

递归时频重排算法在跳频信号参数估计中的应用^①

蔡丽霞

(河南工业职业技术学院, 南阳 473000)

摘要: 为了有效分析跳频信号并估计其参数, 引入一种短时傅里叶变换的快速算法, 为改善其时频聚集性, 将该算法推广到重排域. 该算法降低了参数估计的算法复杂度. 最后, 在跳频系统中对该算法的性能进行了仿真与分析.

关键词: 跳频; 傅里叶变换; 短时傅里叶变换; 时频重排

Application of Recursive Time-Frequency Reassignment Method to Frequency Hopping Signals Analysis

CAI Li-Xia

(Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: To make an analysis and estimate the parameters of frequency-hopping signal, a fast algorithm to realize short time fourier transform is introduced. In order to improve the time-frequency concentration, the proposed algorithm is extended with the method known as time-frequency reassignment. The algorithm reduces complexity of parameter estimation. Finally, the algorithm performance is simulated and analyzed.

Key words: frequency hopping; fourier transform; short time fourier transform; time-frequency reassignment

1 引言

对跳频信号的分析是电子战中侦察、识别、监视和释放干扰信号的基础. 跳频信号是一种典型的多分量非平稳信号, 其频域特征随时间不断的变化, 对于这种多分量的非平稳信号进行分析时, 需要借助于时频信号处理的方法来提取其特征参数. 目前常用的时频分析算法包括 Winge-Vill 分布(WVD)、伪 Winge-Vill 分布(PWVD)、平滑伪 Winge-Vill 分布(SPWVD)、小波变换等. WVD 是一种双线性变换, 分析多分量的跳频信号会产生大量的交叉项干扰. SPWVD 是通过在时域和频域加窗去除交叉项干扰, 但同时降低了时频分辨率. 文献[1,2]提出采用 SPWVD 的方法来实现跳频信号参数的盲估计, 但是 SPWVD 时频分辨率较低. 文献[3]将小波变换应用到跳频参数盲估计中, 但小波对噪声敏感, 因此限制了其应用范围. SPWVD 是以时频分辨率为代价降低了交叉项的干扰, 因此, 文献[4]提出一种时频重排算法, 以改善其时频分辨率. 文献[5,6]将重排 SPWVD 应用到跳频信

号参数盲估计算法研究中, 有效改善了时频分辨率, 但计算量巨大, 不满足实时性的要求. 文献[7]提出一种基于极点滑动窗的递归算法实现 STFT(短时傅里叶变换), 文献[8]在分析递归算法的基础上, 提出一种新的改进算法, 并将其推广到时频重排领域, 提出一种新的递归时频重排算法, 该算法降低了时频重排算法复杂度. 本文在分析跳频信号的数学模型的基础上将文献[8]中的迭代时频重排算法应用到跳频信号分析中, 解决了跳频信号参数估计困难的问题. 在不同的信噪比下通过对跳频信号用递归时频重排算法进行参数估计, 给出了跳频周期、跳变时间和跳频频率估计的均方误差曲线, 并与文献[6]中重排 SPWVD 算法和文献[9]提出的基于 FFT 的重排 STFT 算法做比较, 仿真结果表明, 采用该算法得到了准确的信号时频特征, 且大大降低了计算复杂度.

2 跳频信号的数学模型

跳频信号^[10]是频率随跳频序列变化的信号, 信号

^① 收稿时间:2013-06-19;收到修改稿时间:2013-07-29

模型如公式(1)所示:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}_{T_H}(t - kT_H) \times e^{j2\pi f_k(t - kT_H - \alpha T_H) + jq} + n(t) \quad 0 < t \leq T \quad (1)$$

T 为观测时间, rect_{T_H} 是宽度为 T_H 的矩形窗, T_H 为跳周期, f_k 为跳频频率, αT_H 为跳变时刻, $n(t)$ 为高斯白噪声. 参数集合 $\{T_H, f_k, \alpha\}$ 完整表征了跳频信号的所有时频特征. 由此分析知, 对跳频系统的参数估计, 关键也就是对参数集合 $\{T_H, f_k, \alpha\}$ 的估计.

