

基于局域波的非参数瞬时频率估计

胡红英^{1,2}, 马孝江¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁大连 116023; 2 大连民族学院机电系, 辽宁大连 116600)

摘要: 对于频率缓变的单一分量信号叠加噪声的情况, 根据其瞬时频率中真实瞬时频率占主导趋势的特点, 先使用平滑相位差分法——极大似然法估计噪声信号的瞬时频率, 用局域波分解法求极大似然法估计瞬时频率的趋势项, 从而得到与理论瞬时频率相符的结果, 与其他的瞬时频率估计方法相比, 本方法具有精度高、计算量小的优点。

关键词: 极大似然; 瞬时频率; 局域波法

中图分类号: TN911.123; TH165.13 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 07-1303-04

Non Parameter Instantaneous Frequency Estimation Based on Local Wave Method

HU Hong ying^{1,2}, MA Xiao jiang¹

(1. Key Laboratory for Dalian University of Technology Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. Dalian Nationality University, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: When a monocomponent signal with slowly changing instantaneous frequency is buried by noise, its instantaneous frequency is usually added by many high crest and low trough. But real instantaneous frequency is a trend in estimated instantaneous frequency if signal to noise ratio is not very high. Though Maximum likelihood method can smooth some higher crest and lower trough, real instantaneous frequency is still not very obvious. A new nonparameter instantaneous frequency estimation method is established based on a new method: Local wave method. Firstly, smoothed versions of the Phase Difference Estimator——Maximum likelihood method is adopted to estimate the instantaneous frequency. Then more accurate instantaneous frequency can be shifted as a trend by the local wave method. A simulation is used to test this new method. The result shows the method described in the paper is proved to be more accurate and less computation.

Key words: instantaneous frequency; maximum likelihood estimation; local wave method

1 引言

频率随时间变化是非平稳信号最大的特点之一, 即频率是时间的函数, 把任意时间点上的频率称为瞬时频率 IF (instantaneous frequency). 在很多领域中, 如语音识别、地震分析、水下噪声、通信(雷达信号、频率调制信号)等领域, 计算或估计瞬时频率是非常重要的. 在现实生活中, 由于噪声无处不在, 要求人们能从噪声信号中提取信号真实瞬时频率, 使用传统的方法来计算瞬时频率已不能满足要求了. 到目前为止, 已有多种从噪声信号中估计真实瞬时频率的方法^[1]: 相位差分 IF 估计、极大似然 IF 估计[2] (平滑相位差分法)、基于时频分布峰值的 IF 估计、基于线性预测的自适应 IF 估计等. 这些方法都各有其优缺点, 总结起来就是: 简单的方法精度低, 如: 相位差分 IF 估计、平滑相位 IF 估计; 复杂的方法计算量大, 如: 基于时频分布峰值的 IF 估计、基于线性预测的自适应 IF 估计.

实践证明: 当单一分量信号叠加噪声后, 其瞬时频率被噪

声污染, 看起来就像在真实瞬时频率基础上叠加了一些较高的峰和较低的谷. 当信噪比不高时, 真实瞬时频率表现为杂乱信号中的趋势成分. 提取趋势就可以得到信号真实瞬时频率.

文献[3]的经验模式分解方法(EMD)和文献[4]的局域波法(Local Wave)的提出, 不但为计算多分量信号的瞬时频率提供了一种新方法, 同时也为从复杂信号中提取趋势成分提供了一种有效的方法. 本文针对频率缓变的单一分量叠加噪声的信号, 根据局域波法分解时能提取信号的趋势的特点, 提出了从简单的极大似然瞬时频率估计基础上, 用局域波法提取趋势项的方法, 更精确地估计信号真实瞬时频率.

文章中, 第2部分介绍了瞬时频率的简单估计方法及极大似然估计方法; 第3部分介绍了局域波法的原理及特点; 第4部分结合极大似然估计和局域波法, 提出基于局域波的非参数瞬时频率估计方法, 并给出仿真结果.

