

文章编号: 1672-2892(2011)01-0074-04

## 跳频信号的跳周期估计

严超会, 汤建龙

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对通信对抗的实际应用, 提出了一种精确估计跳频信号跳周期的新方法。首先对跳频信号进行短时傅里叶变换(STFT), 根据 STFT 的结果得到其峰值序列, 然后对峰值序列进行单比特采样, 从最终的单比特采样序列可以获得跳频信号跳周期的估计。此算法简单, 易于实现且计算量小, 在信噪比大于-1 dB 时, 仿真结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** 跳频信号; 跳频周期; 短时傅里叶变换; 单比特采样

**中图分类号:** TN971.1<sup>+</sup>; TN975

**文献标识码:** A

## Hop duration estimation for frequency-hopping signals

YAN Chao-hui, TANG Jian-long

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Aiming at the actual application of communication countermeasure, a new method about accurately estimating the hop duration was proposed for the Frequency-Hopping(FH) signals. It applied Short Time Fourier Transform(STFT) to process FH at first, then obtained the peak sequence from the results of STFT, and sampled the peak sequence in single-bit way, so the hop duration estimation could be obtained from the final single-bit sample sequence. The algorithm was simulated and its results and performance were analyzed. It is showed that the algorithm is efficient when SNR is greater than -1 dB. The method is simple, effective and easy to be implemented.

**Key words:** frequency-hopping signal; hop duration; Short Time Fourier Transform(STFT); single bit sampling

跳频通信具有较强的抗多径、抗衰落、抗干扰和抗检测性能及截获概率低等诸多优点, 在军事和民用通信方面得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 但这也使得电子对抗和通信侦察面临严峻挑战。如何提取截获到的跳频信号的特征参数, 是获得有用信息和进行干扰的关键。跳周期是其中一个很重要的参数, 为了实现对跳频信号的截获和定时序列的重构, 都需要对它进行精确估计<sup>[3]</sup>。时频分析是一种有效的信号处理工具, 被广泛用于跳频信号的跳周期估计中, 如采用Cohen类时频分布对跳频信号进行参数估计<sup>[4-6]</sup>。但对于多频率分量信号, Cohen类时频分布如魏格纳威尔分布(Wigner-ville Distribution, WVD)会产生交叉项问题, 即使采用平滑伪魏格纳威尔分布(Smoothed Pseudo WVD, SPWVD)或者SPW<sup>[6]</sup>, 也必然带来运算量的问题, 使得实际应用受限。短时傅里叶变换(STFT)是一种线性变换, 且可采用FFT算法, 计算量可大大降低, 但STFT的时频分辨率是其无法回避的问题。文献[5-6]中对跳周期估计的算法, 如果用STFT代替SPWVD或SPW, 性能受噪声影响将加剧, 下降较大。文献[3]提出的跳频信号的跳周期的算法, 可以在较低信噪比下获得较为准确的跳周期估计值, 但其算法步骤较为复杂, 计算量大。本文提出用STFT对跳频信号进行分析, 提取其峰值序列, 再对峰值序列进行单比特采样, 求出跳时刻的估计, 利用跳时刻差分的均值来估计跳周期。

### 1 算法描述

#### 1.1 跳频信号的模型

跳频信号是典型的非平稳信号, 其载波频率按照某一规律随机地跳变, 所用载波频率的集合称为跳频信号的

频率集，最大载波频率与最小载波频率的差称为跳频信号的带宽，载波频率随时间的变化规律称为跳频信号的跳频图案。跳频信号的模型定义如下：

$$s(t) = A \sum_{k=1}^{N_H} \text{rect}_T(t - kT_D - \theta) \cos[2\pi f_k(t - kT_D - \theta) + \varphi] + n(t) \quad (1)$$

式中： $0 \leq t \leq T$ ， $T$ 为信号观测时间； $A$ 为幅度； $N_H$ 为跳频信号的载波频率个数； $\text{rect}_T$ 是宽度为 $T_D$ 的矩形窗函数， $T_D$ 为跳频信号的跳周期； $f_k$ 为跳频信号的第 $k$ 个跳变频率； $\theta$ 为定时偏差； $\varphi$ 为载波的初始相位； $n(t)$ 为零均值加性高斯白噪声。

