

局域波自适应时频分析特性研究

海军大连舰艇学院 辽宁大连

K 1 局域波自适应时频分析是处理非平稳数据较为有效的新方法 该文较系统地研究了局域波分析的瞬时频率估计、分解的物理意义、高于小波分析的时频分辨率、没有时频分布交叉项和分解二维图像的特性

1 o M 非平稳数据 自适应时频分析 二维局域波分析
Ï ms Ê | Ó D S M ' Ó c | |

· · · · · · 1 ° / f i f l } Z f e } ! " # ' } \$ % ~ 1 \$ / & ' f l () / ' % } f l ~ f l ' } ~) } * % / & + / L }

! " # \$ % &
(Dalian Naval Academy, Dalian, China)

1, ' ~ % - ' () * +) %, * , - .. +) / 0 ' . (+, , , % ' ! 0, ((0 + 0 + , +, . 0 * , 1 + 0 , 0 (0 % + / . 0 , + / ' . 1 + , , 1, . 21 + % 0) 3 4 / . 21 + % , 1 0) %, - 0 1 + , , / , 0 5, ' , 31 %, ' ' / , * ((+ / (+, , ' , + 1, , ' . } ~ / ' ° - , % ' () / . 21 + % %, ' / , * +) %, ,

1 引言

数据分析在理论研究和应用中非常重要 无论是从自然测得的还是数值建模的数据 大多都存在以下几点问题 数据周期太短 数据是非平稳的 数据是非线性的过程 处理这种数据 可供选择的方法很少 \$ 3 \$ 1 变换 \$ 3 \$ 1 , . / \$ \$ 6 7 是近几年来解决上述问题非常有效的局域波时频分析方法 它能自适应地提取非平稳数据的局部均值曲线 将复杂的叠加信号分解成少数几个、且有物理意义的内蕴模式分量函数 从而得到有意义的瞬时频率和希尔伯特时频谱

由于局域波时频分析方法在解决非平稳数据处理问题具有显著的效果 所以其理论和应用得到了各界学者的广泛关注和研究 文献6 7在提高其分解速度方面作了进一步的研究 文献6 7在抑制该方法的边界效应方面提出了更好的方法 文献6 7用局域波分析方法建立时变参数 89 模型 既保持了原方法的特点 又扩大了应用范围 此外 局域波分析已成功地应用在地球科学6 7、设备状况监测6 7和生物医学6 7等应用领域

本文在论述局域波分析基本原理的基础上 系统研究了局域波分析的瞬时频率估计、内蕴模式分量函数的物理意义、高于小波分析的时频分辨率、没有时频分布交叉项和二维局域波分解图像的特性

2 Hilbert Huang Method (HHT)

2.1 希尔伯特-黄变换 (EMD)

根据函数要得到有意义的瞬时频率的约束条件^[1], 文献

[1]提出了内蕴模式函数概念和 9 < 筛选算法. 内蕴模式函数必须满足两个条件: () 信号极值点的数量与过零点的数量必须相等, 或最多相差一个; () 在任一时间点上, 信号极大值定义的上包络和极小值定义的下包络的局部均值为零. 9 < 算法通过不断剔除信号的极大值和极小值连接的上下包络曲线的均值, 将原始信号 $X(t)$ 分解成如下形式

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

式(1)将原始数据分解成 n 个内蕴模式分量函数 c_i , 及一个趋势分量 r_n . 从基函数理论角度看, 9 < 对不同信号可分解出不同的基函数 c_i , 基来源于信号本身同时适应该信号的特点, 不同于傅立叶分解的一系列恒定幅度与频率的正余弦函数基, 也不同于小波分解预先确定的基函数. 因此, 局域波分解不仅具有自适应性且提高了信号分解的效率, 并使这种分解方法可以处理非平稳数据.

