

# 基于希尔伯特黄变换的雷达信号滤波

张小飞<sup>1</sup>, 姜丽<sup>2</sup>, 李鹤<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军63819部队, 四川 宜宾

<sup>2</sup>中国人民解放军92146部队, 广东 湛江

<sup>3</sup>抚州职业技术学院, 江西 抚州

Email: flycheung1015@163.com, 564659976@qq.com

收稿日期: 2020年9月9日; 录用日期: 2020年10月5日; 发布日期: 2020年10月12日

## 摘要

探索基于希尔伯特黄变换(HHT)算法的雷达信号滤波方法。通过对雷达信号进行了经验模态分解(EMD)得到其本征模态函数(IMF)分量, 并对其进行时频分析, 得到分量的频谱以及信号Hilbert谱; 根据其时频特征分布规律, 并估算滤波信号信噪比及信号分量所含回波信号能量, 确定用于重构滤波信号的分量, 仿真处理后的滤波信号与雷达实测信号对比检验滤波效果。结果表明, 基于HHT的滤波算法对雷达信号的滤波有着良好的效果。

## 关键词

雷达信号, 希尔伯特黄变换, 经验模态分解, 滤波

# Filtering of Radar Signal Based on Hilbert Huang Transform

Xiaofei Zhang<sup>1</sup>, Li Jiang<sup>2</sup>, Dong Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Unit 63819 of the People's Liberation Army, Yibin Sichuan

<sup>2</sup>Unit 92146 of the People's Liberation Army, Zhanjiang Guangdong

<sup>3</sup>Fuzhou Vocational Technical College, Fuzhou Jiangxi

Email: flycheung1015@163.com, 564659976@qq.com

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 5<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

A method of radar signal filtering based on Hilbert Huang transform (HHT) is explored. Through

handling the radar signal by empirical mode decomposition (EMD), the intrinsic mode function (IMF) components are obtained, and the spectrum and Hilbert spectrum of the IMF component are obtained by frequency analysis. According to the distribution law of time-frequency characteristics, the signal-to-noise ratio of the filtered signal and the echo signal energy contained in the signal component are estimated to determine the component used to reconstruct the filtered signal. The filtering effect is tested by comparing the simulated filtered signal with the measured radar signal. The results show that the filtering algorithm based on HHT has a good effect on the filtering of radar signal.

## Keywords

Radar Signal, Hilbert Huang Transform, Empirical Mode Decomposition, Wave Filtering

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前雷达设备上被广泛使用的是 SAW 滤波器和 LC 滤波器,但是它们存在一定的不足之处,比如 SAW 滤波器的基片制作工艺要求高,材料昂贵,LC 滤波器相对体积大、笨重,成本高,且由于受限于其中电感的 Q 值,频率响应的截至区不够陡峭。硬件滤波器也限制了高频滤波数字化的发展,不利于提高雷达外测数据的实时性。

20 世纪末,美国物理学家黄愕首次提出了一种非常适合于分析非稳定或非线性信号的希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transformation, HHT)算法。HHT 已在地震预测、地球勘探[1]、建筑结构隐患侦测[2]、雷达滤波[3] [4]等研究领域得到有效应用。本文结合雷达信号的特性与 HHT 变换的特点,提出了基于 HHT 的雷达信号滤波方法,并与设备上现有的滤波结果进行对比,检验 HHT 滤波方法对雷达信号的滤波效果。

## 2. 希尔伯特黄变换及其滤波原理

### 2.1. 希尔伯特 - 黄变换

希尔伯特 - 黄变换[5]主要包含两个部分:经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 变换。

经验模态分解(EMD)是将复杂的信号自适应地分解成用于进行 Hilbert 变换的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量。

由 IMF 分量和余项  $r_n(t)$  可以重构得原信号  $x(t)$ , 表示为

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

对 EMD 分解得到的 IMF 分量作希尔伯特变换[6], 构造出各 IMF 分量的解析信号以及其瞬时幅值  $a_i(t)$ 、瞬时相位  $\theta_i(t)$  以及瞬时频率  $\omega_i(t)$ , 余项  $r_n(t)$  为常量或单调信号, 所含信息量少, 舍去  $r_n(t)$  后原信号  $x(t)$  可由其解析信号求实部得到, 即

$$x(t) = \text{Re} \left[ \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \right] \quad (2)$$

