

估计跳频信号参数的多窗口迭代平滑伪 WVD 新算法

卢虎^{1,2}, 史浩山¹, 谢岩²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

摘要:采用时-频分析方法获取跳频信号的瞬时频率、跳周期、跳频图案等主要参数,在短时傅立叶变换、Wigner-Ville 分布等传统时-频分析算法均无法达到抑制噪声和实时参数检测的情况下,提出一种能适应跳频信号速率变化的多窗口迭代平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD) 算法来进行跳频信号参数的实时估计。仿真结果表明,该算法在较低信噪比(-8 dB)的情况下也具有良好的实时估计效果。

关键词:平滑伪 WVD; 瞬时频率; 跳频图案

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0052-04

从接收到的众多杂乱信号中有效的剔除噪声信号,检测出跳频信号的频率跳变规律,是对跳频信号实施跟踪式干扰的重要前提,成为现代电子对抗的研究重点之一。跳频信号是一种典型的非平稳信号,一般必须借助于时-频分析手段才能有效地获取这些参数。随着对软件无线电研究的不断深入,完全采用软件算法来进行跳频通信系统的参数估计和反向设计已成为可能。

1 跳频信号的时-频特性

跳频通信系统参数的时频估计算法中,短时傅里叶变换(STFT)和 Cohen 类时频分析形式的应用最为广泛。这是因为:短时傅里叶变换采用了信号的线性变换方法,在分析包含有多个分量的信号时,能够抑制交叉项的产生,同时也具有较小的计算量;而 Cohen 类的时频分布的优势是通过双线性变换获得了较高的时频聚集性,有利于对信号的分析,并且可以根据不同的信号类型选择计算核函数。

但是,STFT 的高时间分辨率要求窗函数尽可能短,而频率的高分辨率则要求一个窄带分析窗,根据不确定性原理,具有同时任意小的时间和频率间隔的窗是不存在的,因此,采用 STFT 分析跳频信号,窗宽与跳频时间密切相关,越是接近实际跳频时间,跳频信号短时傅立叶变换后的时-频分布效果越好;此外窗函数不同分析效果也不尽相同。为了满足跳频信号时频分析的适应性有必要考虑信号其他形式的时频分析方法。

1.1 跳频信号的 Wigner-Ville 分布(WVD)

Wigner-Ville 分布^[1](WVD)是 Cohen 类时频分布的一种,WVD 具有良好的时频聚集性,对每个时刻,其能量主要集中在瞬时频率处,对于每个时刻 t ,求信号的 WVD 变换的最大幅值所处的频率值 f ,该频率值 f 即为信号在时刻 t 的瞬时频率。信号的 WVD 定义为

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

显然该式包含了二次型的信号表示,对复合信号

收稿日期:2007-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60273009);教育部博士点基金资助项目(20050699037)

作者简介:卢虎(1975-),男,陕西西安人,博士生,主要从事扩频通信、卫星导航定位研究;

E-mail: sdkmsdn@sina.com

史浩山(1946-),男,河南开封人,教授,博士生导师,主要从事机器学习、复杂系统建模和优化控制研究。

$$f(t) = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t) \tag{2}$$

将式(2)带入式(1)可得

$$P_{WVD}(t, \omega) = |c_1|^2 P_{WVD11}(t, \omega) + |c_2|^2 P_{WVD22}(t, \omega) + c_1 c_2 P_{WVD12}(t, \omega) + c_2 c_1 P_{WVD21}(t, \omega) \tag{3}$$

式(3)等号右边的1、2项仅与各分量信号有关;而3、4项与两个分量信号都有关系。通常,我们称1、2项为自项(auto-term),3、4项为交叉项(cross-term)。显然交叉项是由于二次时-频分布的双线性引起的,属于干扰项。跳频信号的WVD分析如图1所示。

