

基于时频脊线的跳频参数盲估计

冯 涛^{1,2}, 袁超伟¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 中国电科集团第 54 研究所, 河北石家庄 050081)

摘 要: 为了估计未知跳频信号的参数, 提出一种基于时频脊线的跳频参数盲估计方法, 根据跳频信号频率的瞬变特性, 通过对跳频信号时频脊线的小波变换, 可以准确估计跳周期, 进而估计其它跳频参数. 理论分析和仿真结果表明, 该方法可以在低信噪比下以较低的运算复杂度实现高精度的参数估计, 整体性能优于现有的跳频参数盲估计方法.

关键词: 跳频信号; 时频脊线; 小波变换

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2921-05

Blind Parameter Estimation of Frequency-Hopping Signals Based on the Time-Frequency Distribution Maxima

FENG Tao^{1,2}, YUAN Chao-wei¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Chinese Electrical Technology Corp. 54th Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: To estimate the parameters of unknown frequency-hopping (FH) signals, a blind parameters estimation method for FH signals based on time-frequency distribution maxima is proposed. Due to the transient frequencies of FH signals, the hop period can be estimated accurately via the wavelet transform of the time-frequency distribution maxima of a FH signal. The switching time instants and the hopping frequencies can be estimated accordingly. The theoretical analysis and simulation result show that the method can accurately estimate the parameters of FH signals with a low computational complexity. The performance of this method is superior to the current existing method.

Key words: frequency-hopping signals; time-frequency distribution maxima; wavelet transform

1 引言

跳频通信以其良好的抗干扰、抗截获及组网能力, 已为现代军事通信系统广泛采用. 由此所引发的, 对跳频通信的对抗, 成为近年来通信对抗领域研究的重点. 在没有任何先验知识的情况下估计出跳频信号的各项参数, 是最终截获敌方通信内容, 产生最佳干扰信号, 瓦解敌方正常通信的首要前提.

由于跳频信号的频率随时间不断跳变, 属于典型的非平稳信号, 对跳频信号参数估计大多采用时频分析的方法. Barbarossa^[1]在 1997 年首次将伪 Wigner-Ville 分布引入跳频信号时频分析领域. 文献[2~7]在此基础上, 利用时频域平滑技术降低了时频分布中的交叉项干扰. 这些方法虽然采用了不同的时频分布, 但是其参数估计方法均相同, 都是利用时频分布每一时刻沿频率轴的最大值波形所具有的周期性估计跳周期, 进而估计其

它参数. 这种方法易于实现, 成为目前跳频参数盲估计的主流方法, 但是参数估计的精度还有待于进一步提高.

此外, 文献[8,9]提出了基于匹配追踪的跳频参数盲估计方法, 将跳频信号分解为若干时频原子的线性组合, 根据这些时频原子的参数估计跳频参数. 这种方法需要建立庞大的时频字典, 时频原子的参数划分也要足够精细, 使得这种方法的运算过程相当复杂, 时频原子的搜索时间非常漫长.

为了获得更好的参数估计性能, 并使算法具有较小的运算复杂度, 本文另辟蹊径, 提出一种基于时频脊线的跳频参数盲估计方法, 根据跳频信号时频脊线所表现出的频率瞬变特性, 通过对时频脊线的小波变换, 可以准确估计跳周期, 进而估计其它跳频参数. 最后评估了算法的参数估计性能及运算复杂度, 并与现有的跳频信号参数估计方法进行了比较.

2 跳频信号的数学模型

跳频信号是一类频率随时间伪随机跳变的信号,其简化模型定义为:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}_{T_h}(t - kT_h - T_0) e^{j2\pi f_k(t - kT_h - T_0)} \quad (1)$$

其中 $0 \leq t \leq T$, T 为观测时间, $\text{rect}_{T_h}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T_h] \\ 0, & \text{others} \end{cases}$, T_h 为跳周期, T_0 为起跳时间, f_k 是跳变频率, N 是跳变频率数. 这几项参数共同刻画了一个跳频信号, 对跳频信号的参数估计, 正是要估计这几项参数.

