



国防科技图书出版基金

Theory and Application of Local  
Wave Analysis Method

# 局域波分析理论 及工程应用

盖 强 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

Theory and Application of Local Wave Analysis Method

# 局域波分析理论及 工程应用

盖强 王建国 徐存亮 孙涛 孙明珠 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

局域波分析理论及工程应用/盖强等著. —北京:国防工业出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 10485 - 1

I. ①局... II. ①盖... III. ①频谱分析 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234082 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 插页 2 印张 13 字数 222 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

## 前 言

频谱图是在频域内描述动态信号的一种方法,谱图上的每一点都代表一个同频率的周期信号。由于该周期信号分布在整个时间域内,这类信号通常被称为全域波。离散傅里叶变换以信号的采样频率及其谐频为基,对动态信号进行分解,是一种固定时窗(采样间隔)和固定频窗(频率间隔)的变换,属于全域波变换。而非平稳信号的主要特征是时变性,其频率是瞬变的,变化的频率仅在某一局部时间内才存在,这类信号通常被称为局域波。快速傅里叶变换(FFT)及其相关的谱分析(自谱、互谱、倒谱等)为解决全域波问题提供了方便快捷的方法,但传统傅里叶方法处理信号时有3个基本假设,即线性、高斯性和平稳性,而这些特性对于时变的局域波分析显示出很大的局限性。例如,在 $[0, T]$ 时间段上,一个由两个正弦信号  $\sin(2\pi \times 10t) + \sin(2\pi \times 20t)$  叠加的信号和一个在 $[0, T/2]$ 时间段上是  $\sin(2\pi \times 10t)$ ,而在 $[T/2, T]$ 时间段上是  $\sin(2\pi \times 20t)$ ,这样一个在  $T/2$  时刻频率跳变的信号,它们傅里叶变换后的频谱图是相同的,但这两个信号在时域上却完全不一样,后者是个时变的非平稳信号。为此,各类时频分析方法相继出现,短时傅里叶变换(SFFT)、小波分析、Wigner-Ville 分布等方法在不同程度上对非平稳信号的时变性给予了恰当的描述,大大改进了 FFT 方法的不足,但总体来说,这些方法仍属于基于傅里叶分析的全域波分析范畴。因此,探索分析非平稳信号的新方法,是人们一直以来追求的目标。

1998 年,美国学者 N. E. Huang 等提出了一种新的理论和计算方法,特别适合于非平稳信号的分析与处理,被称为“基于经验的模式分解方法和希尔伯特时频谱”,后来该方法被国外学者称为 Hilbert - Huang 变换(HHT)。基于该变换,作者在攻读博士及博士后期间与导师合作提出了局域波分析理论,指出 Hilbert - Huang 变换是局域波分析的一种实现方法,发展和完善了 HHT 的理论和计算方法,并将该方法用于舰船主机和机械设备振动故障诊

断等工程领域。近年来,作者一直对局域波分析方法进行跟踪研究,实现了多维局域波分析的分解算法,并将其成功应用于图像信号分解和噪声处理等领域,同时对多维局域波分析理论与应用进行了分析与研究。

局域波分析是一种新的时频分析方法,该方法源于瞬时频率的概念,且能基于动态信号时域局部特征,把复杂数据分解成少量的几个基本内蕴模式函数分量,通过 Hilbert 变换可将信号的局部特征正确地描述在时频域内。局域波分解的基不是固定的,它随动态信号波形的变化而变化,具有自调节自适应的特征,摆脱了傅里叶理论的束缚。与传统的时频分析方法相比,它更适用于非平稳信号的分析与处理,并已表现出独特的优点,与小波变换相比具有更高的时频分辨率,与 Wigner - Ville 分布相比没有交叉项干扰。因此,发展并完善局域波分析的理论体系,开拓其工程应用领域,对现实广泛存在的非平稳信号的研究具有重要意义。该方法在处理非平稳数据时取得了显著的效果,并已成功地应用在地球科学、设备故障诊断工程和生物医学工程等领域。