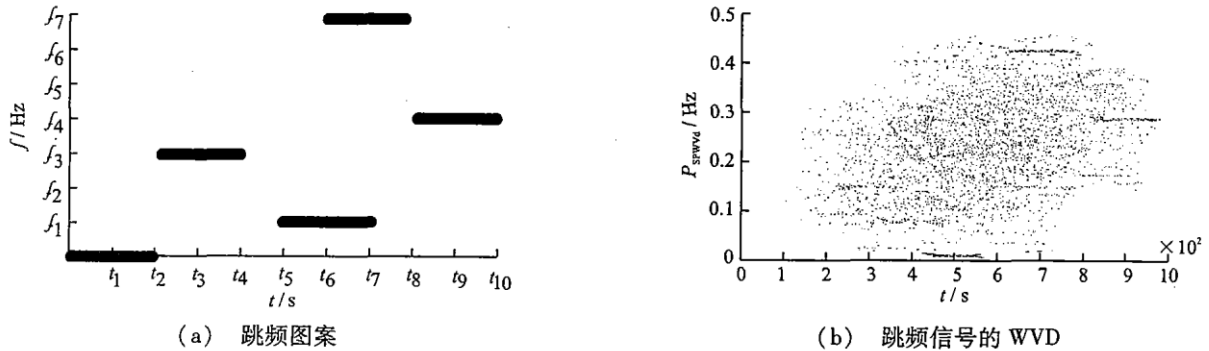


图1 跳频信号(SNR = -8 dB)的WVD仿真结果

Fig. 1 The WVD simulation result of hoping signal (SNR = -8 dB)

由图1可知,WVD给出了信号瞬时频率和群延时的精确值,但是WVD本身并不能分辨交叉项,因为把信号分成若干部分的方法并不是唯一的,因而采用WVD进行跳频信号的瞬时频率估计时,不得不面对交叉干扰的影响,并严重影响频率估计结果。

1.2 跳频信号的平滑伪 Wigner - Ville 分布 (SPWVD)

WVD变换是非因果的处理过程,为克服该不足,可对变量 τ 加窗函数 $h(\tau)$,这样也可达到减少交叉项的目的^[2]。这种加窗处理后的WVD分布通常称为伪Wigner-Vile分布(PWVD),定义为

$$P_{PWVD}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) z(t - \frac{1}{2}\tau) z^*(t - \frac{1}{2}\tau) e^{j2\pi f\tau} d\tau \tag{4}$$

式中, $h(\tau)$ 是一实值低通窗函数。 $h(\tau)$ 通常具有以下性质:① $\int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) d\tau = 1$;② $h(t) = h(-t)$;③ $h(t) = 0$;④ $h(t)$ 的傅里叶变换 $H(\omega)$ 是可微分的,并且具有低通特性,即对大的频率 ω ,滤波器的幅值响应远小于1,或 $|H(\omega)| \ll 1$ 。PWVD变换通过在时域加入窗函数,消除了时域方向的交叉项干扰。

为了消除频率方向的交叉项,可采用窗函数 $g(t)$ 、 $h(\tau)$ 对变量 t 和 τ 同时加以平滑,由此得到的WVD变换称为平滑的伪Wigner-Vile变换(SPWVD),其定义为

$$P_{SPWVD}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(u) h(\tau) z(t - u + \frac{1}{2}\tau) z^*(t - u - \frac{1}{2}\tau) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \tag{5}$$

式中: $g(t)$ 和 $h(\tau)$ 为两个实的偶窗函数,且 $h(0) = g(0) = 1$ 。

SPWVD的实质是在时域、频域分别对信号加窗,起到平滑滤波的作用。信号SPWVD的时-频特性与WVD相比极大程度消除了交叉干扰,即使在低信噪比的情况下,时频分辨率以及时频能量正值也远远优于WVD。虽然,平滑的同时也破坏了WVD的许多特性,如边缘分布和瞬时频率特性不再成立^[3]。但是在进行跳频信号瞬时频率分析时,抑制干扰项的作用远比时频能量正值和能量集中性来的重要些。因此,我们选择SPWVD作为跳频信号的瞬时频率的估计方法,并采用迭代SPWVD算法来提高信号的频率分辨率^[4-5]。跳频信号的SPWVD分析如图2(c)所示。

2 跳频信号的多窗口迭代参数估计

实际跳频系统的跳速率可能在一个相当大的范围内变化,从每秒几百跳到每秒几万跳,假设跳频带宽0-100 MHz,根据Nyquist采样准则,采样速率至少应为 2×10^8 点/s,假定跳速率为400跳/s,则一跳的时间内就要采集 5×10^5 个点,当然是跳速率很高如 10^4 跳/s,则每跳只需采集 2×10^4 个点。显然无论跳频速

