不同应用都存在问题: 硬阈值函数在变换域中表现为不连续, 使得在实际需要进行求导的去噪过程中有局限性, 通常由于硬阈值只对不及门限的系数执行置零, 造成幅值较大的噪声的存留, 因此, 去噪后的信号存在较大的方差; 软阈值函数能对所有系数处理, 重构后得到了较纯净的去噪波形, 但由于其在对噪声系数收缩时, 信号系数也被收缩, 因此信号具有原始信号的失真, 且具有较大的偏差; 针对激光雷达探测回波信号的特点, 由于信号中有目标和杂波的存在, 在对信号进行杂波抑制的过程中需保留信号的细节, 且实现信号峰值保留, 增大对被探测目标的探测能力, 本文中采用硬阈值作为探测回波信号处理的策略, 力图实现对探测信号的有效去噪处理。

2.5 仿真及分析

对阈值法的去噪流程和选取参量原则进行了仔细研究, 基于小波性质的不同导致了对不同实际工程的参量不同, 去噪效果也不同, 并结合去噪参量选取原则和信噪特点, 对激光探测回波信号进行去噪研究分析。

2.5.1 基和分解层数的选择分析 本文中运用 MATLAB 对激光雷达原始信号进行处理, 通过分析处理后信号与原始信号的相似程度, 得出适用的小波基函数分别为 db3, db2, db9, db10, 如图 3 所示。

通过对图 3 的对比分析可知, db2 和 db3 小波基处理后的信号具有明显失真现象, 信号边缘平稳性不好, 而 db9 和 db10 对信号的恢复较好。

使用 db2 和 db9 进行去噪实验, 并记录在不同分解尺度和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) R_{SNR} 下输出信噪比的变化, 如表 1 ~ 表 3 所示。

从表 1、表 2 和表 3 中的数据对比分析得出: 对于

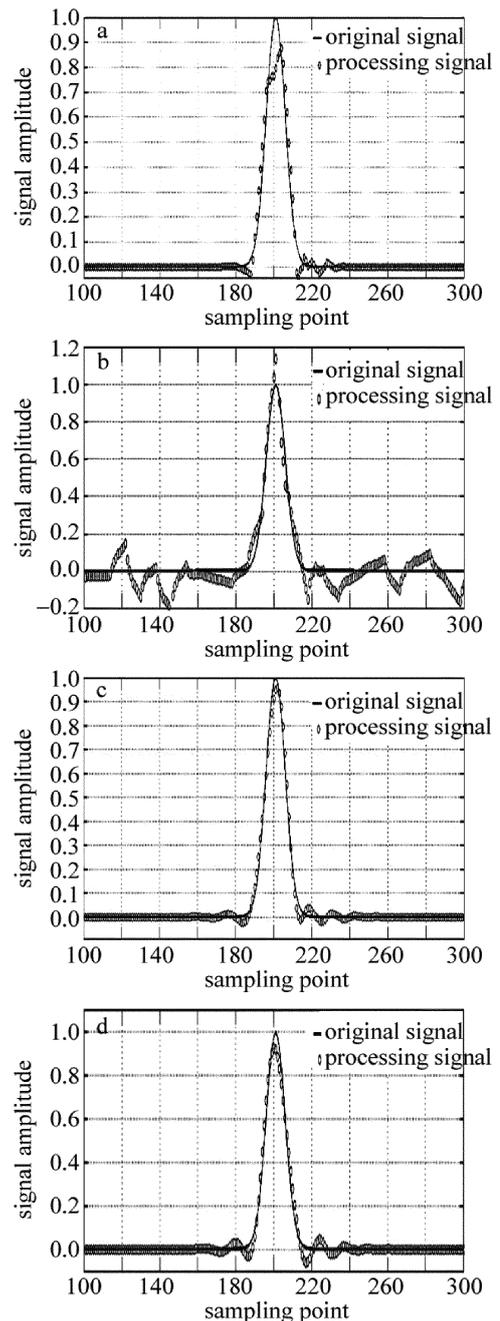


Fig. 3 Output waveform and input waveform comparison a—the output waveform and input waveform of the db3 wave base b—the output waveform and input waveform of the db2 wave base c—the output waveform and input waveform of the db9 wave base d—the output waveform and input waveform of the db10 wave base