全书共 6 章,内容分为两大部分:局域波分析理论及研究(第 1 章~第 5 章),局域波时频分析软件实现及工程应用(第 6 章)。前 5 章构成局域波分析理论的一个研究体系,从时频分析的意义及其基本原理和方法出发,引出了局域波时频分析的基本原理,并重点阐述了局域波分析理论中的几个关键问题,此外对局域波的频率多分辨分析特性进行了全面的分析和研究。在此基础上,探讨了多维局域波的分解方法,给出了二维局域波分解算法及二维局域波时频谱图的实现,并对多维局域波分解方法进行了分析和研究。第二部分主要对局域波时频分析软件的实现进行了相关介绍,并详细描述了局域波时频分析方法的工程应用,为该理论在相关领域的应用提供了指导和支持。

局域波分析是近年来针对非平稳信号分析的一次重大创新。作者作为国内最早开展此项研究的学者之一,长期从事该领域的研究并取得大量阶段性成果和经验。本书是作者在该领域研究成果的一次提炼及汇总,该书的出版发行,可以满足相关领域研究人员对非平稳信号处理方法的需求。

在本书的编写及出版过程中,得到了多位专家和同仁的热心帮助和大力支持,邹岩崑、余泊提供了大量图片和资料,胡红英提供了第 4 章的大量内容

和资料。国防科技图书出版基金评审委员会的专家们给出了中肯而宝贵的意见,对此,向他们表示诚挚的感谢,同时还要感谢本书引用文献的众多作者们。

由于该理论正在蓬勃发展,加之篇幅有限,本书难免会有不足甚至不妥之处。诚恳希望诸位专家和同仁以及广大读者批评指正。

作 者

2015 年 5 月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                    | 1  |
| 1.1 傅里叶方法及其局限性              | 3  |
| 1.2 传统时频分析                  | 7  |
| 1.2.1 短时傅里叶分析               | 7  |
| 1.2.2 Gabor 分析              | 8  |
| 1.2.3 小波分析                  | 9  |
| 1.3 局域波分析概述                 | 11 |
| 1.3.1 局域波分析基本思想             | 11 |
| 1.3.2 局域波分析的应用              | 13 |
| 1.4 本章小结                    | 17 |
| 参考文献                        | 17 |
| 第 2 章 局域波分析方法               | 21 |
| 2.1 局域波分析基本概念               | 24 |
| 2.1.1 瞬时频率                  | 24 |
| 2.1.2 基本内蕴模式函数分量            | 29 |
| 2.1.3 时间特征尺度                | 31 |
| 2.2 局域波分析的基本原理研究            | 33 |
| 2.2.1 局域波分解                 | 34 |
| 2.2.2 希尔伯特变换                | 35 |
| 2.2.3 希尔伯特时频谱和边界谱           | 36 |
| 2.3 几种局域波分解方法               | 39 |
| 2.3.1 基于经验模式分解(EMD)的局域波分解方法 | 39 |