3 跳频信号的时频分布与时频脊线

时频分析是当今信号处理领域的一个主要研究热点, 特别是从 20 世纪 80 年代以来, 各种时频联合分析方法得到了深入的研究和广泛的应用, 逐渐形成了一套独特的理论体系, 出现了线性时频表示、双线性时频分布、重排类时频分布、参数化自适应时频分布等各种时频分析方法. 这些时频分布提供了从时域到时频域的变换, 能够反映信号频率随时间的变化情况, 同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度.

跳频信号的频率随时间非线性变化, 其 Wigner-Ville 分布存在严重的交叉项干扰^[10]. Cohen 类时频分布通过核函数对 Wigner-Ville 分布进行平滑, 当核函数选择合适时, 能够彻底消除交叉项干扰, 同时具有较高的时频聚集性. 对于跳频信号, 谱图和平滑伪 Wigner-Ville 分布是较为理想的时频分布类型.

对于信号 $s(t)$, 其时频脊线是指它的时频分布 $\text{TFR}_s(t, f)$ 中每一时刻的峰值频率, 即

$$\hat{f}_i(t) = \arg[\max_f \text{TFR}_s(t, f)] \quad (2)$$

对于一个时频聚集性好且无交叉项的时频分布, 信号的能量总是沿着瞬时频率集中分布, 也就是说, 时频分布的能量脊线总是出现在信号的瞬时频率附近, 因此, 信号的时频脊线等于或近似等于信号的瞬时频率^[11, 12].

以跳频信号的平滑伪 Wigner-Ville 分布为例, 如图 1

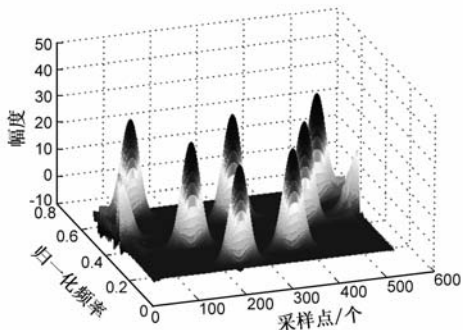


图1 跳频信号的平滑伪Wigner-Ville分布

所示, 可见信号的能量集中分布在瞬时频率周围. 提取时频分布的能量峰脊, 可以得到跳频信号的时频脊线如图 2 所示.

由图 2 中可以看出, 跳频信号的时频脊线表现为时频平面上的一组线段, 这些线段反映了跳频信号瞬时频率的大小及其随时间的变化规律: 在同一个跳周期内频率保持不变, 在不同的跳周期内频率发生跳变. 根据时频脊线, 可以估计跳频信号的各项参数.

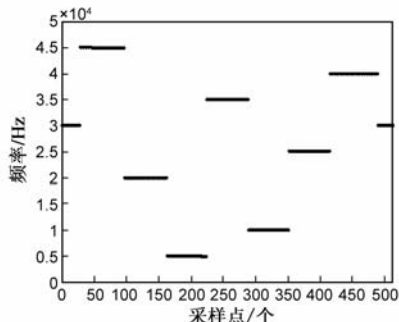


图2 跳频信号的时频脊线

4 基于时频脊线的跳频参数盲估计

表征跳频信号的主要参数有跳周期、起跳时间及跳频频率集. 经上述时频脊线的提取后, 跳频信号的参数估计工作转变成时频平面上特征曲线参数的确定过程.

4.1 基于小波变换的跳周期估计

信号的奇异点往往包含着重要的信息, 观察图 1 所示跳频信号的时频脊线可以看出, 在相邻的跳频频率之间存在瞬变现象, 并由此产生奇异点, 有效地判别出频率跳变点, 则可准确估计跳频信号的跳周期.

小波变换对瞬变信号有很好的检测能力, 可在局部上判别出信号的奇异点, 从而精确描述信号的变化时刻. 信号的小波变换定义为^[13]:

$$\text{WT}_s(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \varphi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt, \quad a > 0 \quad (3)$$

其中 $s(t)$ 为信号, $\varphi(t)$ 为母小波函数, $*$ 表示共轭, a 为尺度, τ 为位移. 由于 Haar 小波对暂态信号有较强的检测能力, 这里选用 Haar 小波作为母小波, 其表达式如下:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & -0.5 < t < 0 \\ -1, & 0 < t < 0.5 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

由于跳频信号的时频脊线近似于其瞬时频率, 因此可表示为

$$\hat{f}_i(t) \approx \sum_k f_k \cdot \text{rect}_{T_h}(t - kT_h - T_0) \quad (5)$$

令小波变换的尺度 a 固定, 分如下两种情况计算其小波变换:

①如果 $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换积分区间在同一个跳周期

内,频率未发生变化,设频率为 f_k ,则 $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换模值为:

$$y(\tau) = \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\tau-\frac{a}{2}}^{\tau} f_k dt - \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\tau}^{\tau+\frac{a}{2}} f_k dt \right| = 0 \quad (6)$$

可见,在同一个跳周期内, $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换模值恒为 0.