Table 1 Signal-to-noise ratio ($R_{\text{SNR}} = -10\text{dB}$) after denoising of different wavelet bases with different decomposition scales

decomposition level	2	3	4	5
db9	-3.9365	-0.7603	1.3154	1.7221
db2	-4.0507	-1.0544	0.5101	0.9858

低信噪比时, 同一基函数随着尺度增大去噪结果越好, 且表现在 j 为 4 ~ 5 时去噪最好; 当有较高信噪比时,

Table 2 Signal-to-noise ratio ($R_{SNR} = -5\text{dB}$) after denoising of different wavelet bases with different decomposition scales

decomposition level	2	3	4	5
db9	1.1627	3.4256	4.3620	2.9273
db2	0.7945	2.9739	3.5600	2.5273

Table 3 Signal-to-noise ratio ($R_{SNR} = 10\text{dB}$) after denoising of different wavelet bases with different decomposition scales

decomposition level	2	3	4	5
db9	15.8944	16.7713	7.4401	3.0649
db2	13.6011	14.5316	6.6448	2.9318

分解层较低时,去噪结果较好,一般以 $j=3$ 作为小波分解的层数。针对激光雷达探测信号基于 db9 基函数去噪效果好于 db2 基函数去噪效果。

2.5.2 不同阈值策略的硬阈值仿真分析 为了考察在硬阈值下的不同阈值策略的优劣,对激光雷达探测信号进行仿真实验:对激光雷达信号加不同强度的高斯白噪声形成不同信噪比的激光雷达含噪回波信号,采用 db9 小波基进行 4 层小波分解,应用硬阈值有 4 种阈值选取规则的去噪分析。

(1)含噪信号信噪比为 -10dB 的去噪仿真实验。图 4、图 5 是信噪比为 -10dB 的含噪激光雷达回波信号以及不同阈值处理策略的去噪信号图。表 4 是不同

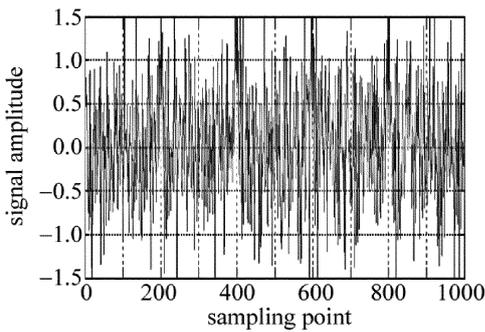


Fig. 4 Noisy signal ($R_{SNR} = -10\text{dB}$)

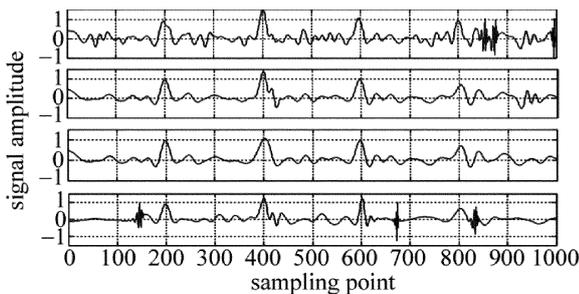


Fig. 5 Denoising signal ($R_{SNR} = -10\text{dB}$)

Table 4 Signal-to-noise ratio ($R_{SNR} = -10\text{dB}$) with different thresholds of db9 wavelet

threshold rule	rigrsure	sqtwolog	heursure	minimaxi
output SNR	-1.7867	-1.5187	-1.3177	-1.7289

