

基于 Wigner-Ville 分布的复杂时变信号的时频分析

王忠仁^{1,2}, 林 君^{1,2}, 李文伟³

(1. 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林长春 130061;

2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林长春 130061; 3. 中国兵器工业系统总体部, 北京 100089)

摘 要: 对多分量线性调频(LFM)信号、单分量非线性调频(NLFM)信号以及多分量 NLFM 信号的 Wigner-Ville 分布进行了数值计算,探讨了信号项与交叉项之间的差异性特征,提出了信号时频曲线中点集的概念,研究了交叉项出现的一般规律.对于多分量信号,交叉项出现在信号项时频曲线之间的中点集之内.对于单分量 NLFM 信号,也有交叉项产生,交叉项出现在信号项时频曲线自身的自中点集之内.

关键词: Wigner-Ville 分布; 时变信号; 时间-频率分析; 交叉项; 时频曲线中点集

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2239-03

Time-Frequency Analysis for Complex Time-Varying Signals Based on Wigner-Ville Distribution

WANG Zhong-ren^{1,2}, LIN Jun^{1,2}, LI Wen-wei³

(1. Key Laboratory of Geor Exploration and Instrumentation (Jilin University), Ministry of Education, Changchun, Jilin 130061, China;

2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China;

3. Collectivity Department of Chinese Weapon Industry System, Beijing 100089, China)

Abstract: Wigner-Ville distributions are implemented for a multicomponent linear frequency modulation (LFM) signal, a single component nonlinear frequency modulation (NLFM) signal, and a multicomponent NLFM signal. Different characteristics between signal items and crossed items are discussed. A concept of midpoint set of time-frequency curves is presented. A general law for crossed item appearing is studied. In time-frequency plane, the images of signal items are smooth continuous curves, but the images of crossed items are pinto interference patterns. For a multicomponent signal, crossed items appear in midpoint set of the signal time-frequency curves. A single component NLFM signal can also produce crossed item, and it appears in self-midpoint set of the signal time-frequency curve itself.

Key words: Wigner-Ville distribution; time-varying signals; time-frequency analysis; crossed items; midpoint set of time-frequency curves

1 引言

Wigner-Ville 分布由于具有较好的时频聚集性使其在信号处理应用领域受到了人们的广泛关注^[1,2],但是交叉项的出现给人们正确识别信号项的时频分布带来了很大的障碍.因此,消除 Wigner-Ville 分布中的交叉项就成了人们的一个研究热点.文献[3]通过将多分量线性调频(LFM)信号分解成多个单分量 LFM 信号的办法来消除交叉项的影响,文献[4]通过对 Wigner 分布进行 Hough 变换实现对多分量 LFM 信号进行聚焦来达到抑制交叉项的目的.但是对于非线性调频(NLFM)时变信号,那种针对多分量 LFM 信号消除交叉项的方法的实效就会大大降低.如果我们对交叉项能够进行正确地识别,那么直接在时频平面上也可以达到正确了解信号局部特征这样

一个目的.进一步,交叉项的正确识别还可以为实现时变滤波创造有利条件.本文通过对多分量 LFM 信号、多分量 NLFM 信号和一个可控震源发出的单分量 NLFM 地震信号的时频分布的数值计算和分析对比,探讨了信号项与交叉项在 Wigner-Ville 时频分布平面上的不同的表现形式,对 Wigner-Ville 分布交叉项出现的一般规律进行了深入地研究,为人们正确区分信号项与交叉项提供了理论上的保证.

2 复杂时变信号的 Wigner-Ville 时频分布与交叉项分析

2.1 Wigner-Ville 分布的定义

设实信号 $s(t)$ 的解析信号为 $z(t)$, 则 $s(t)$ 的 Wigner-Ville 分布为

$$W_z(t, f) = z \left[t + \frac{1}{2} \right] z^* \left[t - \frac{1}{2} \right] e^{-j2\pi f t}$$

2.2 多分量 LFM 信号的 Wigner-Ville 时频分布与交叉项分析
考虑如下的多分量 LFM 信号 $s(t)$

$$s(t) = \begin{cases} \sin/2 (1000t + 300)t], & 0 \leq t \leq 0.06 \\ \sin/2 (800t + 30)t], & 0.06 < t \leq 0.12 \\ \sin(2 \cdot 60t + \sin(2 \cdot 360t)), & 0.12 < t \leq 0.181 \end{cases}$$