|            |                             |           |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 2.3.2      | 基于自适应时变滤波分解法(ATVFD)的局域波分析方法 | 45        |
| 2.3.3      | 基于极值域模式分解法(EMMD)的局域波分析方法    | 45        |
| 2.3.4      | 三种局域波分解方法的比较                | 48        |
| 2.4        | 局域波分解边界效应                   | 50        |
| 2.4.1      | 边界效应产生原因分析                  | 51        |
| 2.4.2      | 几种边界效应消除方法                  | 52        |
| 2.4.3      | 几种边界效应消除方法比较                | 54        |
| 2.5        | 本章小结                        | 56        |
|            | 参考文献                        | 56        |
| <b>第3章</b> | <b>局域波时频谱的频率多分辨率分析</b>      | <b>59</b> |
| 3.1        | 傅里叶变换的时域分辨特性                | 61        |
| 3.2        | 短时傅里叶变换的时频分辨特性              | 62        |
| 3.3        | 小波变换的时频分辨特性                 | 65        |
| 3.4        | 维格纳分布的时频分辨特性                | 68        |
| 3.5        | 局域波时频谱频率分辨特性                | 69        |
| 3.6        | 本章小结                        | 73        |
|            | 参考文献                        | 74        |
| <b>第4章</b> | <b>局域波分析特性</b>              | <b>75</b> |
| 4.1        | 局域波分解能力分析                   | 77        |
| 4.1.1      | 采样频率对局域波分解能力的影响             | 77        |
| 4.1.2      | 频率差、能量差与局域波分解能力的关系          | 80        |
| 4.1.3      | 正(余)弦调幅信号的局域波分析             | 83        |
| 4.2        | 局域波基本模式分量的希尔伯特变换分析          | 86        |
| 4.3        | 局域波分解的伪分量判断                 | 91        |
| 4.3.1      | 局域波过分解原因分析                  | 91        |
| 4.3.2      | 伪分量鉴别方法                     | 92        |
| 4.4        | 局域波分解完备与正交性                 | 95        |
| 4.4.1      | 局域波分解完备性分析                  | 95        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 4.4.2 局域波分解正交性分析·····        | 97         |
| 4.5 局域波分解方法的性质·····          | 100        |
| 4.6 本章小结·····                | 101        |
| 参考文献·····                    | 102        |
| <b>第5章 多维局域波分析方法研究·····</b>  | <b>103</b> |
| 5.1 二维局域波分析研究·····           | 105        |
| 5.1.1 二维基本内蕴模式函数分量的递推形式····· | 106        |
| 5.1.2 二维局域波分解算法的实现·····      | 107        |
| 5.1.3 二维局域波时频谱图·····         | 110        |
| 5.2 三维局域波分解算法·····           | 113        |
| 5.2.1 基于参数化的三维网格模型局域波分解····· | 113        |
| 5.2.2 基于高度的三维网格模型局域波分解·····  | 126        |
| 5.2.3 基于基曲面的三维网格模型局域波分解····· | 139        |
| 5.3 本章小结·····                | 151        |
| 参考文献·····                    | 152        |
| <b>第6章 局域波分析应用研究·····</b>    | <b>155</b> |
| 6.1 局域波在舰用柴油机磨损故障中的应用·····   | 157        |
| 6.1.1 舰用柴油机磨损故障的诊断方法研究·····  | 157        |
| 6.1.2 舰用柴油机汽缸爆发信号分析·····     | 159        |
| 6.2 多维局域波分析应用·····           | 163        |
| 6.2.1 局域波分析在二维图像降噪中的应用·····  | 163        |
| 6.2.2 局域波在三维网格中的应用·····      | 164        |
| 6.3 本章小结·····                | 178        |
| 参考文献·····                    | 179        |
| <b>附录 局域波分析软件包简介·····</b>    | <b>180</b> |

# Contents

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapter 1 Introduction .....</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1 FFT and its limitation .....                            | 3         |
| 1.2 Traditional time – frequency analysis .....             | 7         |
| 1.2.1 SFFT analysis .....                                   | 7         |
| 1.2.2 Gabor analysis .....                                  | 8         |
| 1.2.3 Wavelet analysis .....                                | 9         |
| 1.3 Local wave analysis .....                               | 11        |
| 1.3.1 Principle on local wave analysis .....                | 11        |
| 1.3.2 Application of local wave analysis .....              | 13        |
| 1.4 Summary .....                                           | 17        |
| Reference .....                                             | 17        |
| <b>Chapter 2 Local wave method .....</b>                    | <b>21</b> |
| 2.1 Basic concept of local wave analysis .....              | 24        |
| 2.1.1 Instantaneous frequency .....                         | 24        |
| 2.1.2 Intrinsic mode function .....                         | 29        |
| 2.1.3 Characteristic of time scale .....                    | 31        |
| 2.2 The basic principle of local wave analysis .....        | 33        |
| 2.2.1 Local wave decomposition .....                        | 34        |
| 2.2.2 Hilbert transform .....                               | 35        |
| 2.2.3 The spectrum and boundary spectrum Hilbert .....      | 36        |
| 2.3 Several methods of local wave decomposition .....       | 39        |
| 2.3.1 Empirical mode decomposition .....                    | 39        |
| 2.3.2 Adaptive time – varying filtering decomposition ..... | 45        |

