

基于经验模态分解的三维成像激光雷达信号去噪方法

焦宏伟¹ 秦石乔² 王省书¹ 胡春生¹ 吴 伟¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用梯度法对激光雷达信号进行处理, 检测出突变部分的幅度和位置, 根据梯度信息计算相应的平移序列, 加入到原始信号中, 使所得信号中不包含突变信息。利用经验模态分解(EMD)方法对去突变信号进行分解和去噪就可以避免模态混叠和突变位置附近出现的局部振荡现象。将该方法应用于实际激光雷达数据去噪过程中, 实验结果表明, 该方法能消除由突变引起的重构信号局部振荡现象, 对信号平稳部分的噪声能有效地滤除, 又能较好地保留信号的突变信息。

关键词 信号处理; 激光雷达; 经验模态分解; 梯度检测; 信号去噪

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1211004

Three-Dimensional Imaging Lidar Signal Denoising Method Based on Empirical Mode Decomposition

Jiao Hongwei¹ Qin Shiqiao² Wang Xingshu¹ Hu Chunsheng¹ Wu Wei¹

(¹ College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
² College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A grads method is used to process lidar signal, by which the scopes and positions of abrupt change can be detected. Based on these grads messages, a translation sequence can be calculated and is added to original lidar signal, which makes the parts of abrupt change in original lidar signal removed. The abrupt change removed signal is decomposed and denoised by empirical mode decomposition, which can avoid mode mix and local surge phenomena. This denoising method is applied to real lidar data denoising. The experiment results show the effectiveness of this method. It can remove noise in signal effectively in flat part and keep abrupt change well in signal.

Key words signal processing; lidar; empirical mode decomposition; grads detecting; signal denoising

OCIS codes 110.6880; 100.6890; 040.6070; 150.6910

1 引 言

三维成像激光雷达利用脉冲激光对目标进行高速扫描^[1], 可以获得目标的特征数据点集, 是一种结合了激光技术、光电探测技术和信号处理技术的主动式三维探测技术。在激光雷达探测过程中会受到杂散光、大气扰动和探测电路噪声等干扰, 使得探测数据中混有噪声, 有效地滤除这些噪声^[2~4]在三维重建中具有重要意义。

经验模态分解(EMD)方法是目前最新的信号分析理论^[5]。按照信号局部相邻极值对应的时间差(特征尺度)从小到大将信号层层分解, 得到一系列频率从大到小的本征模态函数(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

收稿日期: 2011-06-13; **收到修改稿日期:** 2011-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(60677041)资助课题。

作者简介: 焦宏伟(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达数据处理、图像处理和机器视觉等方面的研究。

E-mail: flyboynudt@yahoo.com.cn

导师简介: 秦石乔(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电仪器与测控技术等方面的研究。E-mail: sqqin@nudt.edu.cn

构造,自适应性强,是一种特殊的自适应小波分解方法,算法简单,易于实现。正由于EMD方法的这些优点,现已在生物、海洋、地球科学、天文学和工程技术等领域中得到初步应用^[6~14]。

成像激光雷达探测得到的是距离信息,在物体的边界或存在遮挡等情况下,信号中会存在强突变信号,这会影激光雷达信号的去噪。本文利用梯度法对距离信号起伏的随机性进行检测,检测出强突变部分(根据信号起伏的幅度阈值进行鉴定),对强突变部分提取突变平移量,进而对信号进行去突变操作。利用EMD法对去突变信号进行分解,去噪重构后再加入突变平移量即完成了对激光雷达信号的去噪工作。

2 EMD方法信号分解与去噪原理

EMD方法可以将一个任意的信号分解为一系列不同尺度IMF和残余量之和的形式。IMF作为本征函数,满足两个基本条件:1)极值点数目与过零点数目相等或相差一个;2)在局部区域,极大值包络线与极小值包络线的算术平均值为零或接近于零^[5]。条件1)类似于平稳窄带高斯过程的要求;条件2)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。