②如果 $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换积分区间跨越不同的跳周期,存在频率的瞬变,设 f_k 和 f_{k+1} 分别为跳频信号第 k 个和第 $k+1$ 个频率,设在 τ_0 处,频率由 f_k 变为 f_{k+1} ,则 $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换模值为:

$$y(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{a}} \left| \int_{\tau-\frac{a}{2}}^{\tau_0} f_k dt + \int_{\tau_0}^{\tau} f_{k+1} dt - \int_{\tau}^{\tau+\frac{a}{2}} f_{k+1} dt \right| \\ \frac{1}{\sqrt{a}} \left| \int_{\tau-\frac{a}{2}}^{\tau} f_k dt - \int_{\tau}^{\tau_0} f_k dt - \int_{\tau_0}^{\tau+\frac{a}{2}} f_{k+1} dt \right| \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{a}} |f_{k+1} - f_k| \cdot \left| \tau - \tau_0 - \frac{a}{2} \right|, \tau - \frac{a}{2} \leq \tau_0 \leq \tau \\ \frac{1}{\sqrt{a}} |f_{k+1} - f_k| \cdot \left| \tau - \tau_0 + \frac{a}{2} \right|, \tau \leq \tau_0 \leq \tau + \frac{a}{2} \end{cases} \quad (7)$$

可见在不同的跳周期内,小波变换的模值不为 0,前后频率差越大,模值越大.在频率瞬变处,即 $\tau = \tau_0$ 时,模值达到最大值.

当积分区间沿 τ 轴不断滑动,小波变换模值会在 0 值与峰值之间交替变化.当 $a \ll T_h$ 时,模值为 0 的区间 \gg 模值不为 0 的区间.在整个 τ 轴上, $\hat{f}_i(t)$ 的小波变换模值可近似为冲激函数序列:

$$y(\tau) = \sum_k C_k \delta(\tau - kT_h - T_0) \quad (8)$$

其中

$$C_k = \frac{\sqrt{a}}{2} |f_k - f_{k+1}| \quad (9)$$

$\hat{f}_i(t)$ 的小波变换模值如图 3 所示.

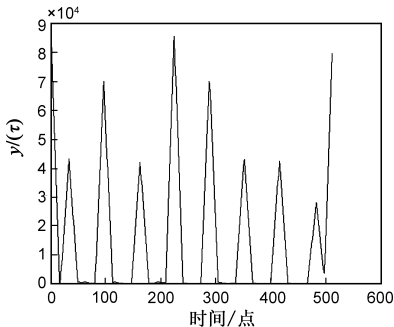


图3 时频脊线的小波变换模值

对小波变换模值 $y(\tau)$ 进行傅立叶变换,得

$$Y(f) = \frac{4\pi^2}{T_h} \sum_k C_k \delta\left(f - \frac{k}{T_h}\right) \quad (10)$$

可见傅立叶变换后得到一个频域内的冲激函数序

列,周期为 $1/T_h$,如图 4 所示.第一个谱峰对应的频率即为跳频速率 $1/T_h$,其倒数即为跳频周期 T_h .

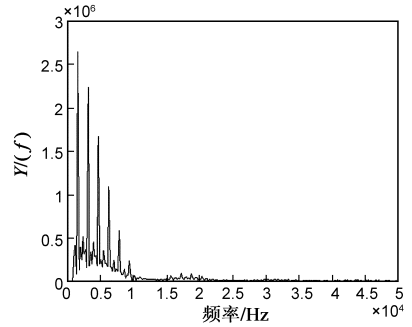


图4 小波变换模值的频谱

4.2 起跳时间和跳频频率的估计

由于观测信号的起跳时间不同,图 3 中各峰值相对于观测起点的位置也不一样.忽略 0 时刻的峰值和最后一个峰值,那么从理论上说,第一个峰值出现的时间,就对应着起跳时间.考虑到有噪声时,瞬时频率的估计存在误差,造成各频率瞬变时刻的估计也存在误差,因此各峰值的出现时间并不完全准确.为了尽可能准确地确定第一个峰值出现的时间,可以根据多个峰值出现时间取平均,得到第一个峰值相对于观测起点的平均值.