它在 0 秒至 0.06 秒之间瞬时频率变化规律为 $H(t) = 2000t + 300$, 在 0.06 秒至 0.12 秒之间的瞬时频率变化规律为 $H(t) = 1600t + 30$, 在 0.12 秒至 0.18 秒之间的任意时刻都有 60Hz 和 360Hz 两个频率成分。

多分量 LFM 信号 $s(t)$ 的 Wigner-Ville 分布如图 1(a) 所示, 图中 A、B、C、D 四组近似线状的光滑线条反映出了信号项的时频分布规律, 虽然频率分辨率略显模糊, 但时间分辨率还是比较精确的, 在 0.06 秒和 0.12 秒两个时刻所发生的频率突变清晰可见。我们把时频域中信号项冲激线谱的支集称为信号项时频曲线, 简称为时频曲线。在时频平面中的信号项之间还有交叉项出现, 但交叉项与信号项有不同的表现形式, 交叉项的图象表现为明暗相间变化的斑状条纹, 而信号项的图象则呈现出光滑连续变化的特点。此外, 我们发现交叉项在时频平面中的展布范围也呈现出一定的规律性, 为论述方便, 我们首先给出如下的定义。

定义 1 设 L_1, L_2 是两条连续的平面曲线, 称 L_1 上任一点与 L_2 上任一点的中点所构成的集合为曲线 L_1 与 L_2 的中点集。

在图 1(b) 中用线段 B_1B_2 代表图 1(a) 中的信号项 B, 用线段 C_1C_2 代表图 1(a) 中的信号项 C, B_1 点与线段 C_1C_2 上每一点的中点构成的集合为线段 MN , B_2 点与线段 C_1C_2 上每一点的中点构成的集合为线段 QP , C_1, C_2 点与线段 B_1B_2 上每一点的中点构成的集合分别为线段 MQ 和 NP 。线段 C_1C_2 上的任一点与线段 B_1B_2 上的任一点的中点必然落在平行四边形 $MNPQ$ 内, 因此平行四边形 $MNPQ$ 及其内部的所有点构成的集合为线段 B_1B_2 与线段 C_1C_2 的中点集。

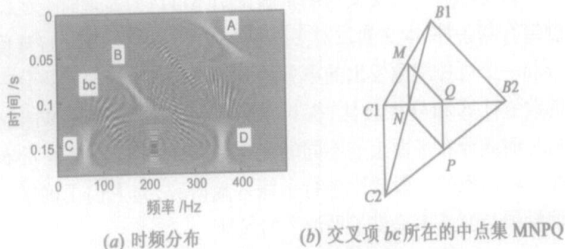


图 1 多分量 LFM 信号的时频分布与交叉项

从图 1(a) 中我们不难发现, 信号项 B 与信号项 C 之间的交叉项 bc 的主要能量展布在二者的中点集内。

2.3 单分量 NLFM 地震信号的 Wigner-Ville 时频分布与交叉项分析

定义 2 设 L 是一条连续的平面曲线, 称 L 上任意两点的中点所构成的集合为曲线 L 的自中点集。

我们利用 Wigner-Ville 分布对一个可控震源激发的地震信号进行了时-频分布的数值计算, 图 2(a) 是时-频分布的

算结果。由图 2(a) 可见, 可控震源激发的信号是频率大约从 50Hz 到 300Hz 的 NLFM 单分量信号, 信号项时频曲线呈现出抛物线的变化规律。从图中还可看出, NLFM 单分量信号的时频分布中也有交叉干扰项产生。我们能够验证, 这种情形的交叉项位于抛物线状时频曲线的自中点集之内。

