基于多尺度 EMD 的激光雷达信号分段去噪

周小林[1]，孙东松[1]，钟志庆[1]，王邦新[1]，夏海云[2]，沈法华[1]，董晶晶[1]

(1.中国科学院安徽光学精密机械研究所，安徽 合肥 230031；
2.北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100083)

摘要： 介绍了一种新的信号去噪方法。针对激光雷达信号和 EMD 信号分解的特点，结合统计检测理论，利用中心极限定理和 Grubbs 判据对信号强度起伏的随机性进行检测。检测出的信号强突变部分视为信号的发展趋势保留不参与 EMD 分解，其余部分则使用 EMD 方法分解。对分段处理的信号用半软阈值限幅的办法重构；重构信号可能出现的 pseudo-Gibbs 现象，采用平移不变量去噪原理处理。实测信号的处理结果表明了这种去噪方法的有效性，即能取得较好的去噪效果，又能较好的保留信号的突变信息和强突变信息。

关键词： 激光雷达信号； 中心极限定理； Grubbs 判据； 经验模态分解； 本征模态函数

中图分类号： TN958.98 **文献标识码：** A **文章编号：** 1007-2276(2006)增 D-0477-06

Lidar signal subsection denoising based on multi-dimension EMD

ZHOU Xiao-lin[1], SUN Dong-song[1], ZHONG Zhi-qing[1], WANG Bang-xin[1], XIA Hai-yun[2]
SHEN Fa-hua[1], DONG Jing-jing[1]

(1.Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics, Academy of Science, Hefei 230031, China;

2. School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A new signal denoising method is introduced. According to the characteristics of lidar signal and EMD signal decomposition, with statistical check theory, Central limit theorem and Grubbs rule, the randomness of intensity fluctuations of lidar signal is checked. The part of high abrupt change in signal could be regarded as trend of development of signal, which is not decomposed by EMD. The remainder signal is decomposed. The part decomposition signal is reconstructed by Semi-Soft threshold limiting method. Pseudo-Gibbs phenomena may be appeared in the reconstructed signal; it could be eliminated by the application of Translation-Iinvariant denoising theory. The experiment shows the effectivity of this method, and it can remove noise from signal effectively and keep abrupt change and high abrupt change well in signal.

Key words: Lidar signal; Central limit theorem; Grubbs rule; Empirical mode decomposition; Intrinsic mode functions

---

收稿日期： 2006-07-29

基金项目： 中国科学院知识创新工程基金资助项目(Cx0201)；中国科学院百人计划基金资助项目(202032403130)

作者简介： 周小林(1982-)，男，湖南邵阳人，硕士研究生，主要从事激光雷达信号与数据处理方面的研究。

0 引言

常用的信号去噪方法主要有Fourier变换去噪、滑动平均去噪、小波变换去噪。Fourier变换方法在信号处理领域影响深远，需要在频域内选择低通滤波器实现信号去噪；因此，滤波器和滤波器截止频率的选择是关键。Fourier变换方法不具有时频分析的局域性，去噪的同时平滑了信号的突变部分，损失了突变位置可能携带的重要信息。Fourier变换方法一般用于线性平稳信号的分析和去噪。滑动平均也具有去噪的作用，是一种非递归低通滤波器，提供了信号的简单、粗略滤波。它的基本原理是将信号作多点平滑处理，需要利用所平滑点附近的数据点的信息。存在的问题是，若平滑的点数少，去噪效果差，平滑的点数过多，势必将信号的突变部分平滑。实际上，使用滑动平均去噪的前提条件是信号必须缓慢变化。小波变换是较新的信号分析理论，将信号进行“数学显微镜”式的层层分解。根据具体信号选择合适的小波基函数和分解层数，并选择合适的阈值规则对分解信号重构，实现去噪的目的。小波变换方法即适用于线性平稳信号也适用于非线性非平稳信号的分析和处理。小波分析方法存在最优基函数的选择问题，自适应性差。由于小波基函数尺度的有限性，会导致频谱泄漏问题[1]。经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，EMD）方法是目前最新的信号分析理论[2]。按照信号局部相邻极值对应的时间差（特征尺度）从小往大将信号进行层层分解，得到一系列频率从大往小的本征模态函数（Intrinsic Mode Function ，IMF）。由于噪声主要包含在高频IMF中，因此，可以通过选择信号的分解层数和恰当的阈值规则，对IMF和残余项重构，从而实现去噪的目的。EMD方法具有小波分析的优点，同时又不需要选择基函数，其基函数由数据自身构造，自适应性强，是一种特殊的自适应小波分解方法[3]，算法简单，易于实现。