设共有 K 个峰值,出现时间分别为 $T_p(k), k = 1, \dots, K$,将第一个峰值出现时间的平均值作为起跳时间的估计值,即

$$\hat{T}_0 = \frac{\left(\sum_{k=1}^K T_p(k) - \frac{K \times (K-1)}{2} \hat{T}_h \right)}{K} \quad (11)$$

至于跳频频率的估计,可以由跳频信号的时频脊线直接得到,考虑到各跳周期两端的时频脊线在加噪时往往极不稳健,取各跳周期时间中点对应的频率,即可得到全部跳频频率:

$$\hat{f}_k = \hat{f}_i(t) \Big|_{t=T_p(k) + T_h/2} \quad (12)$$

4.3 跳频信号的参数估计流程

跳频信号参数估计算法的步骤如下:

- (1) 计算信号 $x(t)$ 的时频分布 $TFR_x(t, f)$;
- (2) 基于时频分布的能量脊线估计信号的瞬时频率 $\hat{f}_i(t) = \arg[\max_f TFR_x(t, f)]$;
- (3) 对 $\hat{f}_i(t)$ 作小波变换,并取模值,得到 $y(\tau)$;
- (4) 对 $y(\tau)$ 作 FFT,得到 $Y(f)$;
- (5) 求 $Y(f)$ 第一个谱峰对应的频率,取其倒数得到跳周期的估计值 \hat{T}_h ;
- (6) 求 $y(\tau)$ 各峰值的出现时间,按式(11)估计起跳时间,得到 \hat{T}_0 ;
- (7) 取 $\hat{f}_i(t)$ 各跳周期时间中点的频率,得到全部跳频频率 $\hat{f}_k, k = 1, \dots, K$.

5 算法性能仿真分析

为了验证本文提出的跳频参数盲估计算法的性能,仿真产生一段跳频信号,长度为 512 个采样点,跳频频率依次为 {30 45 20 5 35 10 25 40 30} kHz,采样率为 100kHz,跳周期为 0.64ms(64 个采样点),跳频起始时间为 0.32ms(32 个采样点).对信号的时频分析采用平滑伪 Wigner-Ville 分布.

在各种信噪比(SNR)下都进行 100 次 Monte Carlo 试验,测得跳周期的估计方差随 SNR 的变化曲线如图 5 所示.由图中可以看出,图中曲线存在明显的门限效应,当 $SNR \geq 0$ dB 时,跳周期的估计方差与 Cramer-Rao 界(CRB)非常接近; $SNR < 0$ dB 时,估计方差急剧恶化.可见这种基于谱线检测的跳周期估计方法非常稳健,在 $SNR \geq 0$ dB 时,具有非常高的估计精度.通过增加采样数据的长度,可以进一步降低 SNR 门限.

作为比较,将以文献[2]和文献[9]为代表的跳周期估计方法性能曲线也同时表示在图 5 中.由图可见,本文方法和文献[2]方法的方差曲线几乎完全重合,这是由于两种方法都是利用 $y(\tau)$ 的周期性,通过谱线检测的方法来估计跳周期,因此具有相近的性能.而以文献[9]为代表的原子分解参数估计法虽然没有门限效应,但是受原子字典维数所限,其参数估计精度较低,在 $SNR \geq 0$ dB 时,跳周期估计性能明显不及其它两种方法.

在各种 SNR 下都进行 100 次 Monte Carlo 试验,测得

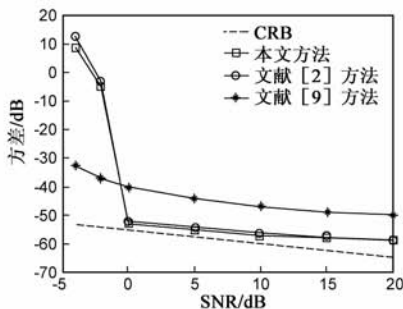


图5 跳周期估计方差曲线

作为比较,将以文献[2]和文献[9]为代表的跳频频率估计方法性能曲线同时表示在图 7 中,由图可见,在 $SNR \geq 0$ dB 时,本文的跳频频率估计方法性能明显优于其它两种方法.究其原因,是因为跳频频率的估计也受 $y(\tau)$ 峰值位置估计的影响,本文利用小波变换对奇异点的敏感性,能获得更为准确的峰值位置估计,因此跳频频率的估计也更准确.原子分解参数估计法受原子字典维数所限,其参数估计精度较低.