为便于本文分析, 设定跳频信号的参数为:

采样速率 $f_s = 4\text{MHz}$, 跳频频率 f_k 为 $\{1.1, 1.3, 1.6, 1.0, 1.7, 1.5, 1.2, 1.4, 1.1\}\text{MHz}$, 跳频周期 $T_H = 0.032\text{ms}$, 跳变时刻 $\alpha T_H = 0.5T_H$. 在参数估计之前, 我方实际上并不知道跳变时刻, 所以不能保证采样的起始点和频率跳变点一致, 即不能保证在所有采样点内包含完整的第一跳和最后一跳的信息, 得到的跳频信号的跳频图案如图 1 所示.

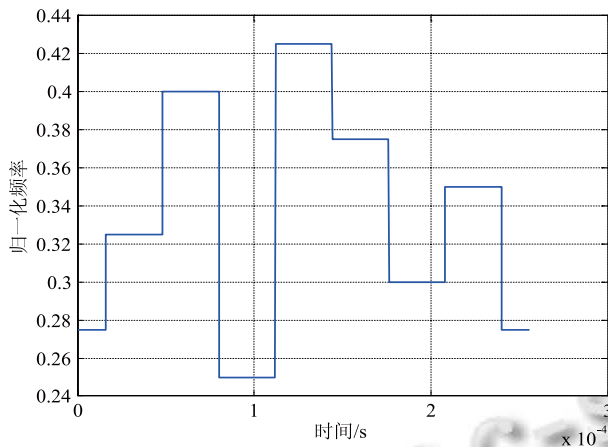


图 1 跳频信号的跳频图案

3 基于递归算法的短时傅里叶变换和参数估计算法

3.1 基于递归算法的短时傅里叶变换

文献[8]定义信号的 STFT 为信号 $s(t)$ 和冲击响应 $h_k(t, w)$ 间的一系列线性卷积:

$$\text{STFT}_k(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h_k(t - \tau, w) d\tau \quad (2)$$

其中,

$$h_k(t, w) = W_k(t) e^{jw t} \quad (3)$$

$W_k(t)$ 为窗函数, 定义为:

$$W_k(t) = \frac{\sigma^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\sigma t} u(t) \quad (4)$$

$u(t)$ 为阶跃函数, k 为冲击响应 $h_k(t, w)$ 的极点数, $k \geq 2$.

经过一系列离散化处理:

$$\text{STFT}_k(nT, 2\pi f\Omega) \approx \sum_{j=0}^{k-1} b_j x(nT - jT) - \sum_{j=1}^k a_j \text{STFT}_k(nT - jT, 2\pi f\Omega) \quad (5)$$

T 和 Ω 分别为离散化时间间隔和频率间隔, $n=0, 1, L, N-1, f=0, 1, L, F-1$. a_j 和 b_j 为滤波器因子, 其与阶数因子 k 相对应, 阶数 k 的增加意味着滤波器因子 a_j 和 b_j 的增加, 因此参数 k 要在计算量和时频分辨率间取一个折中的值, k 一般取值为: 2~5.

3.2 递归时频重排算法

在分析递归算法实现 STFT^[11]的基础上, 将其推广到时频重排的实现上, 实现一种基于递归时频重排的快速算法.

$$\text{RSTFT}_k(t, w) = \iint |\text{STFT}_k(t', w')|^2 \delta \left[\hat{t} - t(t, w) \right] \times \delta \left[\hat{f} - f(t, w) \right] dt' df' \quad (6)$$

时间重排坐标:

$$\hat{t}(t, w) = t - \text{Im} \left[\frac{\frac{\partial}{\partial w} \text{STFT}_k(t, w)}{\text{STFT}_k(t, w)} \right] \quad (7)$$

频率重排坐标:

$$\hat{w}(t, w) = \text{Im} \left[\frac{\frac{\partial}{\partial t} \text{STFT}_k(t, w)}{\text{STFT}_k(t, w)} \right] \quad (8)$$

在以上理论上, 对 2 中的跳频信号进行迭代时频重排分析, 如图 2 所示.