2.2 希尔伯特变换

对任意的时间序列 $X(t)$, 可得到它的希尔伯特变换 $Y(t)$, 从而得到一个解析信号

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (2)$$

其中 $a(t) = [X(t)^2 + Y(t)^2]^{1/2}$,

$$\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (3)$$

希尔伯特变换获得了一个独特的定义幅度和相位的函数. 即使有了希尔伯特变换, 将瞬时频率定义为下式

$$\omega = d\theta(t)/dt \quad (4)$$

时仍有很大的争议. 这导致了 9 0 引入了 单调分量函数^[1], 即数据在任何时刻只有一个频率值的分量, 被称为

单一分量. ;9 < 分解得到的内蕴模式函数分量 $C_j(t)$ 正好满足了单一分量的要求. 对每一个内蕴模式函数分量 $C_j(t)$ 进行 $\$ 3 \1 变换, 可得到 $C_j(t)$ 的解析表达式为 $a_j(t) i^{-\omega_j(t) dt}$. 最后得到 $X(t)$ 的解析表达式

$$X(t) = PR \sum_{j=1}^n a_j(t) i^{-\omega_j(t) dt} > r_n \quad ()$$

从式 () 可以看出, 每一个内蕴模式分量函数都可以是幅度或频率调制的, 这就已经打破了固定幅度与固定频率的傅立叶变换的限制, 并且它的分解基不是固定的, 而是随动态信号波形的变化而变化, 具有自调节自适应的特征, 因此局域波分析可以处理非平稳数据. 同时式 () 可以把信号幅度在三维空间中表达成时间与瞬时频率的函数 $H(\omega, t)$, 被称为希尔伯特时频谱.

$\$ 3 \1 变换方法从根本上摆脱了傅立叶变换理论的束缚. 但这种基于经验的新方法还处在发展阶段, 本文对局域波分析的特性方面做了进一步的研究工作.

3 $\$ H \hat{O} q \ 9 + \ddot{Y}$

瞬时频率每天都能感受到, 如变化着的色彩、变化着的音调等. 由 讨论得知, 对于实信号, 瞬时频率是实信号对应的解析信号相位的导数, 但存在自相矛盾^[1]: () 瞬时频率可能不是信号频谱中的频率之一; () 瞬时频率可能是负的; () 对于一个带限信号, 它的瞬时频率可能在频带之外. 其原因为大多数信号是由多个频率复合的. 用局域波分析方法可解决上述矛盾. 如对于一个三线性调频叠加信号

$$s(t) = , \ \pi(> t)t) > , \ (\pi(> t) > , \ (\pi(> t)t) \quad ()$$

原信号和用局域波分析分解得到的 一个分量及一个趋势项如图 所示. 图 是该信号的理论瞬时频率图. 图 是局域波分析得到的各分量合成的瞬时频率图. 图中瞬时频率的波动是吉布斯效应所致.

可以看出, 局域波分析可以正确反映出叠加信号中的各分量的瞬时频率, 解决了直接用实信号对应的解析信号相位的导数求瞬时频率存在的矛盾, 为复杂信号的瞬时频率分析提供了有效的工具.

4 $H \hat{O} s f + \ddot{Y}$

4.1 $H \hat{O} s O q$

以下是 $\$ \$$ 与小波时频分析比较的一个实例 图 是一

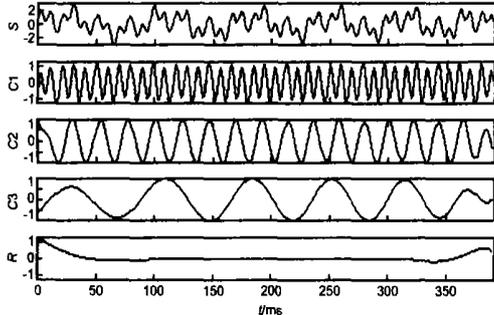


图1 原信号、3个分量及一个趋势项

个 $\$B$ 到 $\$B$ 跳变的正弦信号 图 是该信号用9 小波变换得到的时频图 图 是 $\$ 3 \1 变换的时频图 比较图 和图 局域波分析时频图中高低频率段的瞬时频率的抖动范围基本不超过 $\$B$ 而小波分析时频图低频段的瞬时频率的抖动范围大于 $\$B$ 高频段的瞬时频率的抖动范围大于 $\$B$ 局域波分析的时频分辨率明显高于小波分析

