

## 基于形态学滤波和时频谱图对消的多跳频信号参数估计\*

刘佳敏<sup>1</sup>, 赵知劲<sup>1,2</sup>, 叶学义<sup>1</sup>, 王李军<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国电子科技集团第36研究所 通信系统信息控制技术国家级重点实验室, 浙江 嘉兴 314001)

**摘要:** 针对复杂电磁环境下多跳频信号的参数估计问题, 提出一种基于多尺度形态学滤波和时频谱图对消的信号参数盲估计算法。首先根据跳频信号、干扰和噪声的时频特征差异性, 采用多尺度形态学滤波消除噪声、突发和扫频信号, 并利用谱图对消法剔除定频信号; 然后通过八连通域标记获取跳频信号的位置信息, 利用改进的K-means聚类算法实现异速跳频信号的分离; 最后由各类簇参数估计多跳频信号的周期、跳变时刻和跳频频率。仿真结果表明, 与利用形态学滤波并提取时频脊线的方法相比, 该算法在低信噪比下具有更高的估计精度, 且在定频、跳频信号发生频率碰撞时, 仍能准确估计跳频参数。

**关键词:** 跳频信号; 参数估计; 形态学滤波; 时频谱图对消; 聚类

中图分类号: TN914.41

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211459

中文引用格式: 刘佳敏, 赵知劲, 叶学义, 等. 基于形态学滤波和时频谱图对消的多跳频信号参数估计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 83-88.

英文引用格式: Liu Jiamin, Zhao Zhijin, Ye Xueyi, et al. Morphological filtering and time-spectrogram cancellation based parameters estimation algorithm of multi FH signals[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 83-88.

## Morphological filtering and time-spectrogram cancellation based parameters estimation algorithm of multi FH signals

Liu Jiamin<sup>1</sup>, Zhao Zhijin<sup>1,2</sup>, Ye Xueyi<sup>1</sup>, Wang Lijun<sup>2</sup>

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Key Lab of Information Control Technology in Communication System,

The 36th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Jiaxing 314001, China)

**Abstract:** Aiming at estimating the parameters of multi-frequency hopping signals in complex electromagnetic environment, a blind estimation algorithm of signals parameters based on multi-scale morphological filtering and time-spectrogram cancellation is proposed. Firstly, considering the characteristic differences of frequency hopping signals, interference signals and noise, multi-scale morphological filtering is used to eliminate the noise, frequency sweep signals and burst signals, the time-spectrogram cancellation is used to remove the fixed-frequency signals. Then the position information of the frequency hopping signals is obtained through the eight-connected domain mark, and then the all-speed frequency hopping signals are separated by the improved K-means clustering algorithm. Finally, the period, hopping time and frequency of multiple frequency hopping signals are estimated according to the parameters of each class cluster. The simulation results show that compared with the estimation algorithm that uses morphological filtering and extracts the time-frequency ridge, the proposed algorithm has higher estimation accuracy under low signal-to-noise ratio, and even though the frequency collision between frequency hopping signals and the fixed frequency signals occurs, the frequency hopping parameters can still be estimated accurately.

**Key words:** frequency hopping signal; parameter estimation; morphological filtering; time-spectrogram cancellation; clustering

## 0 引言

跳频信号因其具有较强的抗干扰、抗截获和抗衰落等能力, 被广泛应用于军事通信<sup>[1]</sup>。跳频信号参数估计是通信侦察的主要任务之一, 随着电磁环境的日益复杂, 参数精确估计变得愈发困难。当前, 跳频信号参数估计

算法可分为非时频分析法和时频分析法两大类, 由于大多数非时频分析法需要已知一些特定条件, 且只能估计出跳频信号的部分参数, 因此简单直观且无需先验信息的时频分析法更适用于跳频信号的参数盲估计。文献[2]通过两次短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)估计信号跳变时刻并利用多重信号分类算法进行

\* 基金项目: 国家自然科学基金(U19B2016)