根据以上仿真分析可知,对 512 点采样数据,当 $SNR \geq 0$ dB 时,本文方法可以实现高精度的参数估计.由于利用了小波变换对瞬变信号良好的检测能力,总体来说,本文的参数估计算法在性能上优于现有的跳频

起跳时间的估计方差随 SNR 的变化曲线如图 6 所示.由图中可以看出,起跳时间的估计方差随 SNR 的降低而增加,当 $SNR \geq 0$ dB 时,估计方差与 CRB 非常接近;当 $SNR < 0$ dB 时,估计方差急剧恶化.这是因为起跳时间的估计受跳周期估计的影响,当 $SNR < 0$ dB 时,跳周期的估计性能变差,引起起跳时间的估计也随之变差.

作为比较,将以文献[2]和文献[9]为代表的起跳时间估计方法性能曲线同时表示在图 6 中,由图可见,在 $SNR \geq 0$ dB 时,本文的起跳时间估计方法明显优于其它两种方法.究其原因,是因为起跳时间的估计受 $y(\tau)$ 峰值位置估计的影响,本文利用小波变换对奇异点的敏感性,能获得更为准确的峰值位置估计精度,因此起跳时间的估计也更准确.原子分解参数估计法受原子字典维数所限,其参数估计精度较低.

在各种 SNR 下都进行 100 次 Monte Carlo 试验,测得跳频频率的估计方差随 SNR 的变化曲线如图 7 所示.由图中可以看出,当 $SNR \geq 0$ dB 时,跳频频率的估计方差与 CRB 非常接近,误差主要来自于受采样点数所限而引起的估计误差;当 $SNR < 0$ dB 时,估计方差急剧恶化.这一方面是因为跳频频率的估计受 $y(\tau)$ 峰值位置估计的影响, $SNR < 0$ dB 时, $y(\tau)$ 峰值位置的估计精度变差,引起跳频频率的估计性能变差;另一方面是因为 $SNR < 0$ dB 时,时频分布受噪声影响较大,造成瞬时频率的估计精度变差.

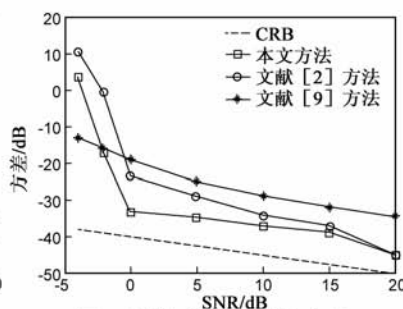


图6 起跳时间估计方差曲线

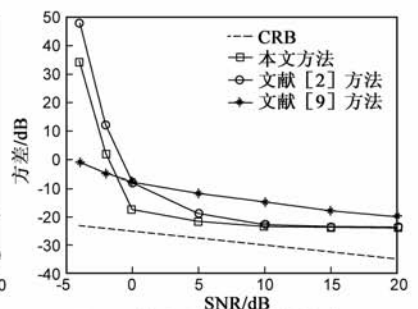


图7 跳频频率估计方差曲线

信号参数估计方法.

6 算法复杂度分析

设信号长度为 512 个采样点,包含 N 个跳周期.文献[2]提出的参数盲估计方法运算复杂度为 512 × 512 点 SPWVD + 512 点 FFT + 512 点累加求和,运算复杂度最小.本文提出的基于时频脊线的跳频参数盲估计方法的运算复杂度为 512 × 512 点 SPWVD + 512 点一维小波变换 + 512 点 FFT,运算复杂度略高于文献[2]方法.文献[9]提出的参数盲估计方法要想达到和本文构建的方法同样的估计精度,需要构造 512 × 512 × 512 维原子字典,在原子分解中,需要至少 N 次迭代,每次迭代

共需要 $512 \times 512 \times 512$ 次内积运算. 即使采用遗传算法作为全局寻优算法, 每次迭代也需要数千次内积运算, 因此运算复杂度最高.