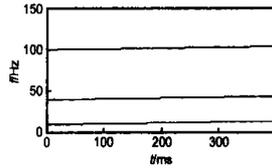


图2 理论上的信号瞬时频率图

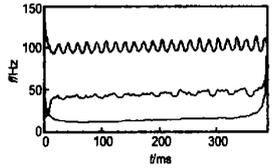


图3 3个分量的局域波瞬时频率图

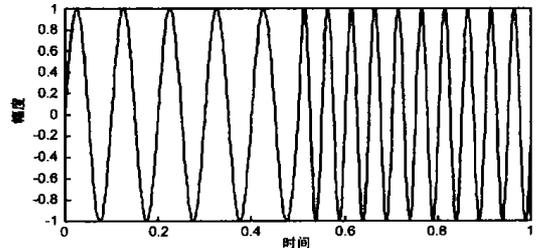


图4 原始跳变信号

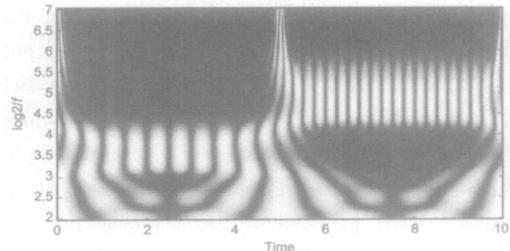


图5 小波分析时频图

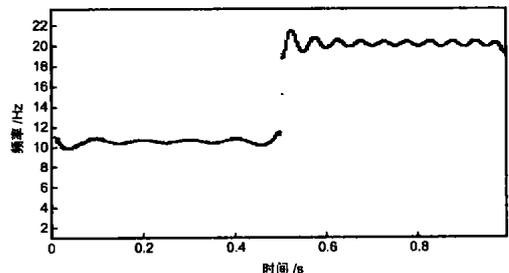


图6 局域波分析时频图

4.2 $= \ T s f " \neq p \varnothing i l$

对于信号 $s = , \ \pi \ t) > , \ \pi \ t) >$, 用小波分解得出的 一个分量如图 所示. 由于小波分解只强调了数学的正交性, 并未能将原始信号内蕴的 $\$B$ 和 $\$B$ 正弦信号分离 局域波分析给出的两分量 如图 所示 正是原信号中内蕴的 $\$B$ 和 $\$B$ 正弦信号 因此局域波分析的内蕴模式分量函数代表了原复杂信号的各个成份 具有明确的物理意义

4.3 $s \cdot | i \text{CE} - \ddot{A} [$

线性时频表示满足叠加原理 在处理多分量信号时 可以

先分解成单分量信号分别处理 然后再将结果叠加 二次型时频分布 如魏格纳分布的情况与线性时频分布大不相同 因为二次型或双线性变换破坏了线性叠加原理 产生一定的交叉干扰项 目前已有多种抑制交叉干扰项的方法 但都以牺牲时频分辨率为代价 局域波分析是一种广义线性时频分析方法^{6 7} 比二次型时频分布的计算量要小得多 而且不存在交叉干扰项 可以快捷地给出有效的时频图



图 11 原图及 HHT 分解出的两个子图像分量 分离 而且没有交叉干扰项

此外 局域波分析可自适应提取信号中的不平稳因素 即趋势项 比傅立叶分析频率分辨率高出两倍 有频率多分辨率特性 是处理非线性信号的一种自适应非线性滤波器^{6 7}

$$5 = \gg \times o s^3 + \ddot{Y}$$

一维局域波分析方法可扩展到二维图像的分解处理^{6 7} 图 是用二维局域波分析处理标准 ψ 图像的结果 图 a 是 ψ 的标准原始图像 图 b)、(c) 是用二维局域波变换分解处理后得到的两幅子图像 图 b 包含原始图像中的细节部分 而图 c 则包含了原始图像中的轮廓部分 显示图像灰度被线性变换拉伸 与两幅原始图像比较可以发现 原图像中灰度变化缓慢的部分在细节图像中都变成了一种中间灰度 而原图像中灰度陡变的边缘和灰度陡变边缘包围的较小细节区域在细节图像中都被清晰地提取出来 轮廓图像 + 可被继续分解出细节和轮廓 该方法可以提取出清晰的图像细节 为图像的进一步处理打下了良好的基础

