文章编号: 2095-4980(2013)06-0942-06

形态学滤波与组合时频分布跳频信号参数估计

赵方超1,蒋建中1,郭军利1,陈正虎2

(1.信息工程大学 信息系统工程学院,河南 郑州 450002; 2.总装备部 装甲兵军事代表局,北京 100751)

摘 要:针对跳频信号参数估计中平滑类维格纳分布(WVD)运算量大和时频分辨率下降等问题,提出一种基于形态学滤波与组合时频分布的跳频参数盲估计方法。该方法首先利用短时傅里 叶变换(STFT)和维格纳分布得到跳频信号的组合时频分布,然后通过形态学滤波得到清晰的时频 图,进而估计出跳周期、跳变时刻和跳频频率等参数。理论分析和仿真结果表明,与直接利用平 滑伪维格纳(SPWVD)进行跳频参数估计相比,该方法计算量更小,估计精确度更高。

Parameter estimation of FH signals based on morphological filtering and combination of time-frequency distribution

ZHAO Fang-chao¹, JIANG Jian-zhong¹, GUO Jun-li¹, CHEN Zheng-hu²

(1.Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China;
 2.Military Representative Bureau of Armored Force, General Armament Department, Beijing 100751, China)

Abstract: A parameter blind estimation method of Frequency-Hopping(FH) signals is proposed based on morphological filtering and the combination of time-frequency distribution(TFD), to solve the problems of large computation amount and the decreased time-frequency resolution. Short-Time Fourier Transform (STFT) and Wigner-Ville Distribution(WVD) are adopted to obtain the combination of TFD. Thereafter, the clear time-frequency image is obtained by morphological filtering. According to the time-frequency image, the hop duration, hop timing and hop frequency are estimated. The theoretical analysis and simulation results demonstrate that the proposed algorithm, compared with Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution(SPWVD), bears less amount of calculation and higher estimation precision.

Key words: Frequency-Hopping signals; parameter estimation; combination of time-frequency analysis; morphological filtering

跳频(FH)通信是一种常见的抗干扰通信方式,以良好的抗干扰性、组网能力以及低截获率在军事和民用通信 中得到广泛应用。如何提取截获到的跳频信号的特征参数成为国内外研究的热点。

跳频信号是典型的非平稳信号,要得到特征参数的准确估计需要对跳频信号的细微特征进行分析。时频分析 可以从时间和频率两个维度描述信号的能量变化,是一种分析跳频信号的有力工具。常用的时频分析方法^[1]主要 有 STFT、小波变换(Wavelet Transform, WT)、WVD 等。STFT 方法简单,抗噪声能力强,无交叉项干扰,适于 跳频信号实时处理^[2]。WT 在时频域上具有良好的局部化性质和突变点检测能力,文献[3]利用它来进行跳频参数 估计得到较为准确的结果,但 WT 的计算量较大,而且估计性能易受噪声影响。WVD 是一种常用的二次时频分 布,不但具有理论上最高的时频分辨率^[4],而且满足时频分布所期望具有的所有数学性质。但是对于多分量信号 或频率随时间非线性变化的单分量信号,WVD 存在严重的交叉项干扰,应用受到很大限制。平滑类 WVD 通过 在时、频域对信号加窗平滑以抑制交叉项干扰。文献[5]和文献[6]分别采用伪 WVD(PWVD)和平滑伪 WVD(SPWVD)对跳频信号进行时频分析和参数估计。但是这种加窗平滑的方法是以损失信号的时频分辨率为代 价的,而且计算量非常大。文献[7]提出了一种基于 STFT 与 WVD 的组合算法,在保持 WVD 时频分辨率的同时,

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2013-01-26 基金项目:国家 "863" 计划资助项目(2009ZX03006-008) 有效地抑制了 WVD 的交叉项干扰,而且计算量相对 PWVD 和 SPWVD 要小得多。