2 信号的瞬时频率与极大似然估计

一般定义单一分量连续时间实信号 $x(t)$ 的解析表达式

为:

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)] = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (1)$$

其中 $H[x(t)]$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换, 定义为:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau$$

$A(t)$ 为瞬时幅值, $\varphi(t)$ 为瞬时相位.

信号的瞬时频率可表示为瞬时相位的微分:

$$f_{inst}(t) = \left[\frac{1}{2\pi} \right] \frac{\partial}{\partial t} \varphi(t) \quad (2)$$

式(2)就是瞬时频率的定义式.

相应离散形式的实信号 $x(n)$, 其解析表达式为:

$$z(n) = x(n) + jH[x(n)] = A(n)e^{j\varphi(n)}$$

其中 $H[x(n)]$ 为 $x(n)$ 的希尔伯特变换,

其瞬时相位为:

$$\varphi(n) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[z(n)]}{\text{Re}[z(n)]} \right\} \quad (3)$$

瞬时频率可采用相位差分法计算:

$$\tilde{f}_{inst}(n) = \frac{1}{2\pi} [\varphi(n) - \varphi(n-1)] \quad (4)$$

$$\tilde{f}_{inst}(n) = \frac{1}{2\pi} [\varphi(n+1) - \varphi(n)] \quad (5)$$

$$\tilde{f}_{inst}(n) = \frac{1}{4\pi} [\varphi(n+1) - \varphi(n-1)] \quad (6)$$

式(4)为向后有限差分算法(BFD); 式(5)为向前有限差分算法(FFD); 式(6)为中心差分算法(CFD).

由于离散信号的微分由有限差分来代替, 所以式(3)、(4)、(5)、(6)仅是瞬时相位和瞬时频率的一种估计.

当信号被噪声污染时, 用式(4)、(5)、(6)计算的瞬时频率已无法清楚表达真实瞬时频率了, 而现有的去噪方法又无法完全将噪声去掉, 只能对噪声频率进行平滑. 因此 Kay^[5] 使用平滑窗 $h(i)$ 对式(4)进行平滑, 得到平滑相位差分瞬时频率估计:

$$\tilde{f}_{insK}(n) = \sum_{i=0}^{L-1} h(i) \tilde{f}_{inst}(n-i) \quad (7)$$

L 是平滑窗 $h(i)$ 的长度, $n = 1, 2, \dots, M-L+1$, M : 采样点数.

当平滑窗 $h(i)$ 采用式(8)的实对称窗函数时, 由式(7)得到的瞬时频率是噪声瞬时频率的极大似然估计. 因此, 此方法叫做极大似然(ML)估计法.

$$h(i) = \frac{1.5N}{N^2-1} \left\{ 1 - \left[\frac{i - \left(\frac{N}{2} - 1 \right)}{\frac{N}{2}} \right]^2 \right\} \quad (8)$$

其中 $N = L + 1$, $i \in \{0, 1, \dots, L-1\}$

式(7)还可看成用一个 FIR 滤波器对相位差分估计的瞬时频率进行低通滤波的结果. 因此, 应保证信号的瞬时频率是缓变的. 但是, 尽管使用最大似然估计能平滑掉较高的峰和较低谷, 但与理论瞬时频率相比仍然相差很大, 可在此基础上再作进一步处理.

3 局域波法的基本原理

局域波法是用来对复杂的非平稳信号进行分解并求取瞬

时频率的一种新方法^[6]. 其算法首先由 Huang^[3] 等人提出, 后经马孝江教授对其算法进行系统分析并作了较大改进后, 得到现在的局域波法.