现假设所分析的跳频信号为夹杂着加性高斯白噪声的跳频信号，其中加性高斯白噪声由AWGN()函数产生<sup>[7]</sup>，在式(1)中取 $A = \sqrt{2}$ ，初始相位 $\varphi = 0$ ，跳周期 $T_D = 2.5 \mu\text{s}$ ，观察时间 $T$ 为8个跳周期，即 $T = 20 \mu\text{s}$ ，对信号的采样点数为 $L = 4000$ ，如图1所示( $R_{SN} = 10 \text{ dB}$ )。其中，定时偏差 $\theta = 1 \mu\text{s}$ ，跳频率 $f_k$ 依次为10 MHz, 30 MHz, 45 MHz, 40 MHz, 25 MHz, 35 MHz, 20 MHz, 50 MHz, 15 MHz，采样频率 $f_s = 200 \text{ MHz}$ 。

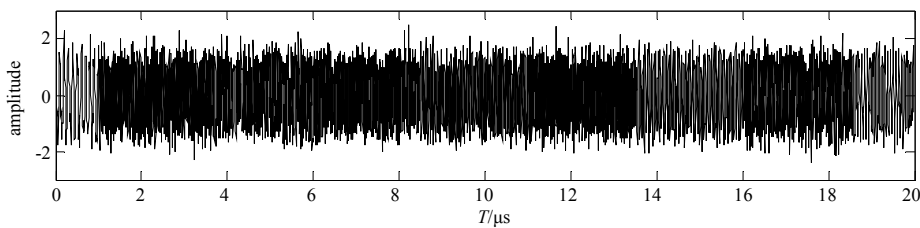


Fig.1 Time-domain graph of the observed signal  
图1 观测信号的时域图

## 1.2 短时傅里叶变换

连续STFT的定义如下<sup>[8]</sup>：设 $s(t)$ 是连续非平稳信号，则 $s(t)$ 的连续STFT定义为：

$$STFT_s(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(\tau - t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (2)$$

式中： $h(t)$ 称为时域窗函数； $\omega$ 为角频率。由于在实际的信号处理中，信号往往是离散时间信号，所以要将连续STFT进行离散化，以便于进行数字信号处理。

离散短时傅里叶变换(Discrete STFT, DSTFT)定义如下：对离散时间信号 $s(n)$ 和窗函数 $h(n)$ ， $s(n)$ 的DSTFT为：

$$STFT_s(n, k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s(m) h(m - n) W_N^{mk} \quad (3)$$

式中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ ， $N$ 为作离散傅里叶变换的点数。

时频变换的峰值序列(或称为最大值序列)定义为：信号时频变换的模值在每个时刻的最大值组成的序列。本文的峰值序列提取方法为：计算信号 $s(n)$ (长度为 $L$ )的DSTFT，得到 $STFT_s(n, k)$ ，计算 $STFT_s(n, k)$ 的模值 $|STFT_s(n, k)|$ 在每个时刻 $n$ 的最大值，得到峰值序列，记为： $\text{peak\_seq}(n)$ ( $n = 0, 1, \dots, L-1$ ， $L$ 为峰值序列的长度)。

传统的峰值序列处理的方法是作FFT，FFT方法利用的是峰值序列的周期性，即对峰值序列作FFT，便可以求出跳速率，FFT方法较为简单、直观，但为了获得高精度的跳速估计，需采用长序列进行FFT。当信号持续时间有限时，需采用插值或补零的方法。事实上，峰值序列周期性的实质是由于跳频信号的驻留时间相同，即峰值序列相邻2个波谷之间的距离相同(注：由于存在定时偏差并且其值一般不为完整的跳周期，因此第一跳和最后一跳应除外)，此外，峰值序列的波瓣之间的波谷处为信号的时频分界，因此，其在时间轴上的投影可作为跳时刻的估计值。跳频信号峰值序列是利用STFT获得的，而STFT对信号具有信噪比增强效果，在高信噪比下直接对跳时刻求差分后取均值可得到跳周期的估计。但波谷处对应的时刻不容易直接提取，为了很容易地提取出波谷对应时刻，本文提出了先对峰值序列进行单比特采样，然后再提取波谷处对应时刻的方法。这样相对于FFT方法计算量要小得多，仿真结果表明，本文的算法可获得一定精度的跳周期估计值。

对峰值序列进行单比特采样：

$$y(n) = \begin{cases} 1 & \text{peak\_seq}(n) \leq I_{\text{gate}} \\ 0 & \text{peak\_seq}(n) > I_{\text{gate}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $I_{\text{gate}}$ 为单比特采样使用的门限，门限选择不当，将会导致对跳频信号跳周期的错误估计。门限选取的原则为：取门限 $I_{\text{gate}} = \alpha I$ ，其中 $I$ 为峰值序列 $\text{peak\_seq}(n)$ 的均值， $\alpha$ 为门限系数(一般可取 $\alpha$ 为0.7~0.95)，可根据经验进行设置，本文中取 $\alpha = 0.79$ ，易知单比特采样后峰值序列将变为一串方波(注：由于存在定时偏差，第一个方波和最后一个方波不完整)。图2中给出了图1所示跳频信号STFT后得到的跳频图案(为了抑制旁瓣，时域窗函数选用了Hamming