将式(2)中幅值表示为时间和频率的函数时,幅值的时间-频率分布称为 Hilbert 谱,记为:  $H(\omega, t)$ 。

## 2.2. HHT 滤波的基本原理

HHT 滤波是将信号通过 EMD 分解得到频率由高到低的 IMF 分量,然后用原信号减去包含噪声的分量,得到滤波信号;或是对包含原信号的分量进行去噪后再重构,得到滤波信号,达到对原信号滤波的目的。IMF 的频率成分是由原信号的频率特性决定的,频率的高低也是相对的,没有特定的频率数值来区分高频或低频分量, HHT 是根据信号自身特性分解信号,自适应性强,非常适合于非平稳信号滤波。

对于雷达中频信号来说,有用信号的频率比噪声信号的频率高,因此对雷达中频信号进行 EMD 分解, IMF 是从高频到低频依次被分解出来,噪声主要分布于低频分量中,去除低频分量,运用高频分量重构得到滤波信号。但由于低频分量中也可能包含有用信号成分,为了较好地分离低频噪声与有用信号成分,给信号加噪声是 HHT 滤波的常用手段,因为加入的噪声和原噪声的频率都低于有用信号的频率,而高频 IMF 分量是自适应地提取的高频成分,所以更多的有用信号成分能够被排除在低频 IMF 分量之外,从而更好更完整地保护有用信号的信息,取得更好的滤波效果。

## 3. 雷达信号分析

图 1 是一例高仿状态下某测量雷达 60 M 第二中频信号波形。信号由数字示波器采集。由图可见,杂波比较明显。

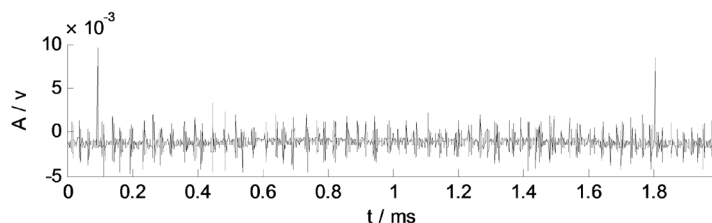
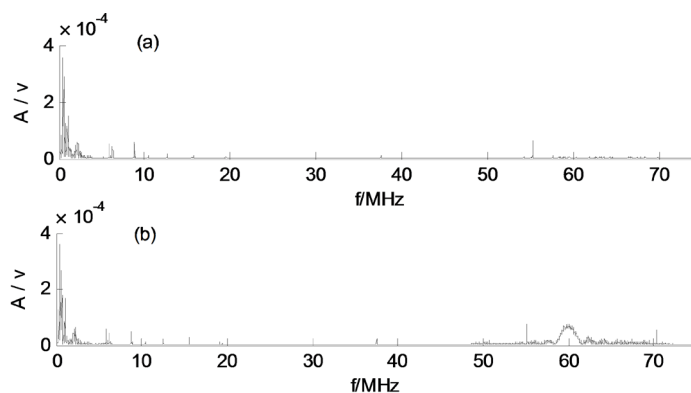


Figure 1. The IF signal waveform of a signal radar  
图 1. 某信号雷达 60M 第二中频信号波形

对杂波信号和含高仿回波的信号进行频谱分析,探究其频率特性及分布规律,为信号滤波提供数据参考。杂波信号和含高仿回波的信号频谱分析结果如图 2(a)、图 2(b)所示。