局域波法就是把复杂的信号分解成有限个基本模式分量和一个趋势项的和. 基本模式分量——具有瞬时频率意义, 它满足两个条件: ①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; ②在任一时间点上, 信号的局部最大值和局部最小值定义的包络的均值为零. 对于一时间信号 $X(t)$, 其局域波法分解步骤如下^[2]:

(1) 提取信号 $X(t)$ 的极大值点和极小值点 $\max(t)$, $\min(t)$, $t \in [0, T]$;

(2) 用三次样条插值法求取信号的上下包络 $e_{\max}(t)$, $e_{\min}(t)$;

(3) 计算局部均值 $m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t))/2$;

(4) 提取基本模式分量 $h(t) = x(t) - m(t)$;

(5) 对 $m(t)$ 重复以上操作.

在实际操作中, 需要经过几次均值提取才可以得到一个基本模式分量, 即把第一次提取的 h_1 看作待处理数据:

$$h_1 - m_{11} = h_{11}$$

重复(1)、(2)、(3)、(4)步 k 次

$$h_1(k-1) - m_{1k} = h_{1k}$$

直到满足一定的终止标准后, 得到第一个基本模式分量 c_1

$$c_1 = h_{1k}$$

把 c_1 从原始信号中分离出来

$$X(t) - c_1 = r_1$$

把 r_1 当新的待处理数据进行处理, 余下类推

$$r_1 - c_2 = r_2$$

$$r_2 - c_3 = r_3$$

⋮

$$r_{n-1} - c_n = r_n$$

当极值点数(极大值点数与极小值点数之和)不多于两个时, 停止分解, 此时认为 r_n 已不可再分.

$$\text{最后得: } X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n$$

这样, 就把信号 $X(t)$ 分解为 n 个基本模式分量 c_1, c_2, \dots, c_n 和一个趋势项 r_n 的和.

局域波分解实质上是一种窄带滤波, 只是窄带滤波的截止频率是自适应的. Flandrin^[7] 等人曾用此方法对分形高斯噪声进行分解, 发现它可等效成用常 Q 的带通滤波器库对信号进行滤波. 各模式分量的频率随着分解级数的增大而降低, 而趋势项 r_n 则是频率最低的成分. 此现象与小波分解类似, 但小波分解是截止频率固定(0.5 倍的归一化频率)的滤波器库, 而局域波则是根据信号的特点的一种自适应滤波器库.

图 1 是一个局域波分解的例子: (a) 为幅值分别为 3 和 5, 归一化频率为 0.2 和 0.1 的正弦与一个二次曲线线性叠加的信号. 经局域波分解后, 可得到两个基本模式分量和一个趋势项(b)、(c)、(d), 分别对应着原信号中归一化频率为 0.2 和 0.1 的正弦和微小的二次曲线.

可见, 局域波分解不但能精确地分解出信号中的基本模式分量, 还能精确地分解出信号中的趋势项。而现阶段人们的研究重点都放在对局域波分解的基本模式分量的处理上, 却忽略了解析出来的趋势项所包含的信息。因此可用局域波分解的趋势项来提取有用信息, 即用局域波分解的趋势项来提取隐藏在噪声频率中的信号真实瞬时频率。

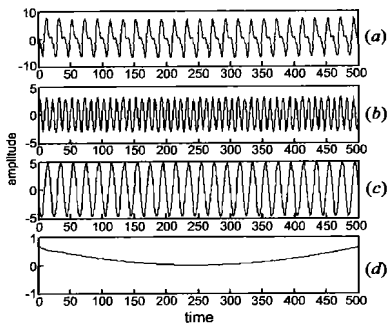


图1 (a) 为归一化频率为 0.2 和 0.1 的正弦(幅值分别为 3 和 5)与一个二次曲线叠加的信号; (b) 局域波模式分量 1, 幅值为 3, 频率为 0.2; (c) 局域波模式分量 2, 幅值为 5, 频率为 0.1; (d) 趋势项——二次曲线。

