

一种新的多线性调频信号时频表示

李英祥, 肖先赐

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘 要: 本文提出了一种用于多线性调频信号时频表示的方法. 首先由 Radon-Ambiguity 变换设计出线状核函数, 以去除噪声和多线性调频信号之间的交叉项在模糊域中的影响, 再通过二维傅立叶变换得到一种新的时频表示. 仿真实验证明了此方法可以有效的去除噪声和多信号之间交叉项的影响, 在低信噪比下也十分有效.

关键词: 线性调频信号; Radon-Ambiguity 变换; 核函数; 模糊函数

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1879-03

A New Kind of Time-Frequency Representation for Multi-LFM Signals

LI Ying-xiang, XIAO Xian-ci

(College of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: A method for multi-LFM signals time-frequency representation is proposed. Firstly, we use the Radon-Ambiguity transform to get the linear kernel function, which can remove the cross terms of multi-LFM signals and some part of noise in the ambiguity domain. Then we use the two-dimensional Fourier transform to get the new time frequency representation. The validity of removing noise and cross terms of this method has been shown by computer simulation even in low signal to noise ratio condition.

Key words: LFM; Radon-ambiguity transform; kernel function; ambiguity function

1 引言

线性调频信号是自然界中普遍存在的一种信号形式, 如蝙蝠用于回声定位的信号, 地球物理学中的天电干扰信号, 天体物理中的万有引力波, 声学色散介质中传播的脉冲波等. 在雷达、声纳、通信等领域中, 线性调频信号也有着广泛的应用. 并且在物理学、医学等领域中, 有许多信号也可以近似看作线性调频信号.

线性调频信号的瞬时频率随时间而变化, 是一种典型的非平稳信号. 对这类信号, 采用时频表示 TFR (Time-Frequency Representation) 的方法能够实现对信号进行直观的分析 and 描述. 对于单线性调频信号, Wigner-Ville 分布 (WVD) 能够获得很高的时间、频率分辨率. 但对于多线性调频信号, WVD 由于存在交叉项, 严重的影响了对信号的分析 and 解释.

本文针对线性调频信号的特点提出了一种新的 TFR, 此方法可以很好的去除多线性调频信号之间的交叉项, 对噪声也可以很好的滤出.

2 Wigner-Ville 时频分布与 Cohen 类时频分布^[1]

2.1 Wigner-Ville 分布

对于复信号 $x(t)$, 其 Wigner-Ville 分布 (简记为 WVD) 定义为:

$$WVD(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

可以看出, 信号 $x(t)$ 的 Wigner-Ville 分布是瞬时相关函数 $r(t, \tau) = x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)$ 的 Fourier 变换. 对于线性调频信号 $x(t) = e^{j(\omega_0 t + \frac{1}{2} m_0 t^2)}$, 其 Wigner-Ville 分布为:

$$\begin{aligned} WVD(t, \omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= 2\pi\delta[\omega - (\omega_0 + m_0 t)] \end{aligned} \quad (2)$$

即具有线性调频信号的 WVD 分布为沿瞬时频率变化的冲击谱线. 因此, Wigner-Ville 分布对于线性调频信号具有理想的时频聚集性. 而 Wigner-Ville 分布是二次型变换, 故对于多线性调频信号不可避免地存在交叉项的干扰.

2.2 Cohen 类时频分布

除了 Wigner 分布外, 近几十年来人们还提出了很多其它具有双线性形式的时-频分布. 1966 年, L. Cohen 给出了信号的时-频分布的更一般表示形式 (Cohen 类时频分布), 即

$$C_{\phi}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(u + \tau/2) x^*(u - \tau/2) \phi(\tau, v) e^{-j(v + \omega\tau - \omega u)} du d\tau dv \quad (3)$$

$\phi(\tau, v)$ 称为时-频分布的核函数. 给出不同的 $\phi(\tau, v)$, 就可以得到不同类型的时-频分布. 例如取核为 1 和取 $e^{-v^2 \tau^2 / \sigma}$ (σ 为参数) 分别得到 WVD 和 Choi-Williams (CWD) 分布. 不同的时频分布对某种类型的信号非常有效, 而对其他类型的信号而言, 效果可能较差. 因此, 不存在一种对所有信号都十分有效

收稿日期: 2001-09-21; 修回日期: 2002-07-05

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划项目 (No. 973-1-2-1)

的时频表示. 必须根据具体的信号的特点选择合适的时-频表示.