率高低,对于这么多的采样点,只能分段(多窗口截取)求取信号的 SPWVD。

2.1 跳频信号瞬时频率的 SPWVD 迭代估算法

如图 2 所示,对每个时间 t , SPWVD 峰值所对应的频率即为信号的瞬时频率估计值^[6-8]。但是如果信噪比较低,使用一次 SPWVD 峰值检测后可能仍然存在较大的噪声,这时可以重复执行峰值检测来滤除噪声。当连续两次重复之后所得到的估计值之间的差别小于给定极小值时,即可中止检测,此时得到的估计值即为待测信号的估计值。其详细步骤可归纳为:①求待测信号 $f(t)$ 的解析形式 $z_f(t)$, 并求出 $z_f(t)$ 的 $P_{SPWVD}(t, \omega)$; ②估计 $P_{SPWVD}(t, \omega)$ 在每个时刻 t 的峰值, 峰值所在的频率值即为解析信号的瞬时频率估计值: $\hat{f}_z(t) = \arg\{\max[P_{SPWVD}(t, \omega)]\}$, 由 $\hat{f}_z(t)$ 即可得到估计信号 $\hat{x}(t)$; ③如果连续两次进行峰值检测所得到的估计信号之间的差异大于一个指定极小值, 则重复步骤①, ②; 否则, 检测结束。

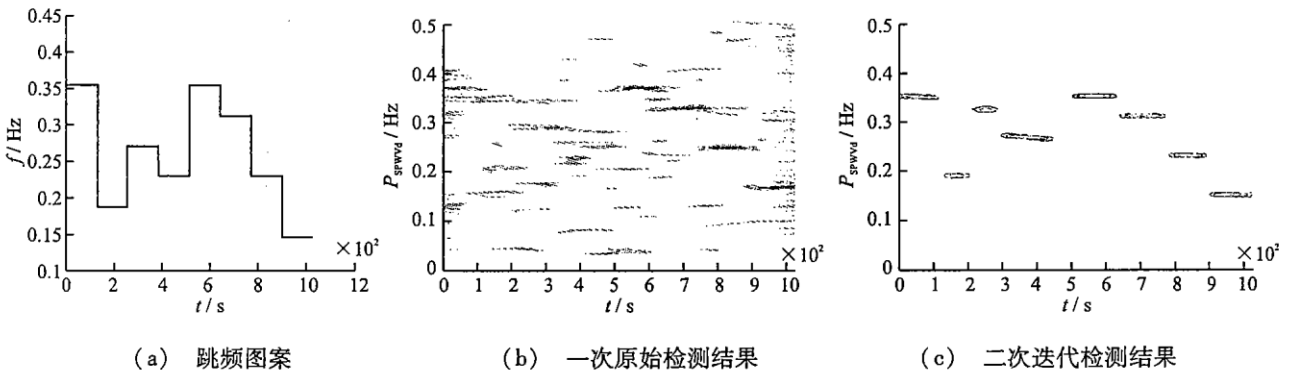


图 2 多窗口 SPWVD 对瞬时频率迭代估计(SNR = -8 dB)仿真结果

Fig. 2 The simulation result of multi-window SPWVD iteration analysis (SNR = -8 dB)

表 1 给出了在不同信噪比下, 经过一次迭代和二次迭代后估计频率与实际频率的方差值, 均为 100 次计算后的平均方差。由表 1 可知, 即使在信噪比较低的情况下, 经过 2 次迭代, 即可获得好的频率估计。

表 1 不同信噪比下估计频率的均方差

Tab. 1 The standard deviation of instantaneous frequency estimation under different SNR

SNR/dB	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6
一次迭代均方差	0.012 4	0.008 0	0.003 0	0.001 2	0.000 7	0.000 6	0.000 5	0.000 4
二次迭代均方差	0.009 7	0.006 5	0.002 2	0.001 1	0.000 8	0.000 6	0.000 4	0.000 4

2.2 跳周期和跳频图案的多窗口迭代估算法

设信号跳频带宽 0 - 100 MHz, 2×10^5 跳/s。观测时间为 6 个跳周期, 采样得到 6×10^4 个样本值。以 1 000 作为矩形窗口的长度(共需要 60 个窗), 在各个相邻窗口不重叠的情况下, 分别对每个窗口做 SPWVD 迭代运算后, 沿时间轴求出每个时刻 SPWVD 的能量最大值, 再将各个最大值曲线连接起来得到图 3(a)。

对图 3(a)作 FFT 变换, 可以很容易的得出该周期振荡信号的振荡频率, 图 3(b)给出了图 3(a)的 FFT 结果, 频谱峰值位置处即为跳频速率值。其倒数即为跳频周期的估计值。由图 3(b)得到的跳频周期估计 $\hat{T}_h = 1/35 \approx 0.028 57$ s。