假设信号为 $x(t)$,EMD分解步骤如下。

1) 找出信号 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点,用三次样条曲线分别拟合,分别得到信号的上包络线 $e_{\max}(t)$ 和下包络线 $e_{\min}(t)$,上、下包络线的均值为平均包络线 $m(t)$ 。用 $x(t)$ 减去 $m(t)$ 得到 $h_1(t)$ 。 $h_1(t)$ 通常不是一个IMF,为此需要将 $h_1(t)$ 看成 $x(t)$, $h_1(t)$ 的平均线记为 $m_1(t)$,将 $h_1(t)$ 减去 $m_1(t)$,得到 $h_{11}(t)$ 。重复上述过程 k 次,得到第 k 次的 $h_{1k}(t)$ 。当 $h_{1k}(t)$ 满足IMF的条件时就得到了第一阶IMF,记为 $c_1(t)$,它包含了信号的最细尺度或最高频成分。

2) 将 $x_1(t)$ 减去 $c_1(t)$ 得到一个去掉高频分量的新信号 $r_1(t)$ 。将 $r_1(t)$ 看成 $x(t)$,重复步骤1),可依次得到 $c_2(t), c_3(t), \dots$ 。当 $r_n(t)$ 成为单调函数时,停止分解。由此, $x(t)$ 可表示为一组IMF分量和一个残余项的和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n. \quad (1)$$

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便可以实现去噪目的^[2]。但是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)。因此,当产生模态混叠现象时,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。

3 含突变信号去噪方法

成像激光雷达信号中经常会存在突变部分,而突变部分又会对信号的EMD分解和去噪产生不利影响。对分解得到的IMF去除低阶进行重构时,重构信号会出现伪Gibbs现象(即重构后的信号在突变位置附近的区域内出现局部振荡)。利用梯度法对信号进行处理可以消除重构信号的伪Gibbs现象。

3.1 梯度法检测突变并进行去突变操作

利用梯度法对距离信号起伏的随机性进行检测。假设信号为 $x(t)$,令梯度算子为 $h = [1, -1]$,对信号求梯度得到 $x_g(t)$,求信号梯度 $x_g(t)$ 的幅度极值,记为 g_{\max} 。以 g_{\max} 的一定比例(可根据实际信号噪声特性选取,本文选取 $0.5 g_{\max}$)作为阈值对梯度信号进行检测,找到幅度绝对值大于阈值点的位置即突变点位置,记为 T_1, T_2, \dots, T_m 。根据梯度信息计算相应的平移序列 $m(t)$,加入到原始信号 $x(t)$ 中,使所得信号 $y(t) = x(t) + m(t)$ 中不包含突变信息。平移序列 $m(t)$ 的计算方法如下。

1) 初始化 $m(t)$ 为0,序列数目与 $x(t)$ 相同。

2) 令 $i = 1$ (从第一个梯度幅度大于阈值的点 T_1 开始),计算对应梯度信号 $x_g(T_i)$ 与 $x_g(T_{i+1})$ 的乘积的符号,若二者乘积符号为正,说明这两个突变点方向是相同的,则将 $m(t) + d(t)$ 赋值给 $m(t)$, $d(t)$ 的前 T_i 个序列为0, $T_i + 1$ 列以后为平移量 $x_g(T_i)$ 。令 $i + 1$ 赋值给 i ,继续下一个点的计算。若二者乘积符号为负,说明这两个突变点方向相反,则平移序列只需要在这两个点之间改变,将 $m(t) + d(t)$ 赋值给 $m(t)$, $d(t)$ 的前 T_i 列为0, T_{i+1} 列以后也为0, $T_i + 1$ 列到 T_{i+1} 列之间的平移量为 $x_g(T_i)$ 与 $-x_g(T_{i+1})$ 之间的线性插值。令 $i + 2$ 赋值给 i ,继续下一个点的计算。

3) 直到 $i > m$,平移序列 $m(t)$ 计算完毕。

3.2 EMD方法去噪

原始信号经过去突变之后,对 $x(t)$ 去噪就等同于对 $y(t)$ 的去噪,因为平移序列 $m(t)$ 是确定的,所以可以认为其中不含噪声。

利用EMD对 $y(t)$ 进行分解得到

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n. \quad (2)$$

去除第一阶 IMF(或前几阶 IMF 或某几阶 IMF)就可以实现对 $y(t)$ 的去噪:

$$y_{\text{denoise}}(t) = \sum_{i=2}^n c_i(t) + r_n. \quad (3)$$

对 $x(t)$ 的去噪结果就可以表示为

$$x_{\text{denoise}}(t) = y_{\text{denoise}}(t) - m(t) = \sum_{i=2}^n c_i(t) + r_n - m(t). \quad (4)$$