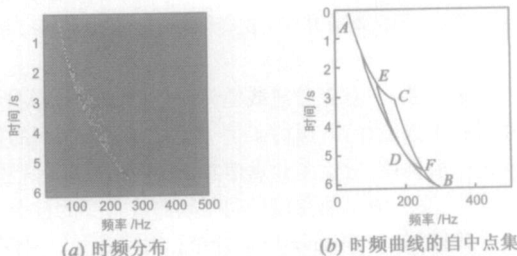


图 2 单分量 NLFM 信号的时频分布与交叉项

在图 2(b) 中用一段抛物线 ADB 表示图 2(a) 中信号项的时频分布曲线, 设端点 A 的坐标为 (x_A, y_A) , 抛物线 ADB 的方程为 $y = ax^2 + bx + c$, A 点与抛物线 ADB 上各点的中点的集合为抛物线 AEC , 其方程为

$$y = 2ax^2 + (b - 2ax_A)x + (c + ax_A^2)$$

同理 B 点与抛物线 ADB 上各点的中点的集合为抛物线 BFC 。由三条抛物线 ADB, AEC, BFC 所围成的区域构成了抛物线 ADB 的自中点集。抛物线 ADB 上一点 D 与该抛物线上所有点的中点构成的抛物线 EDF 必然位于上述的自中点集之内。比较图 2(a) 和图 2(b) 就可知道, NLFM 单分量信号的交叉项出现在其时频分布曲线自身的自中点集之内。

2.4 多分量 NLFM 信号的 Wigner-Ville 时频分布与交叉项分析

图 3(a) 是两个 NLFM 信号组合成的多分量信号的 Wigner-Ville 分布图, 图 3(b) 中的阴影区域是两个信号项时频曲线的中点集, 它与图 3(a) 中交叉项的展布范围是一致的。

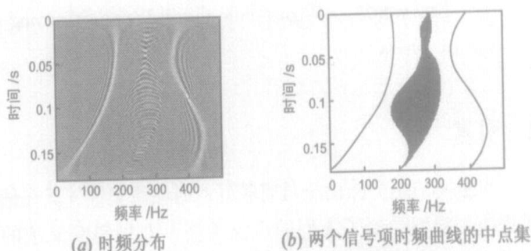


图 3 多分量 NLFM 信号的时频分布与交叉项

此外, 从图 1(a) 和图 3(a) 可以看出, 对于多分量信号 (不管是 LFM 信号还是 NLFM 信号), 在信号项时频曲线的时间起止位置, 信号项时频曲线以及交叉项时频分布在横向上都变得有些模糊和扩展, 导致对应时刻附近的频率分辨率有所降低, 这是 Wigner-Ville 分布数值离散后所特有的频散效应。

3 结论

(1) 多分量时变信号或单分量 NLFM 时变信号的 Wigner-Ville 分布都会产生交叉项, 但信号项与交叉项在时频图象中是可以加以区别的, 交叉项的分布表现为明暗相间变化的斑

状条纹,而信号项的图象则呈现出光滑连续变化的特点.

(2)交叉项出现的位置具有明确的规律性.在忽略频散效应的前提下,多分量时变信号的交叉项总是出现在两个信号项的时频分布曲线的中点集之内,单分量 LFM 时变信号的交叉项会出现在其时频分布曲线自身的自中点集之内.

参考文献:

- [1] Georgakis A ,Stergioulas L K,Gakas G. Wigner filtering with smooth roll-off boundary for differentiation of noisy non-stationary signals[J]. Signal Processing,2002,82(10):1411 - 1415.
- [2] 牟永阁,彭承琳,郑小林. 基于互 Wigner-Ville 分布的表面肌电信号瞬时频率估计[J]. 重庆大学学报,2004,27(9):96 - 98.
- [3] 邹虹,保铮. 基于频域“CLEAN”Wigner-Ville 分布中交叉项的抑制[J]. 电子与信息学报,2002,24(1):1 - 5.
- [4] 孙晓昶,皇甫堪. 基于 Wigner-Hough 变换的多分量 LFM 信号检测及离散计算方法[J]. 电子学报,2003,31(2):241 - 244.

SUN Xiao-chang, HUANGFU Kan. Discrete algorithm for Wigner-Hough transform based multicomponent LFM signal detection[J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(2):241 - 244. (in Chinese)

作者简介:



王忠仁 男,1954年12月生于吉林农安,吉林大学教授,博士,主要从事地球物理正反演问题的数值计算与信号处理方法研究.
E-mail:wzr@jlu.edu.cn.



林君 男,1954年8月生于吉林通化,吉林大学教授,博士生导师,地球信息探测仪器教育部重点实验室主任,主要从事地球物理勘探仪器与信号处理研究. E-mail:lin.jun@jlu.edu.cn.

www.cnki.net