数学形态学^[8]是一种建立在集合论基础上的变换理论和方法,广泛应用于图像处理和信号能量的检测。数学 形态学滤波比传统的滤波计算速度更快,算法简单,易于硬件实现。文献[9]和[10]采用形态学的开闭运算对经过 阈值处理后的时频分布进行滤波,以达到消除噪声时频点影响的目的。本文在文献[7]的基础上,采用形态学运 算对组合时频图进行滤波,得到更加清晰的时频图,完成对跳频信号参数的盲估计。理论分析和仿真结果表明, 该方法与 SPWVD 相比计算量更小,精确度更高,可以有效估计跳频信号特征参数。

1 相关理论

第6期

1.1 基于 STFT 与 WVD 的组合时频分布

1946年, Gabor 提出了 STFT 的概念, 对于信号 $x(t) \in L^2(R)$, 其 STFT 定义为:

$$STFT(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h^*(\tau-t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$
⁽¹⁾

式中 h(t) 为窗函数。

谱图定义为 STFT 模的平方, 表达式为:

$$SPEC(t,f) = \left|STFT(t,f)\right|^2 = \left|\int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h^*(\tau-t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau\right|^2$$
(2)

WVD 是一种常用的二次型时频分布,信号 x(t)的 WVD 定义为:

$$WVD(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$
(3)

WVD 具有非常好的时频聚焦性,但对于多分量信号存在交叉项干扰,文献[7]提出了基于 STFT 与 WVD 的 组合算法,基本原理可以表示为信号 *x*(*t*)的 WVD 与其谱图的乘积,即:

$$WVD(t, f) = WVD(t, f) \bullet SPEC(t, f)$$
(4)

1.2 数学形态学

最基本的形态学算子有:膨胀(dilation)、腐蚀(erosion)、开(opening),闭(closing)。基于灰度图像的腐蚀和膨胀运算是在结构元素定义的邻域内选择图像像素值和结构元素相作用后的最小或最大像素值,使用结构元素 b对输入图像 f 的灰度膨胀和腐蚀运算分别为:

$$(f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x - x', y - y') + b(x', y') | (x', y') \in D_b\}$$
(5)

$$(f \Theta b)(x, y) = \min\{f(x + x', y + y') - b(x', y') | (x', y') \in D_b\}$$
(6)

式中D_b为b的定义域。

2 基于形态学滤波和组合时频分布的跳频信号参数估计

本文采用 STFT-WVD 组合时频分布对跳频信号进行时频分析,利用形态学多尺度滤波的方法滤除组合时频 图中的噪声,完成跳频信号的参数估计,流程如图 1 所示。



具体实现步骤描述如下:

1) 对观测数据分别进行 STFT 和 WVD 变换;

2) 由式(4)得到组合时频图 WVD(t, f);

3) 采用多尺度结构元素对WVD(t, f)进行形态学滤波,得到 F_f ;

4) 对 F_f 进行分析,估计跳频信号参数。

2.1 生成组合时频图

跳频信号是频率在一定范围内随时间伪随机跳变的一种信号形式,本文采用的跳频信号模型为:

$$x(t) \stackrel{\text{def}}{=} A \sum_{k=0}^{N-1} r_{T_{\text{H}}}(t - kT_k - T_0) \exp[j2\pi f_k(t - kT_k - T_0)] + n(t)$$
(7)

其中, $0 \leq t \leq T$, T 为信号观测时间, A为幅度, $r_{T_{H}}(t) = \begin{cases} 1, t \in [0, T_{H}] \\ 0, t \in t \end{cases}$, T_{H} 为跳周期, T_{0} 为起跳时刻, f_{k} 是第 k个跳频频率, n(t)为零均值加性高斯白噪声, N是载波频率个数。

根据上面的定义仿真产生一段夹杂高斯白噪声的跳频信号(信噪比 SNR 为 10 dB),观测时间为 8 个跳周期,



2.2 形态学滤波

结构元素在形态学滤波中起着关键作用,小尺度结构元素对图像重叠有较强的分辨作用,但噪声去除能力较弱;大尺度结构元素对图像边缘提取较粗,但噪声去除能力很强。为更好地去除噪声并保留信号时频信息,本文采用多尺度结构元素^[11]对图像进行滤波。

