

# 随机跳频信号的模糊函数与时频分析

郭建涛<sup>1,2</sup>GUO Jian-tao<sup>1,2</sup>

1.华中科技大学 电子与信息工程系,武汉 430074

2.信阳师范学院 物理电子工程学院,河南 信阳 464000

1.Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2.College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China

E-mail: e\_jiantao@163.com

**GUO Jian-tao. Ambiguity function of random frequency-hopping signals and its time-frequency analysis. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(18): 121-123.**

**Abstract:** Based on the analysis of ambiguity function and its characters about random frequency-hopping signal, the relation of rectangular kernel function which can be used in time-frequency analysis and signal ambiguity function is given, and a new time-frequency representation method is proposed. Theoretical deduction and simulation results show that it is effective to analyze fast frequency-hopping signal using this method. Compared with Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution (SPWVD), this algorithm can reduce the cost of computation, save operation time under the situation that keep approximate performance and is suitable for real-time analyzing.

**Key words:** frequency hopping signal; time-frequency distribution; kernel function; parameter estimation

**摘要:** 在分析随机跳频信号模糊函数及其特性的基础上,给出了用于时频分析的矩形核函数与信号模糊平面的关系,提出了一种新的时频表示方法。理论推导和仿真结果表明该方法能够有效地分析随时间快速跳变的跳频信号。与平滑伪维格纳分布相比,在保持相似性能的情况下,该算法运算量比较小,可以有效地节约运算时间,适合于快速跳频信号的实时分析。

**关键词:** 跳频信号; 时频分布; 核函数; 参数估计

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.18.038 **文章编号:** 1002-8331(2008)18-0121-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN911

## 1 引言

由于跳频通信具有良好的抗干扰、低截获和灵活的组网能力,因此跳频技术一出现,便在军事领域得到了极大的发展。采用跳频技术的电台不仅在信号的各个波段加以采用,跳频速率也越来越高,而且与其它形式的扩频技术组合运用,极大地提高了军事装备的抗截获和抗干扰能力,向通信对抗提出了严峻的挑战。因此,开展对跳频通信对抗的研究,寻求截获、分选识别跳频信号的方法,已经成为当今通信对抗领域紧迫而艰巨的任务之一<sup>[1-4]</sup>。

跳频信号是典型的非平稳信号,时频分析方法能够给出频率随着时间的变化关系,从而直观地表示了跳频信号的诸如跳变时刻、跳变周期以及跳频频率等主要参数,成为跳频信号分析的有力工具。常用的时频分析方法包括短时傅立叶变换<sup>[5]</sup>、伪维格纳分布<sup>[6]</sup>、平滑伪维格纳分布及其改进<sup>[7,8]</sup>等。但上述方法都存在明显的缺点:STFT 时频分辨率较低、伪维格纳分布受交叉项影响较大,无法给出准确的参数估计,而平滑伪维格纳分布在提高参数估计精度的同时,运算量太大,计算时间过长。因此,研究在保持时频分辨率的同时,如何提高时频分布的计算效率,成为跳频信号时频分析的一个重要研究方向。

本文分析了跳频信号模糊平面的分布特点,提出一种矩形核函数的时频分析方法,在保持信号自项的同时,大大抑制了交叉项对时频分析效果的影响,同时显著提高了算法的运算速度。仿真实验验证了理论的有效性和方法的可行性。

## 2 跳频信号的模糊函数

### 2.1 跳频信号的模型

先定义如下的跳频信号模型:

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

$T$  为观测时间,  $0 \leq t \leq T$ ;  $\text{rect}_{T_h}$  是宽度为  $T_h$  的矩形窗,  $T_h$  为跳频周期,  $f_k$  是跳频频率,  $\alpha T_h$  是初始跳变时刻,  $N$  为子脉冲个数。

### 2.2 模糊函数的推导

利用对称模糊函数的定义,可以写出模糊函数的表达式:

$$A(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{j2\pi \nu t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}(t + \frac{\tau}{2} - nT_h - \alpha T_h) e^{j2\pi f_n(t + \frac{\tau}{2} - nT_h - \alpha T_h)} \cdot$$

**作者简介:** 郭建涛(1973-),男,博士研究生,主要研究方向为通信信号处理和时频分析。

**收稿日期:** 2007-09-25 **修回日期:** 2007-12-12

$$\sum_{m=0}^{N-1} \text{rect}(t - \frac{\tau}{2} - mT_h - \alpha T_h) e^{j2\pi f_n(t - \frac{\tau}{2} - mT_h - \alpha T_h)} \cdot e^{j2\pi v t} dt \quad (2)$$