处理规则的信噪比改善。

(2)含噪信号信噪比为 -5dB 的去噪仿真实验。图 6、图 7 是信噪比为 -5dB 的含噪激光雷达回波信号以及不同阈值处理策略的去噪信号图。表 5 是不同处理规则的信噪比改善。

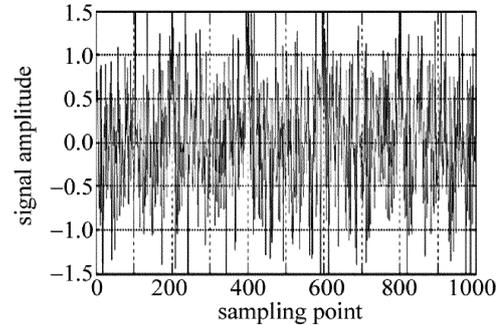


Fig. 6 Noisy signal ($R_{SNR} = -5\text{dB}$)

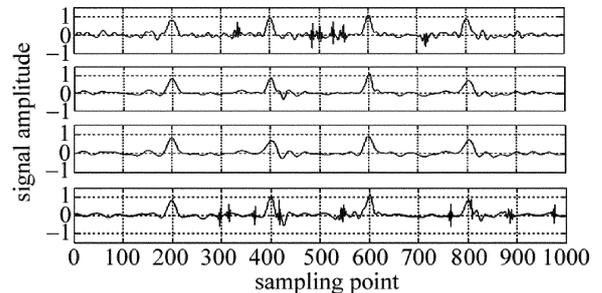


Fig. 7 Denoising signal ($R_{SNR} = -5\text{dB}$)

Table 5 Signal-to-noise ratio ($R_{SNR} = -5\text{dB}$) with different thresholds of db9 wavelet

threshold rule	rigrsure	sqtwolog	heursure	minimaxi
output SNR	3.0763	4.1415	3.8592	3.5832

(3)含噪信号信噪比为 0dB 的去噪仿真实验。图 8 和图 9 是信噪比为 0dB 的含噪激光雷达探测回波信号以及不同阈值处理策略的去噪图。表 6 是不同处理规则的信噪比改善。

以上几种不同的阈值选择规则对不同的激光回波探测信号实现了显著的信噪比改善,如前所述,因 minimaxi 规则与 rigrsure 规则的阈值选择策略较保守,

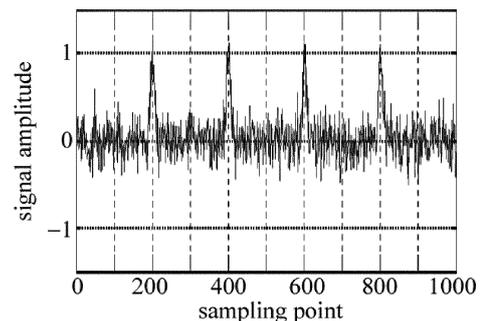
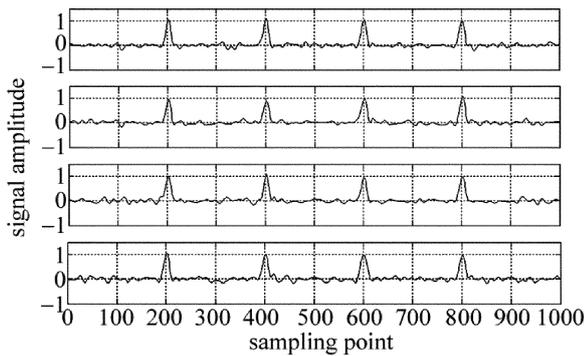


Fig. 8 Noisy signal ($R_{SNR} = 0\text{dB}$)

Fig. 9 Denoising signal ($R_{SNR} = 0\text{dB}$)Table 6 Signal-to-noise ratio ($R_{SNR} = 0\text{dB}$) with different thresholds of db9 wavelet

threshold rule	rigrsure	sqtwolog	heursure	minimaxi
output SNR	7.3411	8.5736	7.9421	7.6473