4 瞬时频率的提取与仿真

4.1 瞬时频率的提取方法

假设某频率连续且变化缓慢的单分量信号被高斯白噪声污染。利用传统的方法先对噪声信号进行降噪处理, 再计算瞬时频率, 效果往往不明显, 可直接估计噪声信号的瞬时频率。由于信号真实瞬时频率连续且变化缓慢, 在噪声能量不太大时, 真实瞬时频率作为趋势存在于噪声信号的瞬时频率中。如果能提取出此趋势项, 就会得到较精确的瞬时频率估计。因此, 使用如下步骤进行瞬时频率估计:

- ①用 CFD 法(式(6))计算噪声信号的瞬时频率。
- ②用式(7)和式(8)对①的结果进行极大似然估计。
- ③对②的结果进行局域波分解, 提取趋势项, 即为瞬时频率估计。

4.2 仿真: 采用雷达回波的多普勒效应进行仿真计算。

某目标信号以 70m/s 的速度作直线运动, 向观测者(雷达)发出中心频率为 60HZ 的高斯白噪声信号, 采样频率为 200HZ, 采样点数为 500 点, 目标距观测者最近的距离为 10m (128 点处)。测得的噪声多普勒信号见图 2。无噪声时多普勒理论瞬时频率见图 3。

采用 CFD 法(式(6))计算噪声多普勒信号的瞬时频率见图 4(a), 可隐约看出瞬时频率的演化趋势。用最大似然 ML 法

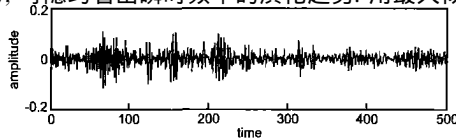


图2 带噪声的多普勒信号

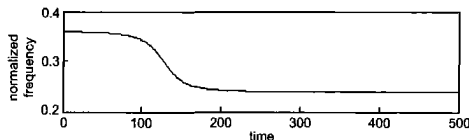


图3 无噪声多普勒信号的瞬时频率

(式(7)、式(8))计算的瞬时频率见图 4(b), 瞬时频率的演化趋势很明显, 但仍与理论瞬时频率相差较大。采用本方法所得的趋势项能清晰地看出瞬时频率的变化, 见图 4(d)(实线), 与理论瞬时频率图 4(d)(点线)相吻合, 只在瞬时频率变化处出现微小误差。

为了突出本方法的优点, 用基于时频分布峰值的瞬时频率估计法——重排 WVD

(Wigner-Ville 分布)峰值法对此噪声多普勒信号的瞬时频率进行估计。

基于 Wigner 分布峰值的瞬时频率估计见文献[8]。基于 Wigner 分布峰值的瞬时角频率:

$$\tilde{\omega}(t) = \arg[\max_{w \in Q_w} WD(t, w)] \quad (9)$$

其中, $WD(t, w)$ 为信号的 Wigner Ville 分布,

$$Q_w = \{w: 0 \leq |w| \leq \pi/(2T)\}$$

$$\text{则瞬时频率为: } \tilde{f}(t) = \frac{\tilde{\omega}(t)}{2\pi}$$

为了消除 Wigner Ville 分布的交叉项, 采用重排技术, 具体见文献[9]。用信号的重排 Wigner Ville 分布替代式(9)中的 $WD(t, w)$ 。计算结果见图 4(c), 此方法明显优于 CFD 法和 ML 法。但不及本文方法精确。

为了突出各方法的精度, 用估计瞬时频率与理论瞬时频率的差的平方(式(10))来评价各方法的优劣:

$$Verr(n) = (\tilde{f}_{inst}(n) - f_{inst}(n))^2 \quad (10)$$

各方法所得的 $Verr$ 见图 5。其中 CFD、ML 和重排 WVD 方法的最大误差平方分别为: 0.3262、0.0153 和 0.0103(图 5a, b, c), 而本方法的最大误差平方只有 6.2306×10^{-4} (图 5d)。