3.3 递归时频重排的跳频信号参数估计算法

采用递归时频重排分析跳频信号参数估计的具体算法步骤如下.

A. 计算接收到的跳频信号 $x(n)$ 的解析信号 $z(n) = x(n) + jH[x(n)]$, 其中 $H[x(t)]$ 是 $x(n)$ 的 Hilbert 变换,

对变换后的信号 $z(n)$ 进行递归时频重排, 得到 $RSTFT_k(n, f)$, 计算在每一时刻 n 的最大值, 得到矢量 $y(n)$, 如图 3 所示, 可以看出 $y(n)$ 呈明显的周期性, 对其做 FFT 变换, 取变换后的幅值最大的信号频率即为跳频速率, 如图 4 所示. 仿真过程中, 取阶数 $k=4$, 信噪比 $SNR=5dB$.

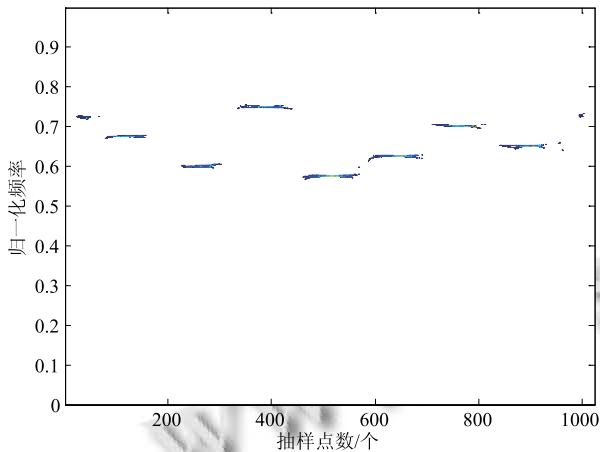


图 2 跳频信号的递归重排谱图(SNR=5dB, k=4)

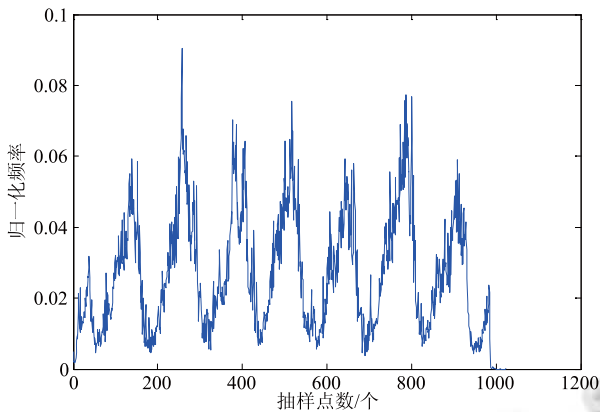


图 3 迭代时频重排在每一时刻的最大值 $y(n)$

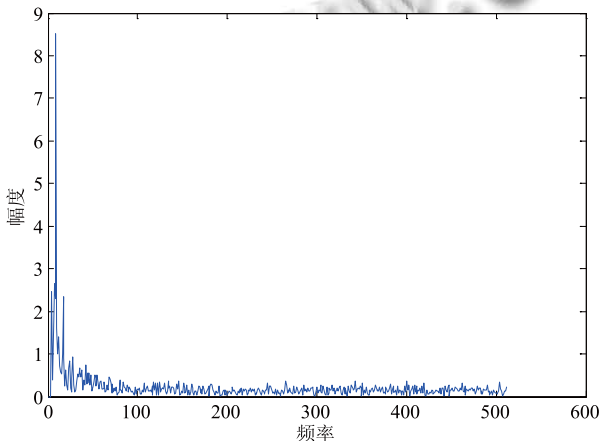


图 4 峰值的 FFT 变换

B. 求出 $y(n)$ 在 $n \in [N_H + 1, N - N_H]$ 范围内出现峰值的位置(时刻), 得到 $p(m)$, $m = 1, 2, \dots, P$, P 为峰值的个数.

C. 估计跳变时刻先求出第一个峰值出现的平均位置如公式(9)所示.

$$\hat{p}_a = \left[\sum_{m=1}^P p(m) - \frac{(P-1) \times P \times \hat{N}_H}{2} \right] / P \quad (9)$$