根据灰度形态学腐蚀、膨胀运算的特点,首先利用较大尺度的结构元素 SE₁对时频图进行腐蚀运算,去处噪声;然后利用较小尺度的结构元素 SE₂进行膨胀运算, 对腐蚀运算可能造成的部分边缘连续性的破坏进行恢复。滤波公式如下:

$$F_{f} = \begin{bmatrix} N \hat{V} D(t, f) \Theta SE_{1} \end{bmatrix} \oplus SE_{2}$$
(8)

其中, F_f为滤波后的时频图(图5)。图 6 为多尺度结构元素。

2.3 特征参数估计

2.3.1 跳周期估计

图 7 为经形态学滤波后组合时频分布的立体图,可发现时频图上每跳呈现山峰状,峰值对应每跳的中心时刻, 这是信号经过 WVD 变换后所具有的背鳍性^[12],组合时频较好地保留了这种独特的性质,由此可以得出跳周期的 估计方法:

1) 求出 F_f 在每一时刻的最大值,得到 F_f 在时间方向的能量包络 y(n)(图 8)。 y(n)具有明显的周期特性,其周期为跳频速率。

2) 对 y(n) 做傅里叶变换,求出跳频速率估计值(图 9),其倒数即为跳周期估计 $T_{\rm H}$ 。



Fig.6 Filtering structure elements 图 6 滤波结构元素

945



2.3.2 跳变时刻估计

观察图 8 可发现,包络 y(n)具有多处明显向下的峰值,这些峰值对应的时刻即为跳频信号的跳变时刻。理论上,第一个峰值出现的时刻对应着第一个完整跳的起跳时刻,但第一个周期往往不完整,可用下式表示第一个峰值的位置: $\alpha \hat{T}_{H}, 0 < \alpha \leq 1$ 。

求得第一跳的起跳时刻,再由 T_H即可得到各跳的跳变时刻。由于残余噪声的影响,各峰值的出现时刻与跳 变时刻之间会存在误差。为尽可能准确地确定第一个峰值出现的时间,可根据多个峰值出现的时刻取平均得到第 一个峰值相对于观测起点的平均值,以此作为第一跳的起跳时刻估计值。

假设取 M 个峰值,出现的时刻分别为 $T_{\text{peak}}(m), m = 1, 2, \dots, M$,则第一跳的起跳时刻估计值为:

$$T_{\text{peak}}(1) = \alpha \hat{T}_{\text{H}} = \frac{1}{M} \left[\sum_{m=1}^{M} T_{\text{peak}}(m) - \frac{M(M-1)}{2} \times \hat{T}_{\text{H}} \right]$$
(9)

其他各跳跳变时刻可由下式得到:

$$T_{\text{peak}}(m) = \frac{1}{M} \left[\sum_{m=1}^{M} T_{\text{peak}}(m) - \frac{M(M-1)}{2} \times \hat{T}_{\text{H}} \right] + (m-1)\hat{T}_{\text{H}} = T_{\text{peak}}(1) + (m-1)\hat{T}_{\text{H}}$$
(10)

其中 $m=2,3,\cdots,M$ 。

2.3.3 跳频频率估计

在 F_f 中,每一跳的能量集中在跳频频率附近,在该频率点上可以得到能量的峰值。因此,在得到跳周期和跳变时刻的估计值基础上,可以将每个跳周期内的幅度值 $F_{f,n}(t,f)$ 按时间累加,可表示为 $\sum_n F_{f,n}(t,f)$,然后沿频率轴找出最大值所在的位置,即可得到跳频频率的估计值。第n个周期的跳频频率估计值可表示为:

$$\hat{f}_n = \arg_f \left\{ \max\left[\sum_n F_{f,n}(t,f) \right] \right\}$$
(11)