呈现出在低信噪比下去噪后的探测信号噪声仍有存留;与之相反,sqtwolog 规则和 heursure 规则的阈值选择策略选取较大,造成过去噪,使重构的探测回波信号具有失真,以致激光探测误差未能及时消除;因此,基于4种阈值的选择策略执行的激光探测信号去噪效果还有改进余量,通过构造新的阈值策略或对系数的不同处理后,达到有效的激光探测信号去噪成为研究的难点和热点。

3 结论

通过小波阈值法对激光雷达探测回波信号去噪研究分析。

(1)对于低信噪比时,同一基函数随着尺度增大去噪结果越好,且表现在 j 为 4~5 时去噪最好;当有较高信噪比时,分解层较低时,去噪结果较好,一般以 $j=3$ 作为小波分解的层数。

(2)针对激光雷达探测信号基于 db9 基函数去噪效果好于 db2 基函数去噪效果。

(3)不同的阈值选择规则对不同的激光回波探测信号实现了显著的信噪比改善, minimaxi 规则与 rigrsure 规则的阈值选择策略较保守,呈现出在低信噪比下去噪后的探测信号噪声仍有存留,而 sqtwolog 规则和 heursure 规则的阈值选择策略选取较大,造成过去噪,使重构的探测回波信号具有失真,激光探测误差未能及时消除,还有改进余量。

参考文献

[1] MENZIES R T. Doppler lidar atmospheric wind sensors: a compara-

tive performance evaluation for global measurement applications from earth orbit[J]. Applied Optics, 1986, 25(15): 2546-2553.

- [2] ABSHIRE J B. NASA's space lidar measurements of earth and planetary surfaces[DB/CD]. New York, USA: OSA Technical Digest(Optical Society of America), 2010: 24-28.
- [3] WANG Zh W. Study of noise characteristics of the measurement system on laser radar cross section of target[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 1-3(in Chinese).
- [4] GUO S Y, HU X, YAN Z A, *et al.* Research development of spaceborne lidar in foreign countries[J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 772-773(in Chinese).
- [5] MA C. Design of processing circuit for echo signal of laser radar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 2-6(in Chinese).
- [6] LIU B, ZHANG J, LU M, *et al.* Research progress of laser radar applications[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 117-122(in Chinese).
- [7] FISACKERLY R, PRADIER A, GARDINI B, *et al.* The ESA lunar lander mission[C]//AIAA Space 2011 Conference & Exposition. Long Beach, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011: 7217.
- [8] NI S X, LI Y F. Trend of laser radar for military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 111-114(in Chinese).
- [9] YANG J C, HUANG B K, ZHANG Z Y, *et al.* Simulation study of detecting various gases based on far-infrared wide spectrum laser lidar[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(7): 743-746(in Chinese).
- [10] ABDALATI W, ZWALLY H J, BINDSCHADLER R, *et al.* The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 735-751.
- [11] 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): 4-22(in Chinese).
- [12] WANG L N. Research on the weak signal processing method of laser radar based on wavelet transform[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2009: 1-4(in Chinese).
- [13] DONOHO D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [14] HUANG K, AVIYENTE S. Information-theoretic wavelet packet subband selection for texture classification[J]. Signal Processing, 2006, 86(7): 1410-1420.
- [15] DARABI H, CHIU J. A noise cancellation technique in active RF-CMOS mixers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12): 2628-2632.
- [16] JIANG Sh Sh. A study on image adaptive threshold denoising based on dyadic wavelet transform[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2010: 19-21(in Chinese).
- [17] YE Ch Y, HUANG Y D. New improvement of wavelet threshold denoising algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(12): 142-143(in Chinese).
- [18] XIAO Q. Denoising method based on wavelet theory and Its application in signal processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 33-34(in Chinese).