7 结论

本文通过对跳频信号时频脊线的特征分析, 提出了一种基于时频脊线的跳频参数盲估计方法. 仿真结果表明, 该方法可以在较低信噪比下以较低的运算复杂度实现高精度的参数估计, 整体性能优于现有的跳频参数盲估计方法. 该方法的提出, 为非合作情况下跳频信号的参数盲估计提供了一条有效的解决途径.

参考文献

- [1] Barbarossa S, Scaglione A. Parameter estimation of spread spectrum frequency hopping signals using time-frequency distributions[A]. Proc. of the 1st IEEE Signal Processing Working on Signal Processing Advances in Wireless Communications[C]. Paris: IEEE Press, 1997. 213 – 216.
- [2] 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 J, Zhang Z Y, Lai L F, 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. (in Chinese)
- [3] Guo J T, Wang H Y. Optimal kernel design and time-frequency analysis for frequency hopping signal using entropy measure [A]. Proceeding of 2008 IEEE International Conference on Information and Automation[C]. Changsha: IEEE Press, 2008. 1168 – 1171.
- [4] 武开有, 徐以涛, 沈良. 基于 Butterworth 分布的跳频信号参数估计[J]. 军事通信技术, 2009, 30(1): 11 – 15.
Wu K Y, Xu Y T, Shen L. Parameter estimation of frequency-hopping signals based on Butterworth distribution[J]. Journal of Military Communications Technology, 2009, 30(1): 11 – 15. (in Chinese)
- [5] Lei Yingke, Zhong Zifa, Wu Yanhua. A parameter estimation algorithm for high-speed frequency-hopping signals based on RSPWVD[A]. Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems [C]. Xiamen: IEEE Press, 2007. 392 – 395.
- [6] 张曦, 杜兴民, 朱礼亚. 基于 Gabor 谱方法的跳频信号时频分析[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(2): 150 – 154.
Zhang X, Du X M, Zhu L Y. Time frequency analysis of frequency hopping signals based on Gabor spectrum method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2007, 22(2): 150 – 154. (in Chinese)
- [7] 陈超, 郝雁中, 高宪军, 等. 基于 WVD 改进算法的跳频信号参数估计[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2010, 28(2): 124 – 130.
CHEN Chao, HAO Yan-zhong, GAO Xian-jun, et al. Parameter estimation of frequency-hopping signals based on amelioration algorithm of WVD[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2010, 28(2): 124 – 130. (in Chinese)
- [8] 郭建涛, 王宏远, 余本海. 基于粒子群算法的跳频信号参数估计[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 512 – 514.
GUO Jian-tao, WANG Hong-yuan, YU Ben-hai. Parameter estimation of frequency hopping signal based on particle swarm optimization[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(2): 512 – 514. (in Chinese)
- [9] 范海宁, 郭英, 艾宇. 基于原子分解的跳频信号盲检测和参数盲估计算法[J]. 信号处理, 2010, 26(5): 695 – 702.
FAN Hai-ning, GUO Ying, AI Yu. Blind detection and parameter estimation algorithm based on atomic decomposition[J]. Signal Processing, 2010, 26(5): 695 – 702. (in Chinese)
- [10] 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 Zhong-ren, LIN Jun, LI Wen-wei. Time-frequency analysis for complex time-varying signals based on Wigner-Ville distribution[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2239 – 2241. (in Chinese)
- [11] Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal—Part 2: Algorithms and applications[A]. Proc. IEEE[C]. New York: IEEE Press, 1992, 80(4): 540 – 568.
- [12] Veselin N Ivanovic, Milos Dakovic, LJubisa Stankovic. Performance of quadratic time-frequency distributions as instantaneous frequency estimators[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(1): 77 – 89.
- [13] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

作者简介

冯涛 女, 1971 年出生于河北省石家庄市, 博士研究生, 高级工程师. 研究方向: 通信对抗中的信号处理技术.
E-mail: fengtao54@sina.com

袁超伟 男, 1960 年出生于湖南省, 北京邮电大学教授、博士生导师. 研究方向: 移动通信先进技术.
E-mail: yuanew2000@bupt.edu.cn