由于可能存在的强突变信号（例如卷云）会影响激光雷达信号的去噪，文中结合统计检测理论，利用中心极限定理和 Grubbs 判据对信号强度起伏的随机性进行检测，检测出的强突变部分（边界层高信噪比信号、分层部分以及云层回波信号）可视为信号的发展趋势保留不参与 EMD 分解，而其余部分则分段使用 EMD 方法分解；对分解得到的 IMF 采用半软阈值的办法重构原信号，而重构信号可能出现人为的 pseudo-Gibbs 现象（即重构后的信号在突变位置附近的领域内出现局部振荡），采用平移不变量（Translation-Invariant，TI）原理处理。引入平移不变量去噪，能有效地去除重构信号中的 pseudo-Gibbs 现象。

1 激光雷达信号分段处理原理

设$x_1, x_2, \cdots x_n \cdots$是独立随机变量序列，取：

$$S_j = \sum_{i=1}^{j} x_i \qquad (j=1,2,\cdots n\cdots) \tag{1}$$

定义归一化随机变量[4]：

$$z_n = \frac{S_n - E(S_n)}{\sigma(S_n)} \tag{2}$$

式中：$E(\ )$为平均运算符；$\sigma(S_n)$为序列S_n的标准偏差。对于有限均值和方差的统计独立同分布的随机变量，中心极限定理可以表述为：在独立随机变量序列中，每个随机变量x_i对归一化随机变量z_n的影响足够小，当n充分大时，z_n是收敛于标准正态分布的随机变量。一般情况下，$n>50$ 即可满足要求。中心极限定理的必然结果是：如果一个物理过程（例如电路噪声）为许多独立作用之和，并且满足独立同分布，均值和方差有限的条件，那么这个过程就趋于正态（高斯）过程[4,5]。中心极限定理在统计学、随机信号处理等学科中有着十分重要的意义，为研究随机现象提供了理论基础。

对于一个正态分布的随机变量序列，若认为异常值全为高端值。可以采用单侧Grubbs判据对序列的随机性进行检测。定义检出水平$\alpha=0.05$，剔除水平$\alpha^*=0.01$。在剔除水平下检出的异常值称为高度异常值，而检查出介于剔除水平和检出水平之间的值可认为是可能出现的异常值。检测算法如下：

（1） 将假定为正态分布的变量X_i按升序排列成顺序统计量Y_i，其中$i=1, 2, \cdots n$；

（2） 计算序列Y_n的平均值$E(Y_n)$和标准偏差$\sigma(Y_n)$；

（3） 计算Y_n的上侧Grubbs系数$G_n=\dfrac{Y_n-E(Y_n)}{\sigma(Y_n)}$；

（4） 确定检出水平α（或剔除水平α^*），查表得Grubbs判据临界值$G_{1-\alpha}(n)$（或$G_{1-\alpha^*}(n)$）；

（5） 若$G_{1-\alpha}(n)\le G_n$（或$G_{1-\alpha^*}(n)\le G_n$），则Y_n的上侧值为异常值（或高度异常值），予以剔除，置$n=n-1$，返回步骤（2）；否则退出检测。

在这里，α（或α^*）是显著性水平，即出现异常值（或高度异常值）的概率不大于α（或α^*）。采用Grubbs判据检测正态分布或近似正态分布序列当中的异常值（或高度异常值）可靠性好。

对光电探测器接收到的激光雷达信号，激光雷达方程是决定信号的主要因素，在总体上信号呈现与距离的平方反比衰减趋势；而在局部，则由于大气不稳定性以及噪声（光电探测器的各种噪声以及湍流噪声、天空背景辐射等）的影响引起一定的随机不可预测的起伏。对直接探测激光雷达来说，可以通过多发脉冲累计的办法削弱信号的局部起伏，提高信噪比；但在高层，由于回波信号较弱，信噪比仍然偏低。同时，由于可能的大气粒子分层分布明显和云层的存在，导致信号的局部强突变。实测的激光雷达信号如图 1 所示（为明晰起见，画的是信号强度取自然对数后的值，称为相对强度，下同），信号强度分层分布明显，边界层回波信号强，起伏少，信噪比高；2~3 km 和 4~5 km 之间分别有一个干净层，7 km 的地方出现了一层薄薄的卷云；由于卷云的作用，7 km 之后的区域基本上是噪声。因此，激光雷达信号是典型的信噪比有强有弱的非线性非平稳信号。定义激光雷达信号强度起伏为：