4 实测数据处理及分析

利用本文提出的方法对激光雷达实测数据进行处理。图 1 为三维成像激光雷达探测某一场景得到的全部距离数据中的某一行信号,其中由平滑线段连接的曲线表示原始信号,由点线连接的曲线表示去突变处理后得到的去突变信号。对去突变信号进行 EMD 计算,分解得到的各阶 IMF 和残余项如图 2 所示。

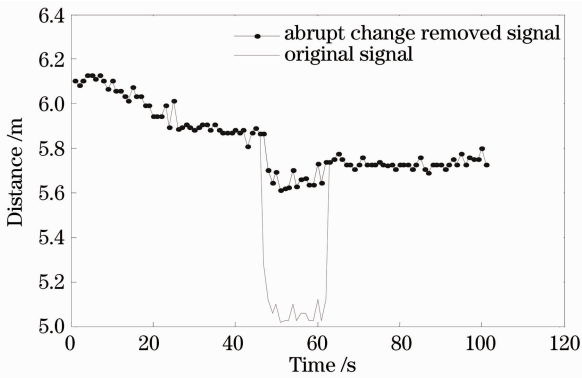


图 1 原始信号与去突变信号

Fig. 1 Original signal and abrupt change removed signal

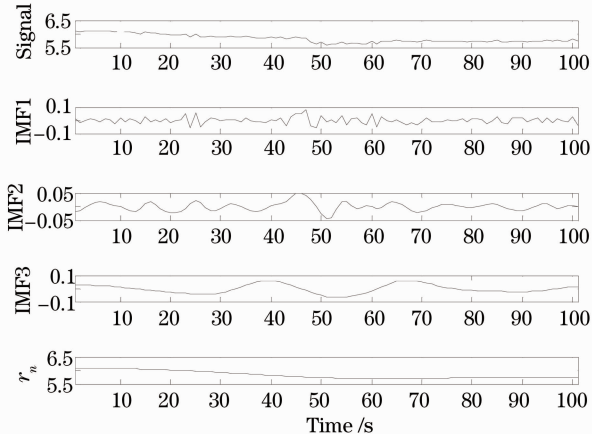


图 2 用 EMD 法得到的去突变信号

Fig. 2 EMD results of abrupt change removed signal

用原始信号减去去突变信号分解得到的第一个高频 IMF 的去噪效果如图 3 所示,用原始信号减去去突变信号分解得到的前二个高频 IMF 的去噪效果如图 4 所示,由原始信号直接进行 EMD 后去除第一阶高频 IMF 得到的去噪效果如图 5 所示。由图 2~5 可见,利用本文方法去噪,在信号局部突变部分,没有出现模态混叠现象,重构信号中没有出现伪 Gibbs 现象。而直接对存在突变的原始信号进行 EMD 方法去噪,所得结果在突变附近出现严重的伪