令  $t + \frac{\tau}{2} - nT_h - \alpha T_h = t'$ , 得

$$A_x(\tau, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}(t') e^{j2\pi f_n(t')} \sum_{m=0}^{N-1} \text{rect}(t' - \tau - mT_h + nT_h) \cdot e^{j2\pi f_n(t' - \tau - mT_h + nT_h)} e^{j2\pi v(t' - \frac{\tau}{2} + nT_h + \alpha T_h)} dt' = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{-j2\pi f_n(nT_h - mT_h - \tau)} e^{j2\pi v(nT_h + \alpha T_h - \frac{\tau}{2})} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t) \text{rect}(t - \tau - mT_h + nT_h) e^{j2\pi(v - f_n + f_m)t} dt = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi f_n(\tau - nT_h + mT_h)} e^{j2\pi v(nT_h + \alpha T_h - \frac{\tau}{2})} \cdot A_{\text{rect}}(\tau - nT_h + mT_h, v - f_m + f_n) \quad (3)$$

其中  $A_{\text{rect}}(\tau, v)$  是矩形子脉冲  $\text{rect}(\frac{t}{T_h}) = \begin{cases} 1 & |t| < \frac{T_h}{2} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$  的模糊函

数, 且  $A_{\text{rect}}(\tau, v) = \begin{cases} e^{j2\pi v T_h} \cdot \frac{\sin \pi v (T_h - |\tau|)}{\pi v} & |\tau| < T_h \\ 0 & |\tau| > T_h \end{cases}$ 。

### 2.3 模糊函数的特性

由式(3)可以看出, 随机跳频信号的模糊函数由  $A_{\text{rect}}(\tau, v)$  按照一定规律经过时移、频移后加权叠加而成, 形成平行于  $\tau$  轴的带状结构。在时延方向上模糊带的中心间隔相同, 为  $T_h$ , 频率方向上的间隔大小不同, 表现出不同的跳频差值。一典型的跳频信号模糊函数示于图 1。

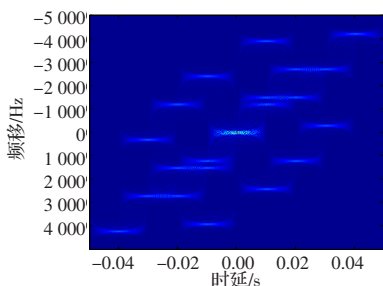


图 1 跳频信号的模糊函数图

当  $m=n$  时, 模糊平面中心由  $N$  个子脉冲的  $A_{\text{rect}}$ -函数叠加而成, 构成信号的自项部分, 即

$$A_{x,\text{auto}}(\tau, v) = \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi f_n \tau} e^{j2\pi v(mT_h + \alpha T_h - \frac{\tau}{2})} \cdot A_{\text{rect}}(\tau, v) \quad (4)$$

当  $m \neq n$  时, 模糊带沿原点对称分布, 构成模糊函数的交叉项部分。由于频率随机跳变, 模糊带在轴方向的位置分布也呈现随机性。这里, 考虑交叉模糊项在其时延中心位置的表现, 即  $\tau = (n-m)T_h = pT_h, p = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)$

由式(3)可得:

$$|A_x(pT_h, v)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi n T_h} \cdot A_{\text{rect}}(\tau - pT_h, v - f_{n-p} + f_n) \right| = \frac{\sin N\pi v T_h}{\sin \pi v T_h} \cdot \frac{\sin \pi(v - f_{n-1} + f_n) p T_h}{\pi(v - f_{n-1} + f_n)} \quad (5)$$

一般情况下, 信号频移与跳变周期的倒数成倍数关系, 因此, 式(5)在时延中心对应极大值。  $A_x(pT_h, v)$  的幅度图 (例如  $p=1$ ) 见图 2 所示; 此时极值分别对应相应模糊带的跳频频移, 与理论分析结果相吻合。求出最小频移, 作为模糊平面的一个特

征参数, 图 2 显示为 120 个抽样数。利用这一特性, 可以完成时频分析中核函数的设计, 即: 在保留自项的同时, 抑制尽可能多的交叉项模糊带。

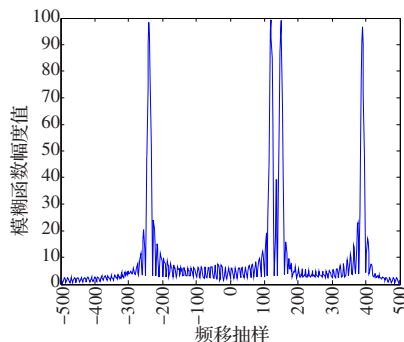


图 2 模糊幅度值随频移变化曲线( $p=1$ )