Cohen 类时频分布又可以表示为核函数与信号的模糊函数的乘积的二维傅立叶变换, 即:

$$C_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} AF(\tau, v) \phi(\tau, v) e^{-j(\omega t + \omega \tau)} d\tau dv \quad (4)$$

其中 $AF(\tau, v)$ 为信号 $x(t)$ 的模糊函数 (Ambiguity Function), 定义为:

$$AF(\tau, v) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{jv\tau} dt \quad (5)$$

对于线性调频信号 $x(t) = e^{j(\omega_0 t + \frac{1}{2} m_0 t^2)}$, 其模糊函数为: $AF(\tau, v) = 2\pi\delta(v + m_0\tau) e^{j\omega_0\tau}$, 其模为 $|AF(\tau, v)| = 2\pi\delta(v + m_0\tau)$. 即线性调频信号的模糊函数为过原点的冲击直线. 对于多线性调频信号, 模糊函数的自项通过模糊平面原点, 互项远离模糊平面的原点, 而 AF 中的互项又对应了时-频分布中的交叉项, 这就为去除或抑制时-频分布中的交叉项提供了一个有效的途径, 如文献^[2,3].

3 基于 Radon-Ambiguity 域 的核设计

由于线性调频信号的模糊函数为过原点的直线, 而 Radon 变换具有沿直线积分累加的作用, 故可以把两者结合起来, 即得到 Radon-Ambiguity 变换.

3.1 Radon-Ambiguity 变换^[4]

如图 1 所示, 对模糊函数 $|AF_x(\tau, v)|$ 在模糊平面 (τ, v) 上沿 α 角方向进行积分, 得到的结果即为 Radon-Ambiguity 变换 (RAT), 即

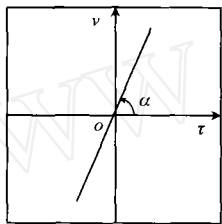


图 1 RAT 的几何关系

$$RAT_x(\alpha) = \text{Radon}(|AF_x(\tau, v)|) = \int_{-\infty}^{\infty} |AF_x(\tau, v)| \delta(v - m\tau) d\tau dv \Big|_{m = \tan\alpha} = \int_{-\infty}^{\infty} |AF_x(\tau, m\tau)| d\tau \Big|_{m = \tan\alpha} \quad (6)$$

对于线性调频信号 $x(t) = e^{j(\omega_0 t + \frac{1}{2} m_0 t^2)}$, 其模糊函数为过原点的斜率为 $-m_0$ 的冲击直线, 故当 $m = -m_0$ 时, 信号的 RAT 具有极大值. 对于具有不同调频斜率的多个线性调频信号, 其 RAT 变换分别在各自的调频斜率处呈现极大值. 而多信号分量之间的互项在模糊平面上远离原点, 通过 Radon 积分, 其累加效果并不显著, 从而为有效的抑制模糊平面上的互项提供了条件.

3.2 核函数设计

根据线性调频信号在模糊域的特点——沿调频斜率的冲击线, 能够将信号特征保留的模糊域滤波器应该是沿调频斜率方向上的线状滤波器. 对于含有 M 个调频斜率 m_1, m_2, \dots, m_n 且满足 $m_i \neq m_j, \forall i \neq j, i, j = 1, \dots, M$ 的多 LFM 信号, 模糊域最佳滤波器为:

$$\phi(\tau, v) = \begin{cases} 1, & \text{for } v = m_i\tau, i = 1, \dots, M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

在多信号的调频斜率未知的情况下, 可以由 Radon-Ambiguity

变换得到. 其方法为:

(1) 线状滤波器的方向: 通过 Radon-Ambiguity 变换检测出信号的多个峰值, 峰值的个数表示了不同调频斜率的个数. 通过限幅滤出交叉项, 通过 Radon^{-1} (Radon 逆变换) 可得到不同信号在模糊平面的方向.

(2) 幅度修正: 对模糊平面上各个保留的方向上, 其值令为 1——以保证在该方向上不对信号的模糊函数进行修改. 对其余方向令为 0——滤出交叉项和部分噪声的影响.

显然, 这种核函数充分利用了线性调频信号在模糊域中的特点, 而且, 将允许在调频斜率方向的模糊函数值得以保留, 因此, 是一种信号相关核函数.

4 基于信号相关的模糊域滤波的时频表示

将 Cohen 类时频分布的核函数用以上设计的信号相关核函数代替, 则可以得到一种新的时频表示, 称之为信号相关的模糊域滤波的时频表示. 其计算框图如图 2 所示.

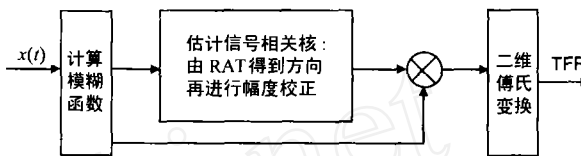


图 2 基于信号相关的模糊域滤波的时频分布计算框图

此时频表示的算法步骤如下:

- step1 设定 RAT 滤波的门限 λ_1 和核函数幅度校正的门限 λ_2 ;
- step2 计算输入信号的模糊函数 $AF(\tau, v)$;
- step3 计算信号相关的核函数 $\phi(\tau, v)$;
- step3.1 计算 Radon-Ambiguity 变换得到 $RAT(\alpha)$;
- step3.2 RAT 域滤波:

$$RAT'(\alpha) = \begin{cases} RAT(\alpha), & \text{if } RAT(\alpha) > \lambda_1 \max[RAT(\alpha)]; \\ 0, & \text{if } RAT(\alpha) \leq \lambda_1 \max[RAT(\alpha)]; \end{cases} \quad (8)$$