$$E_i=\left|\mathrm{maxmin}_i-\mathrm{maxmin}_{i+1}\right| \tag{3}$$

式中：maxmin_i表示包含噪声采样信号的第i个极值。若认为信号强度起伏变化独立随机，由于激光脉冲能量的有限性，将E_i按照上述方法归一化得到的序列满足平均值和方差有限的条件。因此，可以采用Grubbs判据检查归一化信号强度起伏变化是否存在强突变。具体实现方法是：将E_i按升序排列，得到顺序序列记为I_i，并记录每个I_i在原始信号中的位置。按照上述方法归一化，采用Grubbs判据对归一化的顺序序列检测。此时不需要计算检测算法中的第（2）步（归一化的顺序序列假定平均值为 0，标准方差为 1），并在第（5）步记录剔除异常值（或高度异常值）所对应的原始信号中强突变点的位置，以便于分段处理。对于图 1 所示的信号，检测结果如图 2 所示。

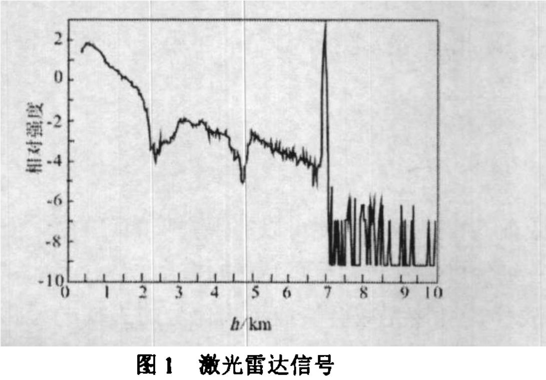


图 1 激光雷达信号

Fig.1 Lidar signal

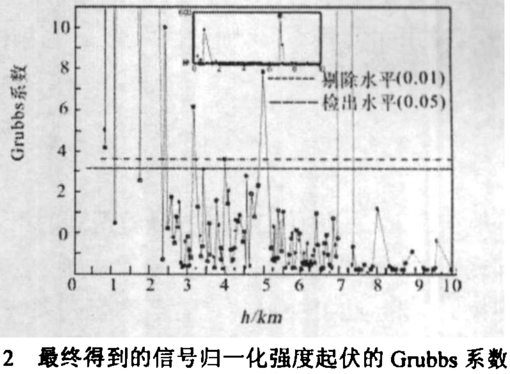


图 2 最终得到的信号归一化强度起伏的 Grubbs 系数谱

Fig.2 Grubbs coefficient spectrum of normalized intensity fluctuations of signal acquired after checking

由图 1、图 2 可以看出，由于边界层信号信噪比强，“毛刺”少，按照上述方法变换得到的 Grubbs 系数在低于 2 km 的范围内分布相对疏稀，并且通过检测多数属于高度异常值。由于 3 km、5 km 和 7 km 左右的信号强突变位置都能较好的检测出；由此，可将原始信号大致分为 0~2 km、2~3 km、3~5 km、5~7 km 和 7~10 km 分段处理。

2 EMD 信号分解和去噪原理

EMD是一种新的非线性非平稳信号分析方法，具有多尺度分析的特点，信号分解时不需要构造基函数，其基函数由数据自身构造，是一种特殊的自适应小波分解方法。EMD分解的基本原理是将一列信号$X(t)$分解为一系列本征模态函数（IMF）。这些函数满足：（1）极大值和极小值个数之和与过零点的个数之差不超过 1。（2）分别由极大值和极小值构成的上、下包络的平均值应处处等于 0 或者接近 0[2]。第一个条件类似于平稳窄带高斯过程要求；第二个条件修正了全局性要求，以保证瞬时频率不包含不对称波形造成的不必要的波动[6]。将分解得到的IMF作Hilbert变换便可得到信号的时频谱，但文中主要研究EMD的信号去噪作用，故不介绍这部分的工作。EMD分解算法如下：