|                  |                                                                                                                |           |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.3            | Extremum field mean mode decomposition .....                                                                   | 45        |
| 2.3.4            | Compare for decomposition methods .....                                                                        | 48        |
| 2.4              | The local wave decomposition's boundary effect .....                                                           | 50        |
| 2.4.1            | Cause analysis of boundary effect .....                                                                        | 51        |
| 2.4.2            | Method for eliminating boundary effect .....                                                                   | 52        |
| 2.4.3            | Comparison for boundary effect elimination method .....                                                        | 54        |
| 2.5              | Summary .....                                                                                                  | 56        |
|                  | Reference .....                                                                                                | 56        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Local wave time – frequency spectrum frequency resolution .....</b>                                         | <b>59</b> |
| 3.1              | FFT frequency spectrum resolution .....                                                                        | 61        |
| 3.2              | Time – frequency resolution characteristics short – time FFT<br>transform .....                                | 62        |
| 3.3              | Time – frequency resolution characteristics of wavelet transform .....                                         | 65        |
| 3.4              | Time – frequency resolution characteristics of Wigner transform .....                                          | 68        |
| 3.5              | Time – frequency resolution characteristics of local wave analysis .....                                       | 69        |
| 3.6              | Summary .....                                                                                                  | 73        |
|                  | Reference .....                                                                                                | 74        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Characteristics of local wave analysis .....</b>                                                            | <b>75</b> |
| 4.1              | The ability of local wave decomposition .....                                                                  | 77        |
| 4.1.1            | Influence of sampling frequency on local wave<br>decomposition ability .....                                   | 77        |
| 4.1.2            | The relationship between the frequency difference,<br>the energy difference and local wave decomposition ..... | 80        |
| 4.1.3            | Local wave analysis on $\sin(\cos)$ modulation signal .....                                                    | 83        |
| 4.2              | Hilbert transform analysis of intrinsic mode function .....                                                    | 86        |
| 4.3              | Pseudo component judgment of the local wave decomposition .....                                                | 91        |
| 4.3.1            | Analysis the reason for over decomposition .....                                                               | 91        |
| 4.3.2            | Pseudo component identification method .....                                                                   | 92        |
| 4.4              | Completeness and orthogonality features of the local wave<br>decomposition .....                               | 95        |

|                  |                                                                           |            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.1            | Analysis of local wave decomposition completeness .....                   | 95         |
| 4.4.2            | Analysis of local wave decomposition of orthogonality .....               | 97         |
| 4.5              | The nature of the local wave decomposition method .....                   | 100        |
| 4.6              | Summary .....                                                             | 101        |
|                  | Reference .....                                                           | 102        |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Analysis method of multidimensional local wave .....</b>               | <b>103</b> |
| 5.1              | Two – dimensional local wave analysis .....                               | 105        |
| 5.1.1            | Recursive form of two – dimensional intrinsic mode function .....         | 106        |
| 5.1.2            | Two – dimensional local wave decomposition algorithm .....                | 107        |
| 5.1.3            | Two – dimensional local wave spectrum .....                               | 110        |
| 5.2              | Three – dimensional local wave decomposition algorithm .....              | 113        |
| 5.2.1            | 3D mesh local wave decomposition based on model<br>parameterization ..... | 113        |
| 5.2.2            | 3D mesh local wave decomposition based on height .....                    | 126        |
| 5.2.3            | 3D mesh local wave decomposition based on mode's base<br>surface .....    | 139        |
| 5.3              | Summary .....                                                             | 151        |
|                  | Reference .....                                                           | 152        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>Application of local wave analysis .....</b>                           | <b>155</b> |
| 6.1              | Application in diesel engine fault diagnosis of local wave analysis ...   | 157        |
| 6.1.1            | Diagnosis method of ship's diesel engine wear fault .....                 | 157        |
| 6.1.2            | Analysis the outbreak signal of ship's diesel engine cylinder .....       | 159        |
| 6.2              | Application of multidimensional analysis of local wave .....              | 163        |
| 6.2.1            | Application in image denoising for local wave analysis .....              | 163        |
| 6.2.2            | Application in 3D mesh mode processing for local wave<br>analysis .....   | 164        |
| 6.3              | Summary .....                                                             | 178        |
|                  | Reference .....                                                           | 179        |
| <b>Appendix</b>  | <b>Local wave analysis software package .....</b>                         | <b>180</b> |

# 第 1 章

---

## 绪论

- 1.1 傅里叶方法及其局限性
  - 1.2 传统时频分析
  - 1.3 局域波分析概述
  - 1.4 本章小结
- 参考文献