则第一个离散跳变时刻可由公式(10)给出

$$\hat{n}_a = \begin{cases} \hat{p}_a - 3\hat{N}_H/2, & 3\hat{N}_H/2 \leq \hat{p}_a < 2\hat{N}_H \\ \hat{p}_a - \hat{N}_H/2, & \hat{N}_H/2 \leq \hat{p}_a < 3\hat{N}_H/2 \end{cases} \quad (10)$$

D. 估计跳变频率利用估计得到的 \hat{N}_H , 求出观测间隔 N 包含的跳跃(hop)个数 $N_s = \lfloor N - \hat{n}_a / \hat{N}_H \rfloor$, $\lfloor x \rfloor$ 代表 x 的整数部分.

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_{n=\hat{n}_a + lN_H}^{\hat{n}_a + (l+1)N_H} W_z^{SP}(n, f) \right\} \times f_s / 2N$$

$$l = 0, 1, \dots, (N - 1) \quad (11)$$

由图 3 可以看出, 由于时频重排对数据进行了能量重排, 使每个跳周期内的峰值在时间轴上出现很大的跳跃性, 这将对跳变时刻和跳变频率的估计造成很大的误差, 在估计出跳频周期的情况下, 采用图像处理的滤波法对其进行平滑滤波处理, 平滑后 $y(n)$ 的如图 5 所示.

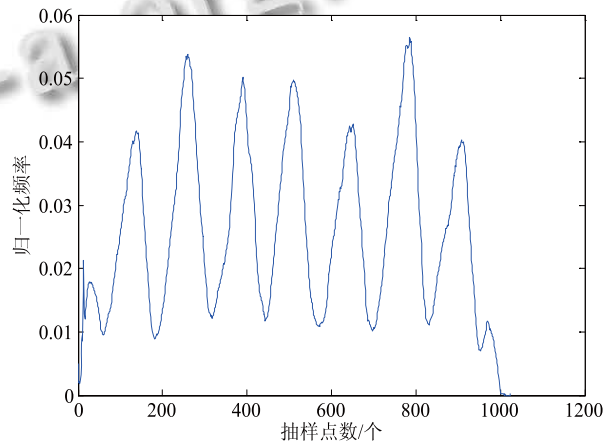


图 5 平滑滤波处理后的最大值

4 性能仿真与算法复杂度分析

4.1 跳频信号参数估计性能仿真与分析

考虑到高斯白噪声对跳频信号参数估计的影响,

在信噪比-4~6dB 条件下,图(6-8)分别为重复算法 200 次得到的跳频周期、跳变时刻和跳频频率估计的均方差误差曲线,通过与文献[8]提出的基于 FFT 的重排 STFT 算法(Hanning 窗长 127)和文献[6]中的重排 SPWVD 算法进行比较.由仿真结果明显看出,本文提出的算法对于跳频周期的估计在信噪比-1~2dB 时,均方差优于其他两种算法.图 7 可知跳变时刻的估计,在信噪比(-4~5dB)区间内均优于另外两种算法.图 8 可知递归重排算法在信噪比大于 0dB 时能正确估计出跳频频率,在大于 1dB 时准确度略差于重排 SPWVD 算法,即:递归时频重排算法在大于 1dB 时时频分辨率略低于重排 SPWVD.一般而言,跳频信号应用场景中信噪比较低,因此本文中的算法在信噪比不大于 1dB 时依然有效.