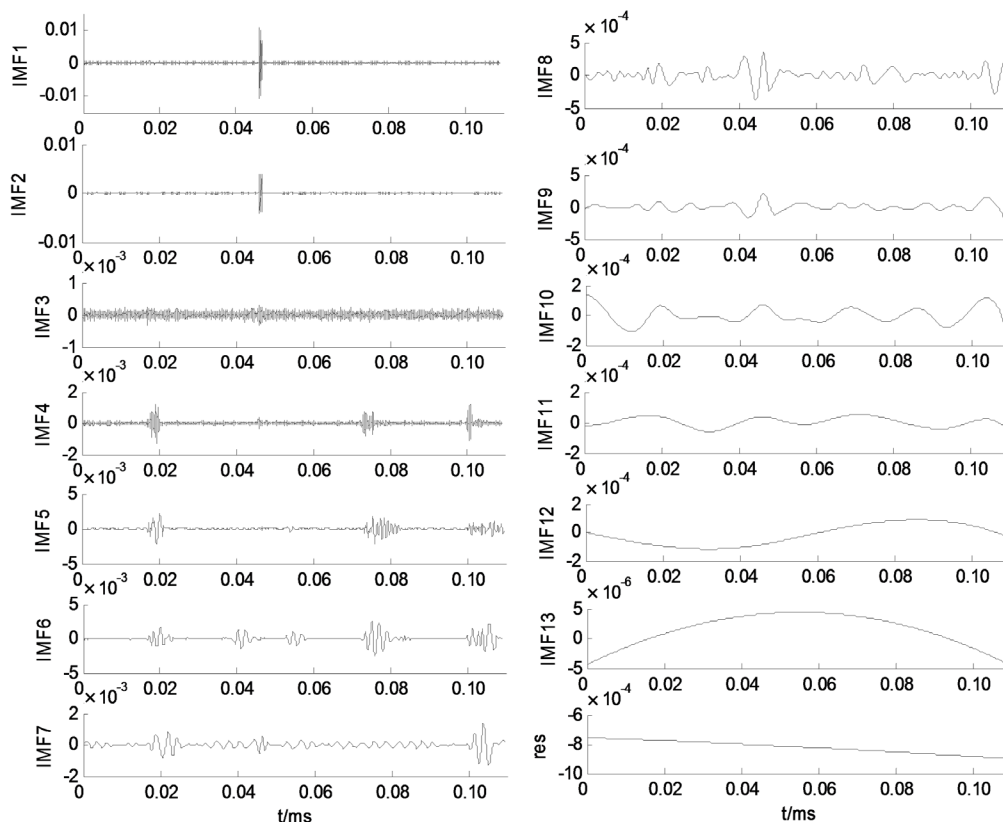


**Figure 2.** (a) Spectrum analysis of clutter signal; (b) Spectrum analysis of signal with high imitation echo

**图 2.** (a) 杂波信号频谱分析, (b) 含高仿回波的信号频谱分析

从图 2(a)中可知,杂波信号的频率主要分布在 20 MHz 以下,48 MHz 到 71 MHz 之间也有少量分布,而对比图 2(a)和图 2(b)可知,高仿回波信号的频率主要分布于中心频率为 60 MHz 的频率附近,二者在频率分布上区分度比较明显,有利于 EMD 将杂波成分与回波成分分解在不同频率的 IMF 分量内。

对含高仿回波的信号进行 EMD 分解,结果如图 3 所示。图 3 中可以看出含高仿回波的信号经过 EMD 分解得到若干个 IMF 分量和一个残余项。对各 IMF 分量作频谱分析,结果如图 4 所示。



**Figure 3.** Signal with high imitation echo EMD decomposition result

**图 3.** 含高仿回波的信号 EMD 分解结果

从图 3、图 4 中可知:经验模态分解将回波信号分解成多个 IMF 分量,以频率特征看,相对高频 IMF 分量最先被分解得到,而后分解出的 IMF 分量其频率逐渐降低;在保证回了回波信号的任一局部振荡无遗漏地体现的前提下,同一时间尺度的振荡不会于各 IMF 分量的同一局部位置出现;回波信号大部分的特征信息主要集中在首先被分解出来的若干个 IMF 分量中,这些 IMF 分量是回波信号的主要组成部分。各 IMF 分量的频率分布和时间尺度与回波信号保持同步变化,说明了经验模态分解的自适应性,回波信号的固有特征可以通过分解得到的 IMF 分量来体现。