频率估计,具有较高估计精度,但无法兼顾时间和频率分辨率。文献[3]将 STFT 和平滑伪魏格纳-威尔分布(Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD)相结合,在提高时频分辨率的同时抑制了交叉项干扰,但只适用于同步网台的跳频信号参数估计,且部分参数估计精度受信号能量分布影响严重。文献[4]~[8]通过提取跳频信号时频脊线进行参数估计,文献[8]在文献[7]的基础上利用迭代法去噪和基于驻留时长的 K-means 聚类进行参数估计,提升了算法抗噪性能,但在定频信号与跳频信号发生频率碰撞时算法失效。为了提升参数估计性能,文献[9]~[12]在不同时频变换的基础上引入图像处理技术,采用形态学滤波对时频图像进行处理后,提取时频脊线完成跳频信号的参数估计,相比于直接提取时频脊线的参数估计法,这些方法具有更高的精确度,但都仅针对单个跳频信号的参数估计。文献[2]~[11]仅考虑了存在高斯白噪声或定频信号的简单电磁环境,而文献[12]在较强干扰背景下算法性能发生恶化甚至失效。

对此,本文提出一种基于多尺度形态学滤波和时频谱图对消的多跳频信号参数盲估计算法。通过构造不同尺度的结构元素对接收信号时频谱图进行形态学滤波,实现高斯噪声、突发信号和扫频信号的剔除,并利用跳频信号与定频信号能量分布的差异性,采用时频谱图对消除定频信号,能有效避免传统形态学滤波对干扰信号剔除不彻底或者对跳频信号的误剔除现象,以较高的估计精度实现复杂电磁环境下对多个跳频信号的参数估计。

## 1 信号模型与时频谱图变换

假设在观测时间  $T$  内,发送端共传输  $H$  个跳频信号,其中第  $h$  个跳频信号  $S_h(t)$  表示为:

$$S_h(t) = \sum_{k=0}^{M_h} \text{rect}_{T_h}(t - kT_h - \tau_h) e^{j2\pi f_k(t - kT_h - \tau_h)}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中,  $T_h$  为其跳频周期,  $\tau_h$  为起跳时间,  $f_k$  是跳变频率,  $M_h$  是观测时间内跳变频率总数。

在复杂的电磁环境中接收信号  $r(t)$  包括  $H$  个跳频信号  $S_h(t)$ 、 $F$  个定频信号  $D_f(t)$ 、 $G$  个扫频信号  $C_g(t)$ 、 $Q$  个突发信号  $E_q(t)$ ,以及均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声  $w(t)$ ,以采样频率  $f_s$  对接收信号进行采样,得到的采样信号可表示为:

$$r(n) = \sum_{h=1}^H S_h(n) + \sum_{f=1}^F D_f(n) + \sum_{g=1}^G C_g(n) + \sum_{q=1}^Q E_q(n) + w(n) \quad (2)$$

谱图变换定义为 STFT 的模值平方,具有良好的时频聚集性。接收信号的时频谱图可表示为:

$$\begin{aligned} \text{SPEC}_r(k, n) &= |\text{STFT}_r(k, n)|^2 \\ &= \left| \sum_{m=-\infty}^{+\infty} r(m) h(n-m) e^{-j2\pi mk/N} \right|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $h(n)$  是窗函数;  $k=1, 2, 3, \dots, K$  为离散频率点;  $n=$