## 3 跳频信号的时频分析方法

### 3.1 算法设计

由于  $|m-n|=1$  时所对应的模糊带与信号自项最为接近, 所以在模糊域应用时频分析方法时, 考虑该时延位置的频移轴特性进行算法设计。具体步骤如下:

- (1) 基于谱图, 用最大值序列求取周期的方法粗略计算出跳周期的估计值  $\hat{T}_h$ 。
- (2) 计算跳频信号的模糊函数。
- (3) 在时延轴  $[-\frac{3}{2}\hat{T}_h, \frac{3}{2}\hat{T}_h]$  区间, 沿着频移方向求模糊函数的极大值位置, 得到最小频移  $\Delta f_{\text{min}}$ 。

(4) 利用  $\hat{T}_h$  和  $\Delta f_{\text{min}}$  两个参数, 定义矩形核函数 (具体方法参见下节), 进而得到抑制交叉项的时频分布。

(5) 利用文献[7]的参数估计方法, 求得跳频信号的基本参数。

### 3.2 核函数设计

解析信号  $x(t)$  的时频分布在模糊域统一表示为:

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_x(\tau, v) \Phi(\tau, v) e^{-j2\pi v t} e^{-j2\pi f \tau} d\tau dv \quad (6)$$

其中  $A_x(\tau, v)$  为信号的模糊函数,  $\Phi(\tau, v)$  为待求的核函数。根据 2.3 节对模糊函数的分析, 这里选取矩形函数作为核函数, 定义为:

$$\Phi(\tau, v) = \text{rect}\left(\frac{t - \beta \cdot \Delta f_{\text{min}}}{\hat{T}_h}\right) \quad (7)$$

其中矩形的宽度为子脉冲周期估计值, 高度由最小频移与参数  $\beta$  共同决定; 参数  $0 < \beta < 1$  可以调整模糊函数的高度, 从而在交叉项抑制和自项能量保持之间得到很好的折衷。一般地, 基于信号模糊函数各带状的相似性, 取  $\beta=0.5$  比较合适。

## 4 仿真实验结果

### 4.1 运算量比较

基于模糊域的时频分析需要的步骤主要包括谱图、模糊函数以及时频分布中的快速傅立叶变换实现, 所需要的运算量大约为  $O(N^3 \ln N)$ ; 但是计算信号时频分布时, 由于核函数的支撑区间远远小于信号数据长度, 所以, 实际计算量很小。而平滑伪维格纳分布在时频两个方向上平滑, 在抑制更多交叉项的同时, 运算量也大为增加, 大约为  $l_g l_t N + \frac{N^2}{2} \ln N$ , 即  $O(N^3 + N^2 \ln N)$ , 其中  $l_h$  和  $l_g$  分别是时间和频率方向上的窗函数宽度,  $N$  为信号

的采样点数(下同)。图3给出了两种算法运算量随时频窗宽度的变化情况。本文算法并没有进行窗口滑动操作,因此,运算量是一定的,而且比较小;特别是为了获取折衷的时频分辨率,窗口宽度不能太小(一般在 $\frac{N}{10} \sim \frac{N}{4}$ ),基于模糊域的算法优势更为明显。

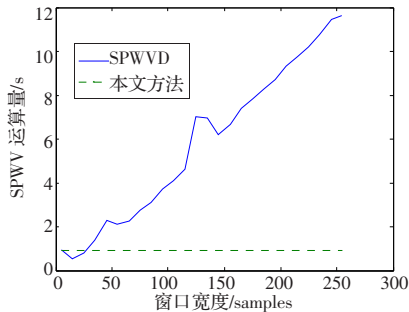


图3 运算量随窗口长度变化曲线

表1给出了在不同数据长度下,两种算法需要的运算量(时域窗口宽度为数据长度的1/4,频域窗口宽度为1/10)。可以看到,随着数据长度的增大,SPWVD的运算量显著增加,模糊域算法的相对优势越来越大。

表1 不同方法下的执行时间

	s			
	256	512	1 024	4 096
SPWVD	2.225 3	12.629 3	50.706 2	279.107 1
本文方法	0.631 324	1.042 558	5.072 399	38.885 970