对 IMF 分量进行 Hilbert 变换,即求得关于时间的瞬时频率及瞬时幅值,将幅值表示为频率-时间的分布,即求得回波信号的 Hilbert 谱,如图 5 所示。由 Hilbert 谱可知,回波信号幅值变化时,其主要贡献频率也随之变化;杂波分量的频率主要集中在 20 MHz 以下频段内,而出现回波信号成分处,其对信

号幅值的主要贡献频率则主要集中于 60 MHz 上下频段内, 这与图 4 中各个主要贡献分量的主要频率段相对应。

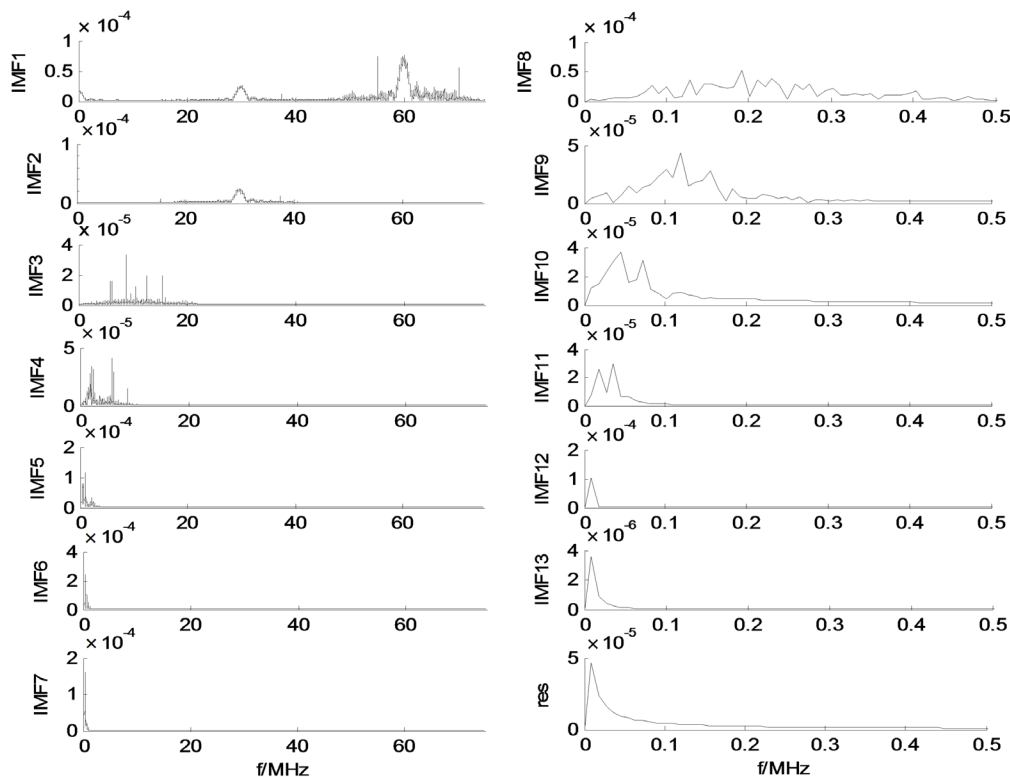


Figure 4. The IMF component of the signal with high imitation echo spectrum analysis