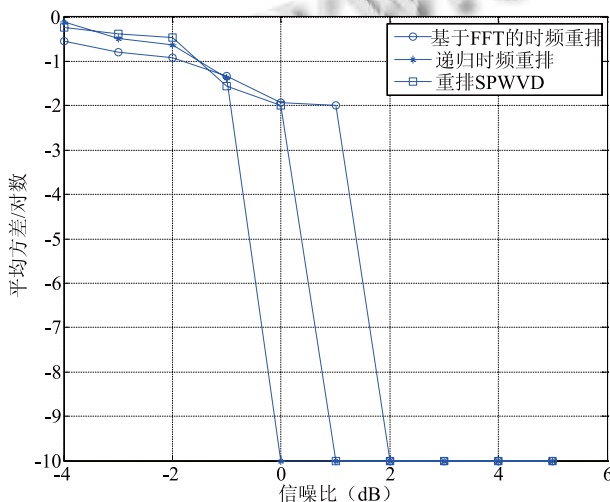


图 6 跳频周期估计

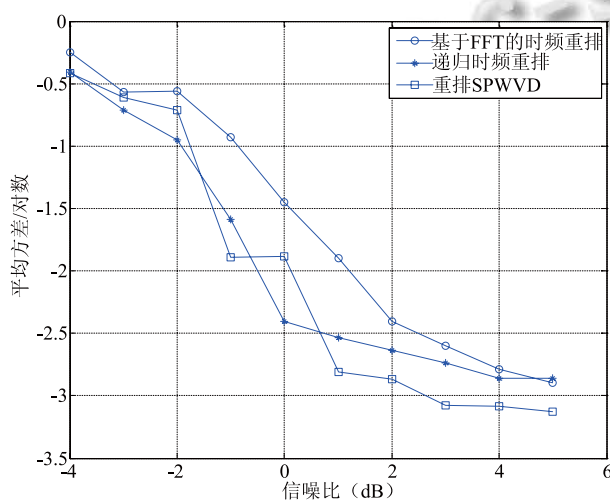


图 7 跳变时刻估计

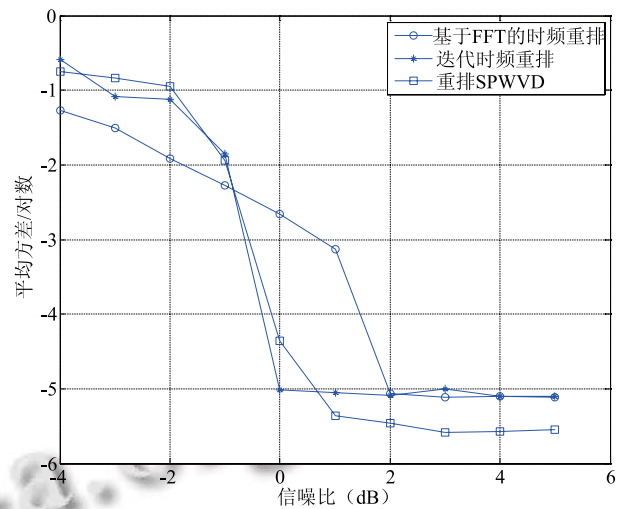


图 8 跳频频率估计

4.2 算法复杂度分析

在递归 STFT 的算法中,滤波器因子数目随着阶数 k 的线性增长,假定分析信号长度为 N ,频率集为 F ,则递归 STFT 的算法复杂度为 $O(kFN)$, k 一般取 2~5.基于 FFT 的 STFT 算法复杂度为 $O(NF \log F)$.

在同样的仿真环境下,迭代时频重排占用 CPU 的平均时间为 2.2932s,基于 FFT 的时频重排占用 CPU 的平均时间为 4.5396s,重排 SPWVD 的占用 CPU 的平均时间为 7.6908s.由以上分析知,迭代时频重排大大降低了算法复杂度,有利于实时信号处理.