5 结论

由第 4 部分的结论可知, 对于被噪声污染的频率缓变的单一分量信号, 其真实瞬时频率在噪声瞬时频率中占主导地位, 可采用先计算瞬时频率, 再进行局域波分解的方法, 从趋势项中获得较精确的瞬时频率。实践表明,

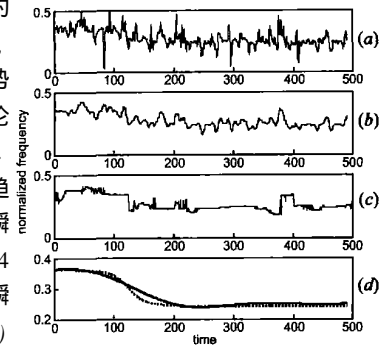


图4 (a) 用 CFD 估计的瞬时频率; (b) 用 ML 法估计的瞬时频率; (c) 用重排 WVD 峰值法估计的瞬时频率; (d) 用本文叙述方法估计的瞬时频率(实线)和理论瞬时频率(点线)的比较图

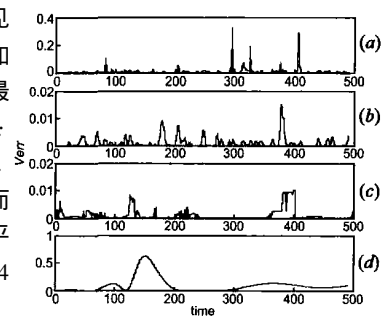


图5 (a) CFD 法的; (b) ML 法的; (c) 重排 WVD 峰值法 $Verr$; (d) 用本文叙述方法的 $Verr$ 。

如果直接用式(6)计算瞬时频率,再进行局域波分解,从趋势项中也能看出瞬时频率的变化,但效果较使用极大似然估计时差。当瞬时频率随时间变化较大,而瞬时频率的最高频率比采样频率小得多时,也可采用此方法求解,此时局域波分解的趋势项和后几个分量叠加后的结果也能较准确地表达真实瞬时频率的变化。

参考文献:

- [1] Boualem Boashash. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of signal part 2: Algorithms and applications[J]. Proceeding of the IEEE, 1992, 80(4): 540- 568.
- [2] F De Bastos, M de Campos. A new method for estimating the instantaneous frequency based on maximum likelihood[A]. 2000 IEEE Inter Conf on ICASSP Proceedings[C], Istanbul, Turkey: IEEE, 2000: II677 - II680.
- [3] N E Huang, Z Shen, S R Long, M L Wu. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proc Roy Soc Lond A, 1998, 454: 903-995.
- [4] 马孝江, 余伯, 张志新. 一种新的时频分析方法——局域波法[J]. 振动工程学报, 2000, 13(5): 219- 224.
- [5] S Kay. Statistically/computationally efficient frequency estimation[A]. IEEE International Conference of Acoustic, Speech, and Signal Processing[C], New York, USA: IEEE, 1988. 2292- 2295.
- [6] 张海勇. 瞬时频率的一种估计方法[J]. 系统工程与电子技术,

2002, 24(9): 5- 6.

- [7] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. Signal Processing Lett., IEEE, 2004, 11(2): 112- 114.
- [8] P Rao, F J Taylor. Estimation of the instantaneous frequency using the discrete Wigner distribution[J]. Electron Lett., 1990, 26(9): 246- 248.
- [9] E CHASSANDE, F AUGER, P FLANDRIN. Time frequency reassignment: from principles to algorithms[A]. Applications in Time Frequency Signal Processing[C]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. 179- 203.

作者简介:



胡红英 女, 1973 年 10 月生于山东省武城县, 大连理工大学机械系在职博士, 大连民族学院机电系讲师, 从事非平稳信号处理及设备故障诊断等方面的研究. E-mail: yinghu@dlnu.edu.cn.

马孝江 男, 1945 年 12 月生于辽宁省大连市, 教授, 博士生导师, 大连理工大学机械系振动工程研究所所长, 从事设备监测和故障诊断方面的研究.