窗, 时长350个样本)、峰值序列以及峰值序列单比特采样后的结果。

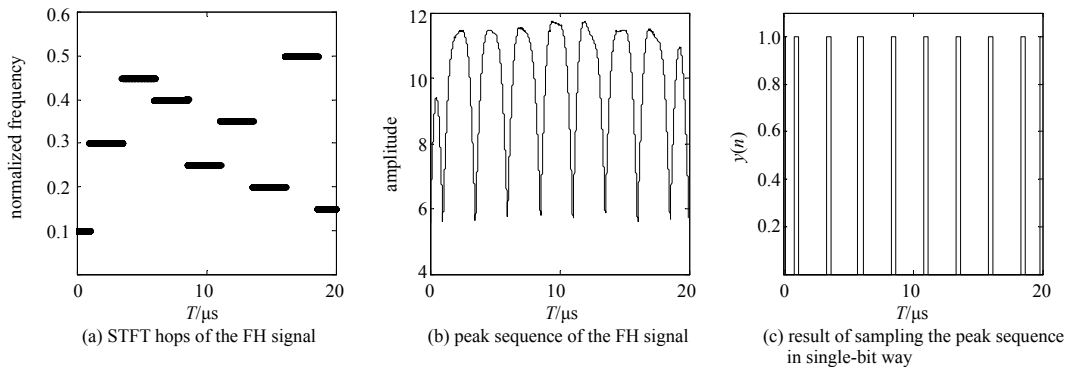


Fig.2 FH hops and peak sequence of the FH signal, and the result of sampling the peak sequence in single-bit way  
图2 信号的跳频图案、峰值序列及其单比特采样后的结果

图2(a)是对图1所示跳频信号进行STFT后得到的跳频图像, 从图中可以看到, 第一跳和最后一跳的信号不完整(由于存在定时偏差 $\theta=1\ \mu\text{s}$ , 但这对于接收方来说是未知的)。图2(b)是图1所示跳频信号的峰值序列, 结合图2(a)可以看出, 峰值序列的波谷处可作为跳变时刻的估计, 除第一个和最后一个波瓣外, 相邻2个波谷之间的距离相同, 即为跳周期。图2(c)是对图2(b)单比特采样后的结果, 每个完整方波的中心在时间轴上的投影值可作为跳变时刻的估计, 对其差分后取均值便可以得到跳周期的估计。由图2(c)得到的跳周期的估计值为 $2.5057\ \mu\text{s}$ , 与实际值 $2.5\ \mu\text{s}$ 十分接近, 相对误差为0.228%。此外, 要注意的是, 当信噪比较低时, 对峰值序列单比特采样后可能会丢失第一个和最后一个跳时刻的信息, 但这并不影响对跳周期的估计, 因为对中间各个跳时刻差分后取均值同样可以得到跳周期的估计。

### 1.3 跳频信号跳周期估计的步骤

对观测得到的长为 $L$ 的离散序列 $s(n), n=0, 1, \dots, L-1$ , 用STFT对跳频信号跳周期进行估计的具体步骤如下:

- 1) 计算信号的DSTFT:  $STFT_s(n, k)$ , 并提取其峰值序列 $\text{peak\_seq}(n)$ ;
- 2) 计算门限 $I_{\text{gate}}=aI$ , 并以 $I_{\text{gate}}$ 对 $\text{peak\_seq}(n)$ 进行单比特采样得到 $y(n)$ ;
- 3) 估计跳时刻 $T_H$ :  $T_H(i)=t_{\text{center}}/f_s$ , 其中 $t_{\text{center}}$ 为 $y(n)$ 中完整方波的中心时刻,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为跳时刻的个数, 其值等于 $y(n)$ 中完整方波的个数;

- 4) 估计跳周期 $T_D$ :  $T_D$ 等于跳时刻差分后的均值, 根据步骤3)可得 $T_D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \{T_H(i+1) - T_H(i)\}$ , 跳速率为跳周期的倒数。

## 2 算法仿真及性能分析

图3中给出了存在加性高斯白噪声的情况下, 对上一章节所描述的跳频信号在不同信噪比下分别进行1000次试验得到的跳周期估计的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)曲线。从图中可以看出, 跳周期估计的均方根误差曲线随信噪比的增大而下降, 当信噪比大于 $-1\ \text{dB}$ 时, 能获得较高精度的跳周期估计。