- step3.3 计算逆 Radon 变换, 得到核函数: $\phi'(\tau, v) = \text{Radon}^{-1}[RAT'(\alpha)]$;
- step3.4 对核函数 $\phi'(\tau, v)$ 进行幅度校正, 得到新的核函数 $\phi(\tau, v)$:

$$\phi(\tau, v) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\phi'(\tau, v)| \geq \lambda_2 \max[|\phi'(\tau, v)|] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

- step4 计算 $TFR(t, \omega)$:

$$TFR(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} AF(\tau, v) \phi(\tau, v) e^{j(\omega t + \omega \tau)} d\tau dv \quad (10)$$

门限 λ_1 和 λ_2 的选择: 门限 λ_1 用于 Radon-Ambiguity 域限幅滤波, 在此应满足 $0 < \lambda_1 < 1$. 对于白噪声中具有不同调频斜率而幅度相近的 M 个线性调频信号, 其 Radon-Ambiguity 变换将呈现 M 个幅度相近的峰值. 门限 λ_1 选的太大, 则可能滤掉个别线性调频信号, 选的太小, 则在 Radon-Ambiguity 域中滤波效果不明显. 门限 λ_2 用于核函数幅度的修正, 在此应满足 $0 < \lambda_2 < 1$. 如果门限 λ_2 选的太大, 则核函数在模糊平面上具有很窄的线状支撑区, 但同时可能在模糊平面上滤掉个别线性调频信号. 而选的太小, 则核函数在模糊平面上呈现出通过模糊原

点的宽开放射状支撑区,从而导致在模糊域中滤波效果不显著.仿真表明 λ_1, λ_2 在 0.5~0.8 之间取值,可以具有较好的稳健性和滤波特性.

5 仿真实验

仿真对象为两个淹没在高斯复圆白噪声中的复线性调频信号,一个信号的起始频率为 0.1,中止频率为 0.3,另一信号的一个信号的起始频率为 0.3,中止频率为 0.1,信噪比为 -10dB,采样频率为 1,采样长度为 512 点.用 Wigner-Ville 时频分布方法和本文提出的信号相关模糊域滤波时频表示方法对上述数据分别作信号的时频分析处理,结果分别如图 3、4 所示.

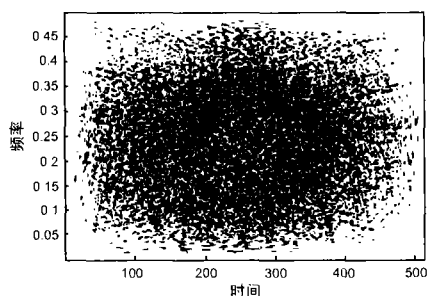


图 3 Wigner-Ville 时频分布

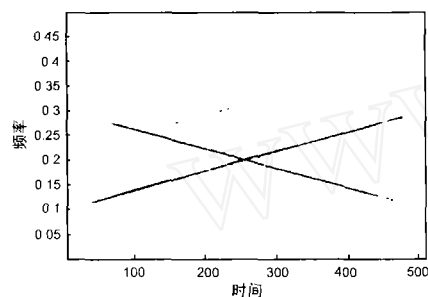


图 4 信号相关的模糊域滤波的时频表示

从图 3 和 4 比较可以看出:本文提出的方法可以滤出时频面上的绝大多数噪声,并且对弱信号也能够进行很好的检测与提取.另外,本文的时频表示方法也可以很好的滤出两线性调频信号之间的交叉项干扰,而对单个信号的时频聚集性几乎无影响.

6 结论

基于模糊域中的信号相关线状核函数充分利用了线性调频信号在模糊域沿调频斜率分布的特点,对信号的自项可以很好地保留,而对于信号之间的交叉项以及绝大部分噪声可以很好地滤出.因此,此方法能够给出多线性调频信号优异的时频表示.

参考文献:

- [1] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [2] Jeong J, Williams W J. Kernel design for reduced interference distribution[J]. IEEE Trans, SP, 1992, 40(2), 402-412.
- [3] 刘永红,王宏禹,自适应径向巴特沃思核时频表示[J].通信学报,1998,19(7),13-17.
- [4] Minsheug Wang, Andrew K Chan, Charles K Chui. Linear frequency-modulated signal detection using radon-ambiguity transform[J]. IEEE Trans, SP, 1998, 46(3), 571-586.

作者简介:

李英祥 男,1972年11月生于重庆万州,电子科技大学电子工程学院通信与信息专业博士研究生.主要从事信号设计、非平稳信号分析与处理、弱信号检测与参数估计及其在电子对抗、通信、雷达中的应用研究.

肖先赐 男,1933年9月生于湖南长沙,电子科技大学电子工程系教授,博士生导师.主要从事信号处理及其在电子对抗、通信、雷达中的教学和研究工作.