对每个周期内的频率估计值按时间进行整理,可得到被测信号的跳频图案。

3 算法性能分析与比较

3.1 运算量比较

在实际跳频信号估计中,算法的运算量是一项非常重要的指数指标。记 N 为观测时段内采样序列点数, H,G 分别为时域和频域平滑窗长度,则组合时频与 SPWVD 的运算量可分别表示如下^[13]:

$$\Omega_{\rm STFT-WVD} = \frac{N}{2} \left(H \log_2 H + \log_2 N \right) + N \left(N + H \right)$$
(12)

$$\Omega_{\rm SPWVD} = \frac{NHG}{2}\log_2 H + 2NHG \tag{13}$$

设时、频域平滑窗长度分别取H = N/4 + 1, G = N/10 + 1, 可得:

$$r = \frac{\Omega_{\text{SPWVD}}}{\Omega_{\text{STFT-WVD}}} \approx \frac{N(\log_2 N + 2)}{10\log_2 N + 80}$$
(14)

当 N 分别取 256 点、512 点、1 024 点和 2 048 点时, r 值分别为 16,33.13,68.27 和 140.13。一般情况下,采 样序列点数为几千点甚至更高,可见组合时频分布的运算量明显小于 SPWVD。与文献[10]采用 SPWVD 分析跳 频信号进行参数估计相比,本文采用组合时频分布避免了 SPWVD 巨大的计算量,更适合实时处理。

3.2 不同信噪比条件下算法的性能分析与比较

为验证上述方法的正确性及算法性能,采用图2所示的跳频信号进行仿真实验。

图 10 为在不同信噪比 *R*_{SN}=-10 dB~10 dB 情况下(下同),做 400 次 Monte Carlo 试验得到的跳周期各次估计 值的均方误差(Mean Square Error, MSE)曲线。由曲线可以看出,均方误差与信噪比成反比关系,随着信噪比减 小而逐渐增大,当 *R*_{SN}>-2 dB 时,本文方法估计性能优于 SPWVD 估计方法。

图 11 为不同信噪比情况下做 400 次 Monte Carlo 试验得到的跳变时刻估计均方误差曲线。由式(10)可知跳变时刻的估计与跳周期有关,为避免跳周期对跳变时刻估计的影响,假设已知跳周期估计值为 12.8 μs。由图中曲线可知,当 *R*_{SN}>-2 dB 时,本文方法在估计精确度上高于 SPWVD。

图 12 为不同信噪比情况下做 400 次 Monte Carlo 试验得到的跳频频率估计均方误差曲线。为单独考虑跳频 频率估计性能,假设已知跳周期值为 12.8 μs,第一个完整周期的起跳时刻为 6.4 μs。由图 12 可见不同信噪比情况下,本文方法跳频频率估计均具有更高的估计精确度。



图 10~图 12 还将本文采用的方法与常用的小波阈值去噪方法进行了仿真对比。可以发现,在组合时频的基础上,采用形态学滤波和小波阈值去噪对于跳频信号参数估计具有相似的性能。但是小波阈值去噪方法存在阈值 选择和如何进行门限阈值处理的问题,而且计算量较大。表1给出了在不同数据长度下,本文方法和采用小波阈 值去噪方法的运算时间。可以看到,本文方法运算时间明显少于小波阈值去噪方法。

表 1 运算时间对比(时间甲位: s) Table1 Elapsing time of different methods(time unit: s)				
the method in this paper	0.173 241	0.886 994	3.547 278	19.529 483
the wavelet method	0.218 527	1.096 184	4.327 841	23.794 128

4 结论

与跳频信号的 SPWVD 分布相比, STFT-WVD 组合时频分布不但保持了 WVD 的高时频分辨率,抑制了交 叉项的干扰,而且具有更小的计算量。本文在文献[7]方法的基础上,对跳频信号的组合时频进行形态学滤波去 除噪声影响,实现了跳频信号的跳周期、跳变时刻和跳频频率的估计,通过仿真给出了算法性能分析结果,该方 法比 SPWVD 方法具有更小的计算量和更高的参数估计精确度,而且无需已知跳频信号的任何先验参数,能够实 现跳频参数的盲估计。

参考文献:

- [1] Hlawatsch F, Auger F. Time-Frequency Analysis: Concepts and Methods[M]. London(UK):ISTE and Wiley, 2008.
- [2] 严超会,汤建龙. 跳频信号的跳周期估计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(1):74-77. (YAN Chaohui,TANG Jianlong. Hop duration estimation for frequency-hopping signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(1):74-77.)