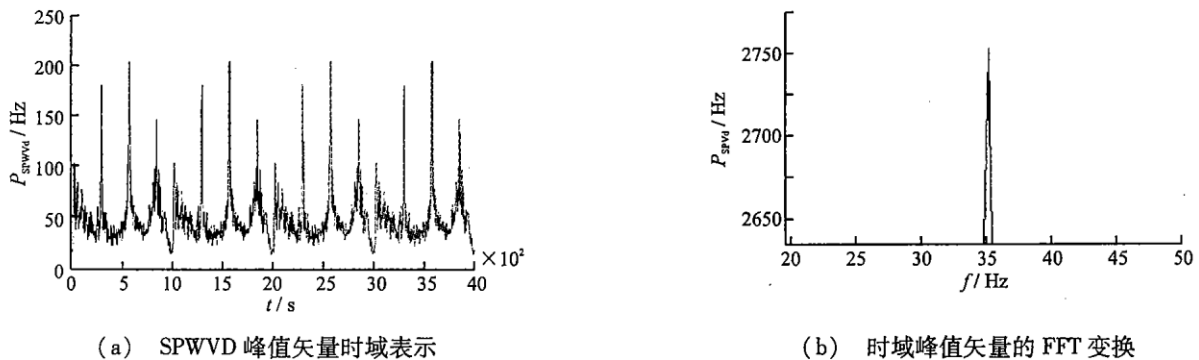


图 3 多窗口 SPWVD 跳频信号参数迭代分析

Fig. 3 The hopping parameter simulation results of multi-window iteration analysis

同理, 可以沿频率轴求出每个频点 SPWVD 的能量最大值, 再将各个最大值曲线连接起来得到 SPWVD

峰值矢量的频域表示,从中即可以得到跳频信号的跳频图案^[9-10]。

3 结束语

在实际通信系统的高噪声环境下,我们用多窗口迭代 SPWVD 的方法,解决了低信噪比情况下的跳频信号瞬时频率检测问题。只有在瞬时频率估计准确情况下,才能使得跳周期等其他跳频参数的估计顺利进行。仿真表明,本文提出的多窗口迭代 SPWVD 跳频信号多参数估计算法具有较好的效果,在较低信噪比时(-8 dB)也可以得到比较精确的多个跳频信号参数估计值。

参考文献:

- [1] Cohen L. Time - Frequency Analysis[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice - Hall, 1995.
- [2] Boualem Boashash. Signal Enhancement by Time - Frequency Peak Filtering [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2004, 52: 1145 - 1149.
- [3] Bikdash M, Yu K B. Analysis and Filtering Using the Optimally Smoothed Wigner Distribution functions [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1993, 41: 1259 - 1260.
- [4] Boashash B. Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal: Part 1: Fundamentals [J]. Proc IEEE, 1992, 80: 519 - 538.
- [5] Boashash B, Shea P. Polynomial Wigner - Ville Distributions and Their Relationship to Time - Varying Higher Order Spectra [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1994, 42: 216 - 220.
- [6] Cohen L. Distributions Concentrated Along the Instantaneous Frequency [J]. SPIE, Advanced Signal Process, 1990, 48 (5): 149 - 157.
- [7] 冯存前,张永顺,童宁宁. 一种基于离散小波变换的自适应滤波新算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004, 5(5): 50 - 53.
FENG Cunqian, ZHANG Yongshun, TONG Ningning. A New Adaptive Filtering Algorithm Based on Discrete Wavelet Transforms [J]. Journal Of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(5): 50 - 53. (in Chinese)
- [8] Veselin N Ivanovic. Performance of Quadratic Time - Frequency Distributions as Instantaneous Frequency Estimators [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51 (1): 77 - 89.
- [9] ZHANG Zhaoyang, CAO Qianqian, CHEN Wenzheng. Blind Separation and Parameter Estimation of Multiple Frequency - Hopping Signals [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2005, 39(4): 465 - 470.
- [10] Igor Djurovic, Ljubisa Stankovic. Robust Wigner Distributions With Application to the Instantaneous Frequency Estimation [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2001, 49: 2985 - 2993.

(编辑:田新华)

The Estimation of FH Signal Parameter by Multi - windows Iterative SPWVD Algorithm

LU Hu^{1,2}, SHI Hao - shan¹, XIE Yan²

(1. Electronic Information School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Contrast and analysis of frequency - hopped sequence based on tradition time - frequency presentation is proposed in the paper. Then the paper presents a novel method of estimating transmission parameters such as instantaneous frequency, hop duration and hopping frequency pattern by using the iterative multiple windows smoothed pseudo Wigner - Vile distribution (SPWVD). The simulation results show better recovery of the signals in a lower SNR level (-8dB).

Key words: smoothed pseudo Wigner - Vile Distribution; instantaneous frequency; frequency Hop Sequence