$1, 2, 3, \dots, N$  为离散时间点。

由于接收信号包括干扰信号和噪声,为了准确估计跳频信号参数,本文利用多尺度形态学滤波和时频谱图对消抑制各种干扰和噪声,提取出跳频信号。

## 2 跳频信号的提取

### 2.1 多尺度形态学滤波

形态学滤波是通过设定的结构元素对图像进行运算来获取图像局部特征,抑制干扰。主要运算包括腐蚀、膨胀,以及以此为基础的开运算、闭运算及其级、并联。开运算对图像先进行腐蚀再膨胀,以达到消除图像中较小的突出部分、断开区域间狭窄的连接和平滑各区域轮廓的效果。相反,闭运算通过先膨胀再腐蚀的过程填充目标区域内的空白,并连接断开的邻近区域<sup>[13-14]</sup>。通过线性、矩形元素对接收信号时频谱图进行多尺度形态滤波,实现高斯噪声、突发信号和扫频信号的剔除。滤波算法具体过程如下:

(1)使用基于图像直方图的最大方差阈值法(Otsu)处理时频谱图,实现信号与背景的分割,得到一张尺度为  $L \times P$  的二值图像  $I(l, p)$ 。

(2)为弥合跳频信号在分割后出现的细小裂缝,构造矩形元素  $S1$ ,对  $I(l, p)$  进行闭运算<sup>[13]</sup>:

$$I^1(l, p) = I(l, p) \circ S1 = (I(l, p) \ominus S1) \oplus S1 \quad (4)$$

式中,  $\circ$  表示闭运算,  $\ominus$  为膨胀运算,  $\oplus$  为腐蚀运算。

(3)为抑制突发信号和扫频信号,构造直线元素  $S2$  对  $I^1(l, p)$  进行开运算:

$$I^2(l, p) = I^1(l, p) \bullet S2 = (I^1(l, p) \oplus S2) \ominus S2 \quad (5)$$

式中,  $\bullet$  表示开运算。

(4)使用直线元素  $S2$  对  $I^2(l, p)$  进行闭运算,在保持目标区域大小与形态的同时,填补目标区域内的空洞:

$$I^3(l, p) = I^2(l, p) \circ S2 = (I^2(l, p) \ominus S2) \oplus S2 \quad (6)$$

(5)将  $I^3(l, p)$  的尺寸调整为与原时频谱图同等的大小  $K \times N$ ,在原时频谱图上,利用  $I^3(k, n)$  重构剔除了突发信号和扫频信号的时频谱图  $U(k, n)$ 。

$$U(k, n) = \begin{cases} U(k, n) & I^3(k, n) = 1 \\ 0 & I^3(k, n) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

多尺度形态学滤波前后的时频谱图如图 1 所示。由图 1 可见,重构的时频谱图很好地过滤了噪声、突发信号和扫频信号,但定频信号有待消除。

### 2.2 时频谱图对消

一般情况下形态学滤波对定频信号的剔除不够完整,且在与跳频信号发生频率碰撞存在误剔除的现象,故利用定频信号与跳频信号的时频差异性,通过时频谱图对消法将定频信号进行剔除。

求重构时频谱图  $U(k, n)$  在各频率分量上的均值  $\overline{U(k)}$ :

$$\overline{U(k)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U(k, n) \quad (8)$$

在时频谱图  $U(k, n)$  上减去  $\overline{U(k)}$  得到对消谱图:

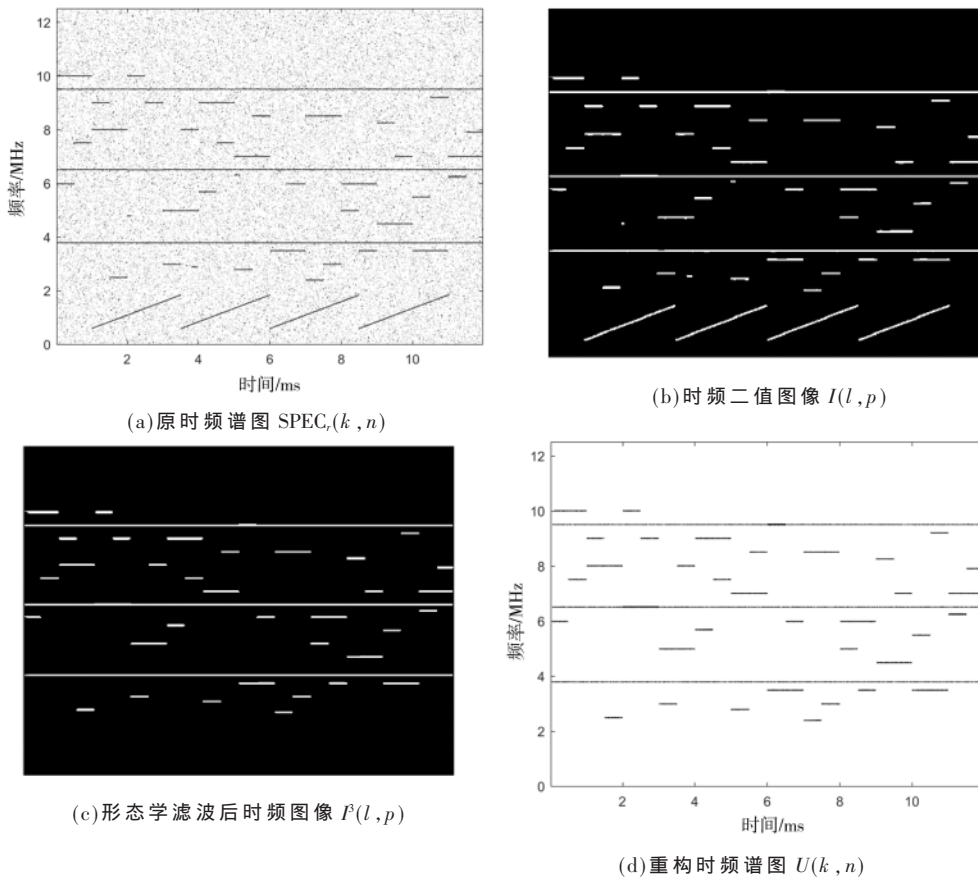


图1 多尺度形态学滤波前后时频图

$$V(k, n) = U(k, n) - \overline{U(k)} \quad (9)$$

由于跳频信号的频率是随时间不断跳变的,它在某一频率上停留的时间远小于观测时间,故通过式(8)计算得到的平均谱图的能量将非常小,经时频谱图对消后仍可保持原跳频信号时频特征;而对于定频信号有 $\overline{U_D(k)}$ 近似于 $U_D(k, n)$ 。利用跳频信号和定频信号在谱图分布上的明显差异,剔除定频信号。图2为对消前后的对比图,可以看出即使在定频信号与跳频信号发生频率碰撞的情况下,经时频谱图对消后,也能提取出跳频信号。

### 3 跳频信号的参数估计

为了估计多个跳频信号参数,本文在剔除了各种干扰和噪声的时频图上进行连通域标记,基于连通域长度采用改进的K-means聚类算法将跳速不同的跳频信号分离,最后利用连通域参数与信号时频特征信息的对应关系,估计各个跳频信号的跳频周期、频率和起跳时刻。