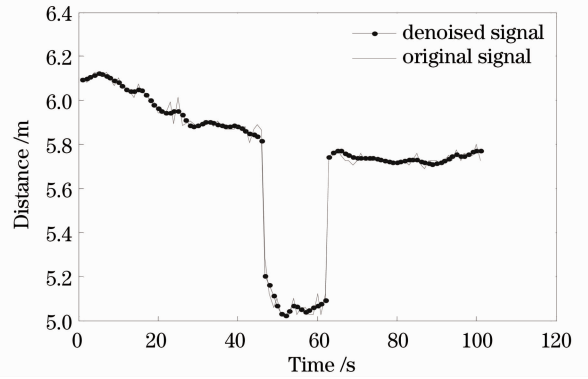


图 3 去除 IMF1 得到的去噪效果图

Fig. 3 Denoising result by excluding IMF1

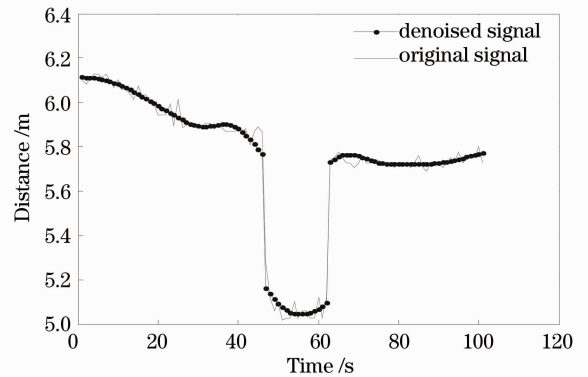


图 4 去除 IMF1 和 IMF2 得到的去噪效果图

Fig. 4 Denoising result by excluding IMF1 and IMF2

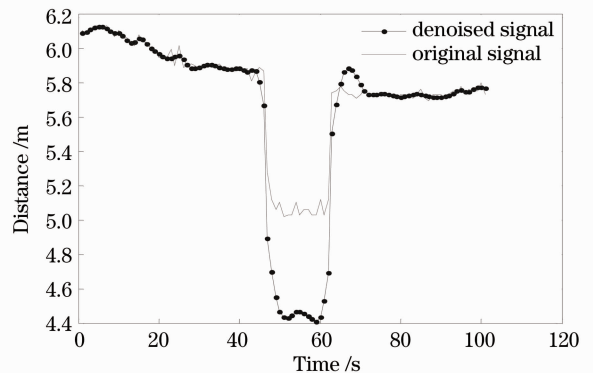


图 5 直接利用 EMD 方法得到的去噪效果图

Fig. 5 Denoising result using EMD method directly

Gibbs 现象,使得信号严重失真。另外需要指出的是,用 EMD 方法对信号处理会出现端点效应^[15,16],因此对信号进行了镜像延拓处理。

利用本文方法对实际激光雷达对某一场景探测得到的全部数据进行去噪实验。图 6 为场景图片,图 7 为激光雷达探测得到的原始数据经过雷达方程解算后绘制的图像,图 8 为利用本文方法对测距数据去噪后经过雷达方程解算后绘制得到的图像。对比图 7 和图 8 可见,本文所提出的去噪方法不但能对平滑区域有效去噪,而且对于突变区域能有效地保持细节,不会产生萎缩和振荡等现象。



图 6 激光雷达探测场景图

Fig. 6 Scene picture to be detected by lidar

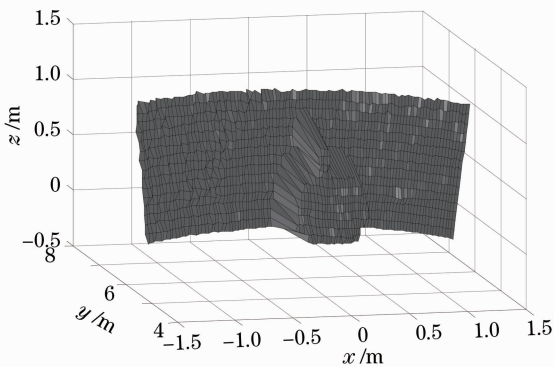


图 7 原始雷达图像

Fig. 7 Original image of lidar data

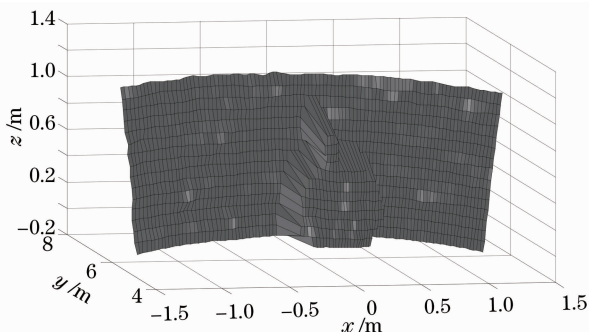


图 8 用本文方法去噪后图像

Fig. 8 Denoising image by using the proposed method

5 结 论

提出了一种新的基于 EMD 的激光雷达信号去噪方法。利用梯度法检测信号突变,计算出突变平移序列,对信号进行去突变处理,利用 EMD 方法对去突变信号进行去噪。利用该方法对实测激光雷达数据进行去噪,结果表明,该方法能消除由突变引起的重构信号的伪 Gibbs 现象,对信号平稳部分的噪声也能有效地滤除。该方法计算简单,可广泛应用于激光雷达信号去噪过程中。