6 2 • Ô

本文较系统地研究了局域波自适应时频分析的诸多特性 通过典型的仿真实例 验证了所述特性优于小波分析和魏格纳分布 进一步扩展到了二维图像分解 表明了这种方法的有效性 该方法为非平稳信号的分析提供了一条行之有效的新途径 具有深入的理论研究价值和应用价值

• I ÓD

6 7 \$1 ; #0 A0 * A8 0 / (+ / ' ' + / (, ' 0 0 3 ,(+ / / , % / , , % ,6C7 D +8 A + * ' E 6 7 \$1 ; 19 * * A8 + . ' + / . 0 / (+ / ' ' + / (, ' 0 3 ,(+ % , 6C7 D + ' , . 0 8 % A + % . * ' E

6 7 盖强 马孝江 张海勇 等 几种局域波分解方法的比较研究 6C7 系统工程与电子技术 E ! " 9 4 # \$ % ? / (, 1' % . ' + / (, / 0 ' , 1, + -) / 0 ' 6C7 A % / ; ' ; + + , E

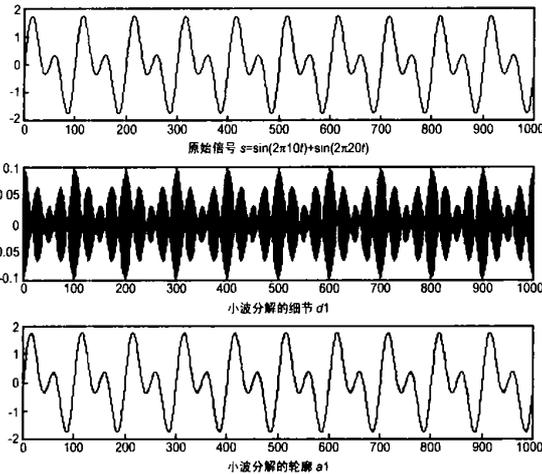


图 7 小波分析分解出的 2 个分量

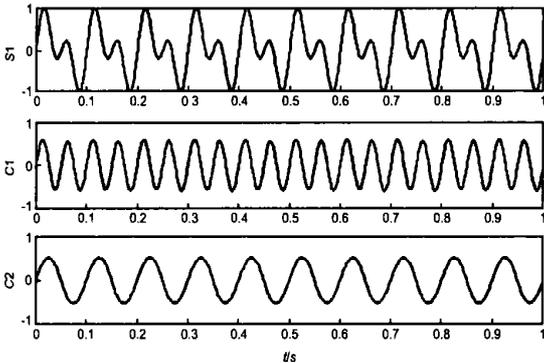


图 8 原信号和局域波分解出的 2 个分量

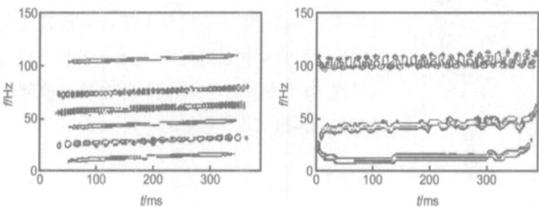


图 9 魏格纳分布时频图

图 10 局域波时频分布

图 是用魏格纳分布求得的时频分布图 图中从上到下谱线一、四、六分别对应式 中三个分量的时频谱线 而谱线二、三、五为交叉干扰项 这些伪信息 给实际数据分析复杂信号带来了困难 而图 为式 所对应信号的局域波分析时频分布图 可见这种时频表示形式可以把三个分量信号很好地