#### 3.1 连通域标记

将对消后的时频谱图再次图像化处理成一张 $L \times H$ 的二维图像,进行形态学滤波以消除对消后残留的定频

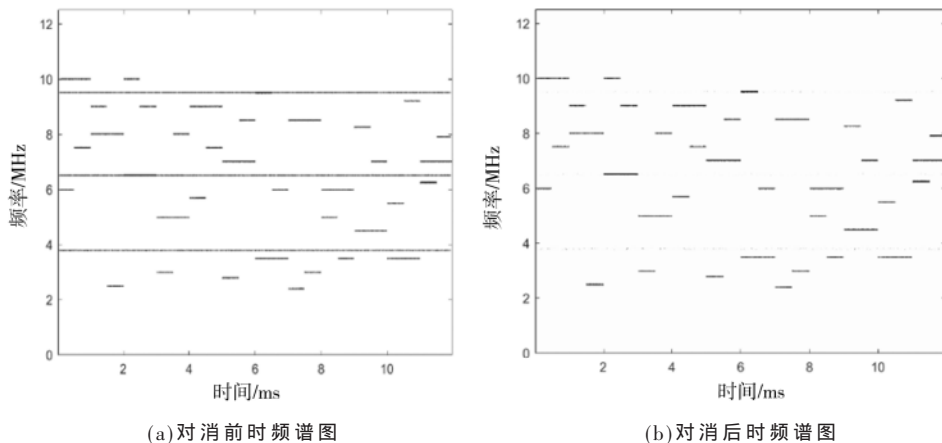


图2 对消前后时频谱图

信号能量。各跳频信号可看作是一个独立的区域,使用8连通域检测图像,用label<sub>*l<sub>i</sub>*</sub>、label<sub>*r<sub>i</sub>*</sub>和label<sub>*sl<sub>i</sub>*</sub>分别表示第*i*个连通域的长度、中间行和起始列。

### 3.2 改进的 K-means 聚类

考虑到传统的 K-means 聚类算法需要已知聚类种类,且聚类性能受初始质心影响大<sup>[6,15]</sup>,本文以连通域长度作为聚类样本,根据各连通域长度及其变化情况,首先确定聚类种类和初始质心,接着利用 K-means 算法实现不同周期的跳频信号分选。改进的 K-means 聚类算法具体步骤如下:

(1)将各连通域的长度 label<sub>*l<sub>j</sub>*</sub>按升序排列得到样本数为 NumL 的聚类样本集 Label\_L,对 Label\_L 进行一次差分,用数组 diff\_L 记录相邻连通域长度的变化情况, diff<sub>*l<sub>j</sub>*</sub> 为第 *j* 个区域和第 *j*+1 个区域的长度差分。

$$\text{diff\_L} = \text{diff}(\text{Label\_L}) \quad (10)$$

(2)设定阈值  $\mu$  为 diff\_L 均值的 1.5 倍,即  $\mu = 1.5 \times E\{\text{diff\_L}\}$ ,用 index\_P 记录连通域长度发生突变的连通域标号。对 diff\_L 内的每一个值依次进行判断,若  $\text{diff\_l}_j > \mu, j = 1, 2, 3, \dots, \text{NumL}-1$ ,则将该连通域对应标号 *j* 从小到大存入 index\_P 中。

(3)根据当前 index\_P 数组的长度确定聚类的种类数,记为 NumP,令  $\text{index\_P}_{\text{NumP}+1} = \text{NumL}$ ,并确定初始聚类中心  $c_i$ :

$$c_i = \frac{\sum_{j=\text{index\_P}_i}^{j=\text{index\_P}_{i+1}} \text{label\_l}_j}{\text{index\_P}_{i+1} - \text{index\_P}_i}, i = 1, \dots, \text{NumP} \quad (11)$$

(4)计算每一个样本与各质心的欧式距离  $\text{dis}(\text{label\_l}_j, c_i) = |\text{label\_l}_j - c_i|$ ,并将 label<sub>*l<sub>j</sub>*</sub> 归于与它相距最近的类簇  $C_m$  中,即当  $\text{dis}(\text{label\_l}_j, c_m) = \min(\text{dis}(\text{label\_l}_j, c_i)), i = 1, 2, \dots, \text{NumP}$ ,则  $\text{label\_l}_j \in C_m, j = 1, \dots, \text{NumL}; m = 1, 2, \dots, \text{NumP}$ 。