5 结论

本文采用递归重排算法实现跳频信号参数估计,该算法在信噪比大于 0dB 条件下能正确估计出跳频参数,且降低了算法复杂度.在信噪比低于-1dB 条件下仍然不能正确估计出跳频参数,因此,在以后的研究工作中需要研究在低信噪比条件下的参数估计问题.

参考文献

- 1 刘放,叶菲.跳频信号 SPWVD 参数估计方法.电脑与信息技术,2007,15(6):28-30.
- 2 Chen TC. Joint signal parameter estimation of frequency-hopping communications. IET Communications, 2012, 6(4): 381-389.
- 3 张曦,王星,杜兴民.基于小波变换的跳频信号参数盲估计.

(下转第 123 页)



(c) NLM 算法 (d) 本文算法

图 6 去噪效果对比($h=20$)

表 2 峰值信噪比(PSNR)对比

模型	噪声图像	NLM 算法	本文算法
PSNR(dB)	22.08	28.59	28.66

5 结语

利用二阶微分改进 NLM 算法中的权重, 本文提出了一个新的非局部均值算法. 实验表明, 相对于传统的 NLM 算法, 本文算法不仅能有效去除图像噪声, 而且能更好地保持图像的细节、纹理、弱边缘等重要特征.

参考文献

1 Buades A, Coll B, Morel JM. A non-local algorithm for image

denoising. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, 2(2): 60–65.

2 Yaroslavsky L. *Digital Picture Processing- An Introduction*. Springer Verlag, Berlin, 1985.

3 Lou Y, Zhang X, Osher S, Bertozzi A. Image recovery via nonlocal operators. *Journal of Scientific Computing*, 2010, 42(2): 185–197.

4 Ji Z, Chen Q, Sun Q, Xia D. A moment-based nonlocal- means algorithm for image denoising. *Information Processing Letters*, 2009, 109(23-24): 1238–1244.

5 Gilboa G, Osher S. Nonlocal linear image regularization and supervised segmentation. *Multiscale Modeling and Simulation*, 2007, 6(2): 595–630.

6 Wang S, Xia Y, Liu Q, Luo J, Zhu Y, Feng DD. Gabor feature based nonlocal means filter for textured image denoising. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23(7): 1008–1018.

7 Carmona RA, Zhong S. Adaptive smoothing respecting feature directions. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1998, 7(3): 353–358.

8 喻罡, 张红梅, 卞正中, 郭佑民. 一种改进的一致性扩散图像增强方法. *电子与信息学报*, 2005, 27(9): 1408–1411.

(上接第 157 页)

电路与系统学报, 2009, 14(4): 60–65.

4 Liang ZJ, Lv M. 2012 International Conference on A Joint Rapid Parameter Estimate Method of Frequency-Hopping Signal. *Control Engineering and Communication Technology. ICCECT-2012*. 952–954.

5 Lei YK, Wu YH. A New Hop Rate Estimation Method for High-Speed Frequency-Hopping Signals. *ICCS 2008*. 1330–1333.

6 雷迎科, 钟子发, 吴彦华. 基于 RSPWVD 高速跳频信号跳周期估计算法. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(5): 803–805.

7 Richard C, Lengell Ré. Joint recursive implementation of time-

frequency representations and their modified version by the reassignment method. *Signal Process*, 1997, 60(2): 163–179.

8 Nilsen GK. Recursive Time-Frequency Reassignment. *IEEE Trans. Signal Processing*, Aug. 2009, 57(8): 3283–3287.

9 刘本永. 非平稳信号分析导论. 北京: 国防工业出版社, 2006.

10 郭建涛, 王林. 基于熵测度的跳频信号谱图分析. *计算机应用*, 2013, 33(5): 1230–1232, 1236.

11 李秀梅, 吕真, 姬宇佳. 基于时频分析方法 LPFT 的语音处理 GUI 系统. *计算机系统应用*, 2013, 22(2): 48–52.

12 余松煜. *数字图像处理*. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.