6 7 F1G 9 C - 9 0' . 0 %, . ,
 % 3 A ' !, &, 9 +0
 H1 < , ,6 7 D + ' , . ! ? . +
 3 ; 6?7 ?0 D! ? ; E

6 7 盖强 马孝江 张海勇 等 一种处理局域波法中边界效
 应的新方法67 大连理工大学学报 E

! " 9 4 # \$ % -
 / 0' . (+ , , ' .. + * +) / 0' 67
 C1 . < &) , % . +0 %
 E ?0 ,

6 7 邓拥军 王伟 钱成春 等 ; 9 < 方法及 \$ 3 变换中
 边界问题的处理67 科学通报 E

< ; F 4 " ! ?0 +01 G 1'
 % (+ , , +0 21 ; 9 < / 0' ' \$ 3 ,
 . / 67 ?0 , A+ + G1 E
 ?0 ,

6 7 张海勇 马孝江 盖强 非平稳信号的一种 89 模型
 分析方法67 电子科学学报 E

\$ % ! " 9 4 - / 0'
 . 89 / ' . , %A 67 C1 .
 ; + + ' ! . / +0 % E
 ?0 ,

6 7 , D \$ 1 ; ? / (, . 1 , +
 / ' , 0 / , (0 + , + +) , ' 0 (0% +
 (/ , 67 ! ; ; , + , , + + ' 8
 / A , E

6 7 \$ 1 ; \$, \$ A0 0 , . / (1'
 + , , +0 , 0 + 33 + , . (1 8 + 67 C1
 . D0% + @+ (0% E

6 7 \$ 1 ; A0 #0 A) 8* -) - .
 - -) , 0 \$ 3 , (+ 1 / 67 1 8) H1'
 9 +0 年刊 E

6 7 王珍 马孝江 局域波时频法在柴油机缸套活套磨损诊
 断中的应用研究67 内燃机学报 E

#0 9 4 !) , ' , , .
 ' , (, - . 1 , 3 , ' + -)
 / . 21 + % ((+0 67 , + , . ? A ! ? ;
 E ?0 ,

6 7 ?01 C " #0 \$ % 0 ; 9 < 9 0' ' ' .

! , &, A0 (< , , 6 7 D + ' . 0 !
 A% (, 1 / , ' 9 , 1 / 6?7 ?0 ! A9
 E

6 7 D ((, , + ' 0 8 C ; , , 5 C ((+ .
 0 \$ 3 \$ 1 , . / 0 % , . / +1 ' %
 / + , / 1 , 67 C1 . D0% + ?0 / , %
 E

6 7 \$ 1 A0 #0 \$ 1 ; ; ;
 % , . G + 3 , ; 5 / (. G ' D , , 1
 @ < % 7 D + . + ' A + 6?7 & A D A
 E

6 7 G , 0, 0 G ; , / ' (0 , , 1 , .
 21 + % . , (! H1' / , 67 D + ! ; ; ;
 E

6 7 ? 0 * / H 21 + % % , 67 D + \$;
 - ' ? ... C

6 7 盖强 局域波时频分析方法的理论研究与应 6 < 7 大
 连 大连理工大学

! " 8 , +0 ' ((+ 0 0 % . * +
) / H 21 + % % , 9 0' 6 < 7 < <
 &) , % . +0 % ?0 ,

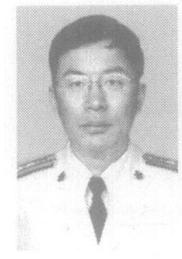
6 7 盖强 二维 \$ 3 \$ 1 变换的分解方法研究67 电
 子与信息学报 待发表

! " A1' % . < + / (, 9 0' . < / ,
 \$ 3 \$ 1 , . / 6 < 7 C1 . ; + + ' !
 . / +0 % 3 (, ' ?0 ,

T ∈ e °



! mY 男 年出生于浙江省义乌市
 年大连理工大学系统工程专业博士毕业
 年上海交通大学自动控制专业博士后流动
 站出站 博士生导师 现任大连舰艇学院航海系
 主任、教授 主要从事信息处理工程和军事航海
 领域的研究 ; / 2 1 %0 + / +



Â < 男 年出生于辽宁 年大
 连理工大学机械电子工程专业博士毕业 现任大
 连舰艇学院自动化系副教授 主要从事非平稳信
 号处理、数字图像处理、现代测控系统与故障诊
 断和作战模拟训练等领域的研究