（1） 初始化：$R_0(t)=X(t)$，$i=1$；

（2） 提取第 i 个 IMF

① 初始化 $H_0(t)=R_{i-1}(t)$，$j=1$；

② 分别提取 $H_{j-1}(t)$ 的极大值和极小值，采用三次样调插值求出极大值和极小值构成的上、下包络。计算上、下包络的平均值$M_{j-1}(t)$；

③ $H_j(t)=H_{j-1}(t)-M_{j-1}(t)$；

④ 如果满足IMF的条件，置$IMF_i(t)=H_j(t)$；否则返回②，并置 $j=j+1$；

（3） $R_i(t)=R_{i-1}(t)-IMF_i(t)$；

（4） 如果满足IMF分解个数的要求，则退出分解，$R_i(t)$是残余项；否则返回步骤（2），并置 $i=i+1$。

一般可用下面的公式作为 IMF 筛分的判据：

$$SD=\frac{\sum_{t=0}^{T}\left[H_{j-1}(t)-H_j(t)\right]^2}{\sum_{t=0}^{T}H_{j-1}^2(t)} \tag{4}$$

门限SD一般取 0.2～0.3[2]。若要将所用的IMF分解出来，则要求$R_i(t)$中的极值个数不超过 2 个，作为提取IMF个数的中止标准。但噪声主要包含在高频IMF中，因此，可以选择IMF分解个数。从而信号可由下式表示：

$$X(t)=\sum_{i=1}^{n}IMF_i(t)+R_n(t) \tag{5}$$

一般情况下，用原始信号减去分解得到的第一个或前几个高频IMF便可以实现去噪的目的[2]。但当信号存在局部突变时，容易出现模态混叠现象（即一个IMF中包含以后筛分得到的IMF的信息）[7]。因此，当产生混态模现象时，高频IMF中必定包含了突变高频信号的成分，直接相减会造成重构信号的失真。为此，可以采用阈值限幅的办法解决。对每一个高频IMF函数作门限阈值处理，定义半软阈值限幅(Semi-Soft Threshold Limiting)函数为[8]：

$$\eta_i(Y_i)=\begin{cases}0, & |Y_i|<T_1\\ \operatorname{sgn}(Y_i)\dfrac{|Y_i|-T_1}{T_2-T_1}T_2, & T_1\le|Y_i|<T_2\\ Y_i, & |Y_i|\ge T_2\end{cases} \tag{6}$$

式中：$\eta_i(Y_i)$为经过阈值限幅处理后的IMF系数；T_1, T_2（$T_1<T_2$）代表软硬限幅函数的阈值。可以采用Grubbs判据近似计算高频IMF中包含噪声的标准偏差σ。阈值$T_1=\sigma G_{1-0.05}(n)$、$T_2=\sigma G_{1-0.01}(n)$ 。

硬阈值法是保留大于阈值的 IMF 系数，而把小于阈值的系数置为 0；保留了较多的“毛刺”，重构信号具有较好的逼近性，但会带来局部振荡。软阈值法是把小于阈值的 IMF 系数置为 0，而大于阈值系数的减去阈值；软阈值法能够取得较好的平滑效果，但由于存在恒定的差值，使重构信号产生一定的失真。而半软阈值法则是二者的折中处理，软、硬阈值法是半软阈值法的特殊情况。

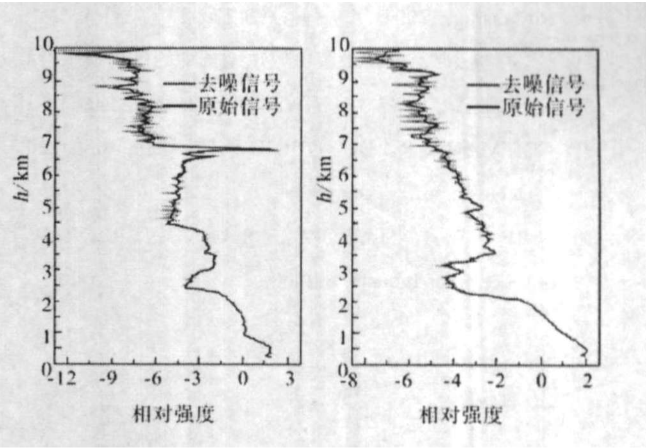
3 平移不变量去噪原理

多尺度EMD方法具有良好的时频分析性能，信号重构时能较好地保留信号突变位置的信息。但在对包含主要噪声的高频IMF取阈值限幅时，在突变位置的局部领域内，信号分解时可能产生混态模现象，而信号重构又可能产生pseudo-Gibbs现象；当高频IMF减去的以及被置 0 的那部分幅值不能忽略时，便引入了局部振荡。信号突变位置的不同，不一定产生混态模和pseudo-Gibbs现象。因此，可以采用平移不变量去噪原理[9]改进去噪效果，即在一定的范围内对信号进行循环平移，对平移后的信号采用EMD方法分解和半软阈值限幅去噪处理，然后对平移去噪处理的信号作相同平移量的逆平移；把所有“平移—去噪—逆平移”的信号再进行平均来逼近原始信号。