表1 计算量比较

Table1 Comparison of the amount of calculation		
classification	times of multiplication	times of addition
the method of this paper	$T_N+2$	$L+T_N-2$
the FFT method	$(L/2)\log_2 L$	$L\log_2 L$

表1给出了本文算法和FFT方法对跳周期估计的计算量(假设已经求得峰值序列), 其中,  $T_N$ 为跳时刻的个数,  $L$ 为观察信号的长度, 一般有 $T_N \ll L$ 。从表1中可

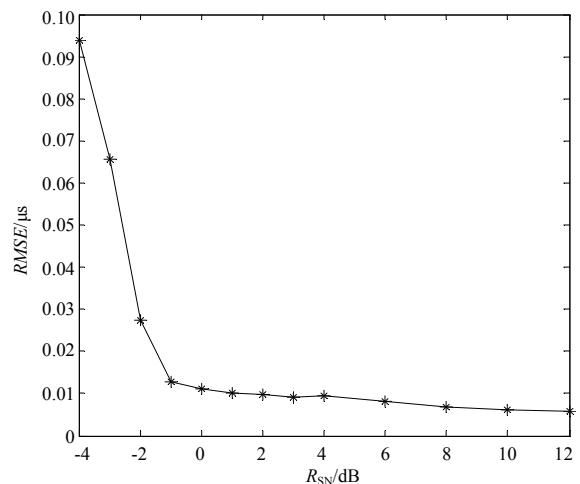


Fig.3 RMSE curve of the estimate for the hop duration  
图3 跳周期估计的均方根误差曲线

以清楚地看到,本文算法的乘法次数与 $L$ 无关,当 $T_N$ 一定时,其值为小的常数,加法次数是 $L$ 的一次函数,与FFT方法相比,计算量要小得多。

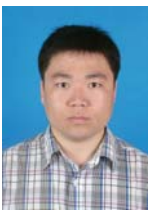
### 3 结论

本文给出了基于STFT估计跳频信号跳周期的一种简单有效、易于实现的方法,可以在信噪比大于 $-1$  dB时提取较为准确的跳周期估计值,计算量比传统的FFT要小得多。

#### 参考文献:

- [1] 汪泽焱,钱祖平. 短波跳频通信系统抗干扰性能的综合评价[J]. 系统工程与电子技术, 2002,24(10):21-24. (WANG Zeyan,QIAN Zuping. A synthetic evaluation for antijamming ability of the short-wave hopping communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24(10):21-24.)
- [2] 张伟,唐斌,张健. 超宽带快速跳频信号侦察技术[J]. 电讯技术, 2008,48(4):19-22. (ZHANG Wei,TANG Bin,ZHANG Jian. Ultra Wideband High-speed Frequency Hopping Signal Reconnaissance Technique[J]. Telecommunication Engineering, 2008,48(4):19-22.)
- [3] 郑文秀,赵国庆,罗勇江. 跳频信号的调速估计[J]. 系统工程与电子技术, 2006,28(10):1500-1501. (ZHENG Wenxiu,ZHAO Guoqing,LUO Yongjiang. Hop rate estimation for frequency hopping signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006,28(10):1500-1501.)
- [4] Barbarossa S. Parameter estimation of spread spectrum frequency hopping signals using time-frequency distributions[C]// Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. 1997:213-216.
- [5] 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.)
- [6] 郭艺,张尔扬,沈荣骏. 跳频信号时-频域分析与参数盲估计方法[J]. 信号处理, 2007,23(2):210-213. (GUO Yi,ZHANG Eryang,SHEN Rongjun. The Time-frequency Analysis and Blind Parameter Estimation of Frequency Hopping Signals[J]. Signal Processing, 2007,23(2):210-213.)
- [7] 张伟,张健,周劼. 基于过采样的 DS-SS/BPSK 信号延迟相乘多重相关检测[J]. 信息与电子工程, 2006,4(5):351-355. (ZHANG Wei,ZHANG Jian,ZHOU Jie. DS-SS/BPSK Signal Detection With Delay Multiplication Multi-correlation Based on Over-sampling[J]. Information and Electronic Engineering, 2006,4(5):351-355.)
- [8] 唐向宏,李齐良. 时频分析与小波变换[M]. 北京:科学出版社, 2008. (TANG Xianghong,LI Qiliang. Time-Frequency Analysis and Wavelet Transform[M]. Beijing:Science Press, 2008.)

#### 作者简介:



严超会(1984-),男,西安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电子对抗技术、信号处理与仿真.email:yanchaohui0724@163.com.

汤建龙(1978-),男,江西省吉安市人,博士,副教授,主要研究方向为信息对抗和多维信号处理.