## 4.2 性能分析

设定跳频信号的频率在0~5 kHz范围内随机跳变,采样频率10 kHz,跳速为200跳/s,取采样时间为10个跳频周期,无定时偏差。在信噪比-30~20 dB范围内,500次统计独立实验得到的跳频频率估计的平均方差曲线如图4所示。由曲线可以看出,两种算法具有相似的性能,其它跳频参数可以得到类似的结论;结合运算量的比较,可知基于模糊域矩形核函数的时频分析方法更适宜于实时时频分析要求。

## 5 结论

与传统的步进跳频信号相比,随机跳频序列的模糊函数分布具有随机性。在分析跳频信号模糊函数特性的基础上,提出

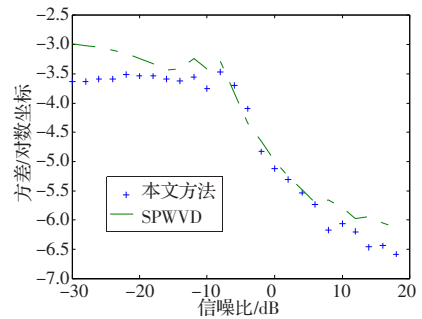


图4 跳频频率方差随信噪比变化曲线

矩形核函数设计信号时频平面的方法,与平滑伪维格纳分布相比,二者在性能上比较接近,而本文提出的方法具有很大的计算量优势,因此,更加简单而接近实用,同时不需要任何先验知识,具有很大的优越性。如何在提高运算速度的同时,获取更优的时频分布和参数估计性能,仍是今后研究的方向和重要任务。

## 参考文献:

- [1] Osadciw L A, Titlebrum E L. Synchronization improvements using traceability in spread spectrum signal design[J]. IEEE Trans on Aerospace Electronic Systems, 2001, 37(4): 1142-1154.
- [2] Torrieri D. Future army mobile multiple-access communications[C]// IEEE MILCOM 97 Proceedings, Monterey, CA, 1997, 2: 650-654.
- [3] Beaulieu N C, Hopkins W L, McLane P J. Interception of frequency-hopped spread-spectrum signals[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(5): 853-870.
- [4] Dillard R A, Dillard G M. Likelihood-ratio detection of frequency-hopped signals[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(2): 543-553.
- [5] 张飞鹏, 郭东敏. 短时傅立叶变换提取连续波多普勒体制对空无线电引信多普勒信号特征[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(1): 18-20.
- [6] Barbarossa S, Scaglione A. Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distribution[J]. Signal Processing Advance in Wireless Communications, 1997, 4(16/18): 213-216.
- [7] 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.
- [8] 张曦, 杜兴民, 朱礼亚. 基于重排的 SPWVD 的跳频信号参数提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 144-147.
- [9] ... sion detection technologies, CMU/SEI-99-TR-028[R]. 1999.
- [10] Bass T. Intrusion detection systems and multisensor data fusion[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(4): 99-105.
- [11] Berk V, Gray R, Bakos G. Using sensor networks and data fusion for early detection of active worms[C]// Proc of 2003 SPIE Aerosense Conference, Orlando, FL, April 2003.
- [12] Hall D L. Mathematical techniques in multisensor data fusion[M]. Norwood, MA: Artech House Inc, 1992.
- [13] Huang M Y, Wicks T M. A large-scale distributed intrusion detection framework based on attack strategy analysis[C]// Web Proceedings of the First International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection (RAID'98), 1998.
- [14] Jiang G, Cybenko G. Temporal and spatial distributed event correlation for network security[C]// 2004 American Control Conference, Boston, June 30-July 3, 2004.
- [15] Kohlas J, Monney P. Theory of evidence—a survey of its mathematical foundations, applications and computational analysis[J]. Mathematical Methods of Operations Research (ZOR), 1994, 39: 35-68.

(上接 114 页)

表2 未进行数据融合过程的检测结果统计表

Setting	NOA	NA	NTAD	DR/%	NRA	FPR/%
DMZ	62	464	36	58.06	67	85.56
Inside	41	523	27	65.85	47	91.01

## 5 结论

本文将数据融合理论引入到入侵检测过程,提出基于D-S证据理论的入侵检测系统模型,并在系统模型的实现过程中应用了多Agent技术,使整个模型具有良好的扩展性。在聚类、合并、关联的数据融合过程中本文采用了D-S证据理论,在一定程度上解决当前入侵检测系统中存在的告警洪流、误报率高、告警之间的关联性差等问题,提高了分布式入侵检测系统的检测性能。

## 参考文献:

- [1] Allen J, Christie A, Fithen W, et al. State of the practice of intru-