参 考 文 献

- Hu Chunsheng. Investigation into the High-Speed Pulsed Laser Diode 3D-Image Ladar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005
胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005
- Liu Zengdong, Liu Jianguo, Lu Yihuai *et al.*. De-noising lidar signal based on EMD method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(6): 79~83
刘增东,刘建国,陆亦怀等. 基于 EMD 的激光雷达信号去噪方法[J]. *光电工程*, 2008, **35**(6): 79~83
- Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Lidar signal subsection denoising based on multi-dimension EMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s): 477~482
周小林,孙东松,钟志庆等. 基于多尺度 EMD 的激光雷达信号分段去噪[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(s): 477~482
- Wei Gong, Jun Li, Feiyue Mao *et al.*. Comparison of simultaneous signals obtained from a dual-field-of-view lidar and its application to noise reduction based on empirical mode decomposition [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(5): 050101
- N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. *Proc. Royal Soc. Lond. A*, 1998, **454**(1971): 903~995
- Zheng Fatai, Hua Dengxin, Zhou Awei. Empirical mode decomposition algorithm research & application of Mie lidar atmospheric backscattering signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1068~1074
郑发泰,华灯鑫,周阿维. Mie 散射激光雷达大气回波信号经验模式分解算法的研究与应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1068~1074
- Han Min, Peng Yuhua, Zhang Shunli *et al.*. Iris recognition based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 364~368
韩民,彭玉华,张顺利等. 基于经验模式分解的虹膜识别[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 364~368
- Cai Jianhua, Wang Xianchun. Near-infrared spectrum pretreatment based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 267~271
蔡剑华,王先春. 基于经验模式分解的近红外光谱预处理方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 267~271
- Pan Qi, Wang Shimin. Study on optical particle measurement based on rainbow phenomena [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 388~393
潘琦,王式民. 基于彩虹现象的光学测粒技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 388~393
- Li Qiang, Wu Jian, Xu Zhengwen *et al.*. Extraction of periodic components in the solar activity using EMD method [J]. *Chinese J. Space Science*, 2007, **27**(1): 1~6

- 李 强, 吴 健, 许正文等. 利用EMD方法提取太阳活动周期成分[J]. 空间科学学报, 2007, **27**(1): 1~6
- 11 Li Yongqin, Wang Qing, Deng Qinkai. Research on EMD and its application in biomedical signal processing [J]. *J. Biomedical Engineering*, 2005, **22**(5): 1058~1062
- 李永勤, 王 清, 邓亲恺. EMD及其在生物医学信号处理中的应用研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, **22**(5): 1058~1062
- 12 Chen Zixiong, Wu Chen, Zhou Ruizhong. Hilbert-Huang transform spectrum and its application in seismic signal analysis [J]. *J. Fuzhou University (Natural Science)*, 2006, **34**(2): 260~264
- 陈子雄, 吴 琛, 周瑞忠. 希尔伯特-黄变换谱及其在地震信号分析中的应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2006, **34**(2): 260~264
- 13 Z. S. Lin, S. G. Wang. EMD analysis of solar insolation[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2006, **93** (1-2): 123~128
- 14 Ding Kang, Chen Jianlin, Su Xiangrong. Development in vibration signal analysis and processing methods [J]. *J. Vibration Engineering*, 2003, **16**(1): 1~10
- 丁 康, 陈建林, 苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报, 2003, **16**(1): 1~10
- 15 Shen Guoji, Tao Limin, Chen Zhongsheng. Theoretical research on empirical mode decomposition of multi-frequency signal and its application[J]. *J. Vibration Engineering*, 2005, **18**(1): 91~94
- 沈国际, 陶利民, 陈仲生. 多频信号经验模态分解的理论研究及应用[J]. 振动工程学报, 2005, **18**(1): 91~94
- 16 Xu Baojie, Zhang Jianmin, Xu Xiaoli *et al.*. A study on the method of restraining the ending effect of empirical mode decomposition (EMD)[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, **26**(3): 196~200
- 许宝杰, 张建民, 许小力等. 抑制EMD端点效应方法的研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, **26**(3): 196~200

栏目编辑:李文喆