图 4. 含高仿回波的信号 IMF 分量的频谱分析

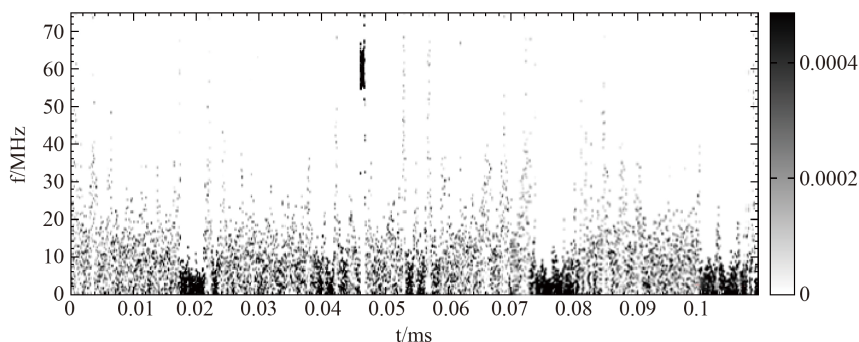


Figure 5. The Hilbert spectrum of signal with high imitation echo

图 5. 含高仿回波的信号 Hilbert 谱

#### 4. 信号滤波处理

通过上节分析可知, 高仿回波分量主要分布于高频 IMF 分量, 滤波的目的是尽量保持有用信号不失真的条件下最大限度地滤除杂波信号。在滤波信号重构时, 选取的 IMF 分量越少, 滤除杂波也就越多, 但是滤除原信号的有用成分也相应越多, 原信号失真相应更加严重; 选择的 IMF 分量越多, 原信号的有用成分也就更好地保留, 但杂波信号同样相应地增加。因此, 如何选择用于重构滤波信号的 IMF 分量是 HHT 滤波的重要环节, 直接影响着滤波效果。本文通过对比不同数量的 IMF 分量重构得到的滤波信号

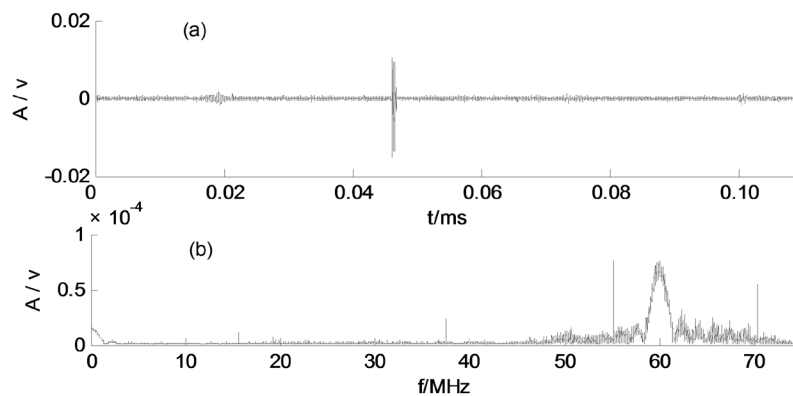
的信噪比估算以及分量中所含回波信号能量估算来确定所要选取 IMF 分量的数量。分量选择与重构所得滤波信号的信噪比估算及分量中回波能量估算如表 1 所示。

**Table 1.** Signal to noise ratio of reconstructed signal and estimation of echo energy in components

**表 1.** 重构信号信噪比及分量中回波能量估算

重构信号所选取 IMF 分量	重构信号信噪比(dB)	IMF 分量	回波信号能量估算
IMF1	62.0	IMF1	7.661E-3
IMF1, IMF2	60.8	IMF2	7.127E-4
IMF1, IMF2, IMF3	60.0	IMF3	2.131E-6
IMF1, IMF2, IMF3, IMF4	56.6	IMF4	3.199E-6
IMF1, IMF2, IMF3, IMF4, IMF5	47.6	IMF5	2.200E-6

通过表 1 对比结果，只取第一个分量 IMF1 重构信号，信噪比最高，但是 IMF2 中所包含的回波信号分量就丢失，而 IMF3、IMF4、IMF5 中所包含的回波信号较少，对重构信号中回波分量失真影响不大，因此，考虑最大限度的保留回波信号波形又兼顾较高的信噪比，折中地确定选取 IMF1，IMF2 重构滤波信号，重构结果如图 6(a)所示，对其进行频谱分析，结果如图 6(b)所示。