- [3] 张曦,王星,杜兴民. 基于小波变换的跳频信号参数盲估计[J]. 电路与系统学报, 2009,14(4):60-65. (ZHANG Xi,WANG Xing,DU Xingmin. Blind parameter estimation of frequency-hopping signals based on wavelet transform[J]. Journal of Circuits and Systems, 2009,14(4):60-65.)
- [4] Ljubisa Stankovic. A Measure of Some Time-Frequency Distributions Concentration[J]. Signal Processing, 2001,81(3): 621-631.
- [5] Barbarossa S, Scaglione A. Parameter Estimation of Spread Spectrum Frequency-hopping Signals using Time-Frequency Distributions[C]// First IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Paris, France: IEEE, 1997:213-216.
- [6] 赵俊,张朝阳,赖利峰,等. 一种基于时频分析的跳频信号参数盲估计方法[J]. 电路与系统学报, 2003,8(3):46-50.
 (ZHAO Jun,ZHANG Zhaoyang,LAI Lifeng, et al. Blind Parameter Estimation of Frequency-Hopping Signals Based on Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003,8(3):46-50.)
- [7] 高宪军,陈超,张杰,等.抑制维格纳分布交叉干扰项的联合算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2009,27(2):
 127-132. (GAO Xianjun, CHEN Chao, ZHANG Jie, et al. Amelioration Algorithm to Suppress the Cross-Term Interference of WVD[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2009,27(2):127-132.)
- [8] 崔屹. 图像处理与分析-数学形态学方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2000:97-106. (CUI Yi. Image Processing and Analysis: Mathematical Morphological Method and Application[M]. Beijing:Science Press, 2000:97-106.)
- [9] 尚海燕,水鹏朗,张守宏,等. 基于时频形态学滤波的能量积累检测[J]. 电子与信息学报, 2007,29(6):1416-1420. (SHANG Haiyan,SHUI Penglang,ZHANG Shouhong,et al. Energy Integration Detection via Time-Frequency and Morphological Filtering[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(6):1416-1420.)
- [10] 宫翔,王振华,王晨光. 基于时频分析与形态学滤波的跳频参数估计[J]. 空军雷达学院学报, 2011,25(4):243-246.
 (GONG Xiang,WANG Zhenhua,WANG Chenguang. Parameter Estimation of FH Signal Based on Time-Frequency Analysis and Morphological Filtering[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011,25(4):243-246.)
- [11] 薛丽霞,李涛,王佐成. 自适应的形态学边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2010,36(23):214-216. (XUE Lixia,LI Tao, WANG Zuocheng. Adaptive Edge Detection Algorithm Based on Morphology[J]. Computer Engineering, 2010,36(23): 214-216.)
- [12] 王忠仁,林君,李文伟. 基于 Wigner-Ville 分布的复杂时变信号的时频分析[J]. 电子学报, 2005,33(12):2239-2241.
 (WANG Zhongren,LIN Jun,LI Wenwei. Time-Frequency Analysis for Complex Time-Varying Signals Based on Wigner-Ville Distribution[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(12):2239-2241.)
- [13] 陈利虎. 跳频信号的侦察技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009. (CHEN Lihu. Research on Reconnaissance of Frequency Hopping Signals[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2009.)

作者简介:

第6期



赵方超(1984-),男,石家庄市人,在读硕 士研究生,主要研究方向为通信信号处理. email:yitouws@163.com. **蒋建中**(1964-),男,江苏省常州市人,硕士, 副教授,主要研究方向为计算机网络与通信.

郭军利(1974-),男,河南省开封市人,硕士, 副教授,主要研究方向为通信与信息系统.

陈正虎(1985-),男,河北省衡水市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为通信信号处理.