平移不变量去噪是一种统计平均的处理方法。由于采取了分段处理的办法，激光雷达信号重构时，产生pseudo–Gibbs 现象的概率小，选择适当的平移范围，能有效地抑制 pseudo–Gibbs 现象，重构信号表现出更好的视觉效果，信噪比得到了提高。

4 实测信号的处理结果及讨论

各种低通滤波器平滑了信号的突变，而按照以上几步对激光雷达信号进行去噪处理，有卷云和无卷云的典型处理结果，如图 3（a）、（b）所示；由于采用分段处理、多尺度EMD分解方法、半软阈值去噪方法以及平移不变量去噪方法，信号的突变位置可能携带的重要信息得到了很好的保留，同时又取得了满意的去噪效果；这对反演空间大气随高度分布的直接、间接特征参数具有重要的意义。由于可能出现的大气粒子分层分布明显和云层的存在，激光雷达信号分段处理的目的有三个：（1）由于云层回波信号和边界层回波信号往往比低信噪比信号的强度高好几个量级，若直接使用EMD方法对信号进行降噪处理，在信号的强突变位置可能产生严重的混态模和pseudo-Gibbs现象，需要选择更大的平移范围和更多



(a) (b)

图 3 激光雷达信号去噪，(a) 有卷云，(b) 无卷云

Fig.3 Lidar signal denoising :(a)have cirrus, (b) no cirrus

的平移次数才能消除信号去噪的局部振荡现象。耗时多，去噪可能失去意义。（2）EMD在信号分解时，需要运用三次样条插值[10]来获得信号的上、下包络，在数据比较多的情况下需要运算高阶矩阵，占用较多的内存，耗时多。（3）信号的分段处理有利于保留信号强突变位置的信息。

5 结束语

介绍了一种新的信号去噪方法。而这种方法是基于多尺度 EMD 分解原理，将信号分解为一系列 IMF，采用半软阈值法对每个 IMF 作限幅处理，重构原始信号的过程中可能出现的 pseudo-Gibbs 现象则采用平移不变量去噪的办法解决。通过定义一个信号强度起伏的变量检测激光雷达信号强度起伏的随机性，以实现信号的分段处理。实际上，由上文可知，激光雷达信号也是按照信噪比的变化分段处理。实际采样信号的处理结果表明，分段 EMD 的办法能很好地对激光雷达信号进行降噪处理。由于每平移一次，都需要进行一次 EMD 信号分解和重构，因此，仍然存在耗时较多的问题（对于采样为 512 个数据点的信号，需要约十几秒的处理时间，这取决于分段信号平移范围的大小），可采用高速度、高精度 DSP 实现这一算法。我们将继续探讨其他检测理论和阈值设置方法在基于 EMD 的激光雷达信号去噪上的应用。而这种分段 EMD 去噪方法和其他信号去噪方法对激光雷达信号去噪效果的对比，将是后继工作的内容。

参考文献：

[1] 张维强，徐晨，宋国乡.一种基于Hilbert Huang 变换的语音去噪方法[J].现代电子技术，2006，217（2）：43-45.

[2] HUANG N E，SHEN Z，LONG S R，et al.The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J].Procedures of the Royal Society of London，Series A，1998，A454（3）：903-995.

[3] BOUDRAA A O，CEXUS J C，SAIDI Z.EMD-based signal noise reduction[J].International Journal of Signal Processing，2004，1（1）：33-37.

[4] .WHALEN A D.噪声中信号的检测[M].刘其培，迟惠生，译.北京：科学出版社，1977.

[5] 印勇.随机信号分析[M].北京：中国物资出版社，2000.

[6] CEXUS J C，BOUDRAA A O.Teager-huang analysis applied to sonar target recognition[J].International Journal of Signal Processing，2004，1（1）：23-27.

[7] 王波，杨洪耕.电力系统电压短期扰动的三角模态检测方法[J].电工技术学报，2005，20（11）：101-105.

[8] BRUCE A G，GAO H Y.WaveShrink: Shrinkage Functions and Thresholds[C]//SPIE，1995，2569：270-283.

[9] COIFMAN R R，DONOHO D L.Translation-Invariant Denoising [EB/OL]. http://www-stat.stanford.edu/~donoho/Reports/1995/TIDeNoise.pdf.

[10] PRESS W H，TEUKOLSKY S A，VETTERLING W T，et al.Numerical Recipes in C++ [M].2nd ed.Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2000.