**Figure 6.** (a) Filtered signal waveform, (b) Filtered signal spectrum analysis

**图 6.** (a) 滤波信号波形, (b) 滤波信号频谱分析

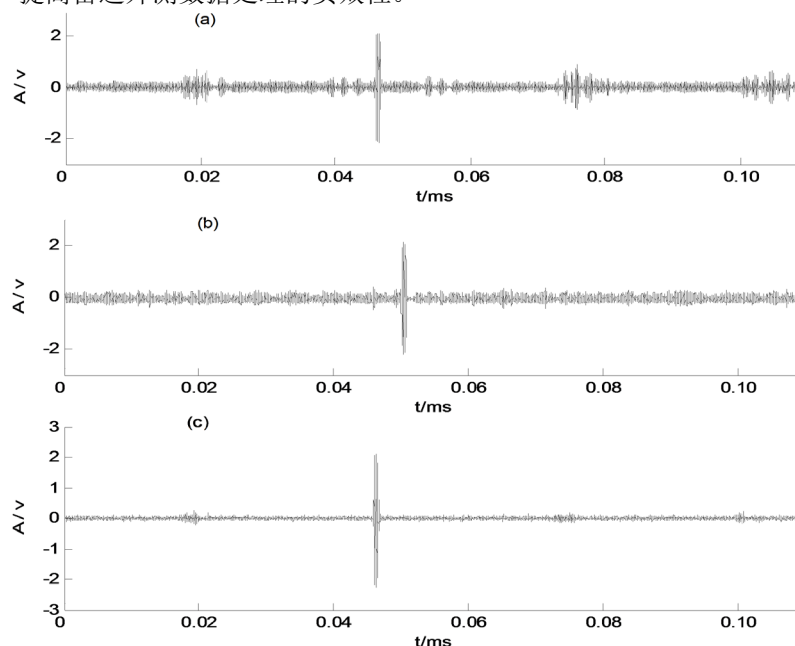
从图 6(a)可以看出，大多数杂波已经被滤除，滤波信号毛刺较少，比较干净，结合图 6(b)中的滤波信号频谱也可以看出，滤波信号主要含有的成分其频率集中分布在 60 MHz 周围，频率低于 20 MHz 的杂波已近很大程度上被滤除。

为了更直观地展现滤波效果，按照雷达设备对中频信号处理方式，对滤波前原始信号和滤波信号进行仿真放大、下变频处理，仿真输出 12 MHz 第三中频信号，并与高仿状态下雷达实测第三中频信号波形对比，对比结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，原始信号未经滤波，杂波信号明显，强度较大；经过雷达设备硬件处理过的信号，杂波信号强度降低，毛刺减少，滤波效果明显；经过 HHT 算法滤波处理的信号，杂波信号强度更小，毛刺更少，滤波效果良好，能够较为有效地滤除杂波，达到凸显回波信号的目的。

通过对雷达实测信号的仿真分析可知，HHT 滤波在雷达滤波方面效果较好，能够大幅提高雷达滤波的效果。如果能够将雷达信号数字滤波提前到高频信号部分的话，不仅能够避免硬件滤波器的不足之处

在应用的影响, 而且能够解决硬件滤波器对雷达高频信号滤波的数字化发展的限制, 实现雷达高频信号数字化处理应用, 提高雷达外测数据处理的实效性。



**Figure 7.** (a) Waveform of amplified and frequency scaled original signal, (b) The measured third IF signal waveform, (c) Waveform of amplified and frequency scaled filtered signal

**图 7.** (a) 原始信号放大、变频后波形, (b) 实测第三中频信号波形, (c) 滤波信号放大、变频后波形

## 5. 小结

本文利用希尔伯特黄变换(HHT)的原理和过程, 提出了雷达信号的滤波方法, 最后通过对雷达信号的滤波仿真, 对比了雷达设备现用的滤波与 HHT 滤波的滤波效果, 得出 HHT 滤波的效果比设备现有滤波的效果好, 同时验证了此方法对雷达信号的滤波的有效性。

在研究过程中, 发现 HHT 滤波对参数的依赖比较大, 当信号特征不同时, 参数的选取对滤波结果有较大影响; 本文应用 HHT 算法探讨雷达信号的滤波还只是理论应用、仿真研究层面, 对于其实际的应用实现以及应用效果、价值验证还未能开展研究, 后续需重点研究在设备中的实际应用。

## 参考文献

- [1] 周海军, 李磊. 地震波形的 HHT 特征提取和 GMM 识别研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2018(4): 69-73.
- [2] 周彪. 基于改进 HHT 的桥梁结构震后损伤识别[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] 王超, 沈斐敏. 一维 HHT 变换在探地雷达数据处理中的应用[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 328-334.
- [4] 王陶. HHT 与压缩传感在雷达回波分析中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [5] Huang, N.E., Zheng, S., Steven, R., *et al.* (1998) The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, **454**, 903-993. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [6] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.