(5)计算当前各类簇连通域长度均值作为新的聚类中心,对样本重新分类,直到质心的位置几乎不再发生改变,将最后一次分类集作为聚类的结果。

### 3.3 参数估计

在 3.1 节中,信号的时频谱图已被图像化成一张  $L \times H$  的二维图像,图像的长和宽分别对应着信号的观测时间 *T* 和谱图变换的最高频率  $f_h = \frac{f_s}{2}$ ,每个类簇  $C_m$  的元素个数记为 NumC<sub>*m*</sub>。根据各类簇  $C_m$  中第 *i* 个连通域的参数计算得到的各个跳变信号的持续时间  $t_{mi}$ 、起始时间  $\tau_{mi}$  和频率  $f_{mi}$  分别如下:

$$t_{mi} = \frac{T \times \text{label\_l}_{mi}}{L} \quad (12)$$

$$\tau_{mi} = \frac{T \times \text{label\_sl}_{mi}}{L} \quad (13)$$

$$f_{mi} = \frac{f_h \times \text{label\_r}_{mi}}{H} \quad (14)$$

则不同类簇  $C_m$  所对应的跳频信号的周期  $t_m$  和起跳时刻  $\tau_m$  为:

$$t_m = \frac{1}{\text{NumC}_m} \sum_{i=1}^{\text{NumC}_m} t_{mi} \quad (15)$$

$$\tau_m = \frac{1}{\text{NumC}_m - 1} \sum_{i=2}^{\text{NumC}_m} (\tau_{mi} - t_m \times (i-1)) \quad (16)$$

综上所述,按照图 3 中的流程实现复杂电磁环境下多个跳频信号的参数估计。

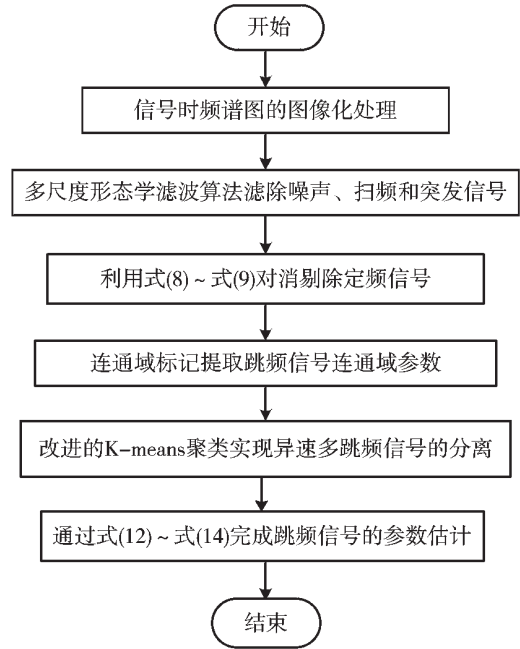


图3 本文算法流程图

## 4 实验结果与分析

为了分析参数估计性能,定义算法的信号提取正确率为:

$$\eta = \frac{Z_0}{Z} \quad (17)$$

其中,*Z* 为实验次数;*Z*<sub>0</sub> 为正确提取跳频信号的实验次数,即进行参数估计的跳频数与实际跳频数相等的实验次数。跳频周期的估计误差为:

$$\text{err\_T} = \frac{1}{\text{NumP}} \sum_{m=1}^{\text{NumP}} \left( \frac{|t_m - T_m|}{T_m} \right)^2 \quad (18)$$

其中, $T_m$  表示第 *m* 类簇所对应跳频信号的实际跳频周期。除各类簇中首个跳频信号外的起跳时间估计误差为:

$$\text{err\_}\tau = \frac{1}{\text{NumP}} \sum_{m=1}^{\text{NumP}} \left( \frac{|\tau_m - \text{ST}_m|}{\text{ST}_m} \right)^2 \quad (19)$$

其中, $\text{ST}_m$  为第 *m* 类簇所对应跳频信号的实际起跳时间。频率估计误差为:

$$\text{err\_F} = \frac{1}{\text{NumL}} \sum_{m=1}^{\text{NumP}} \sum_{i=1}^{\text{NumC}_m} \left( \frac{|f_{mi} - F_{mi}|}{F_{mi}} \right)^2 \quad (20)$$

其中, $F_{mi}$  为第 *m* 个类簇中第 *i* 个信号的实际频率。

以下实验中的曲线均是在各个信噪比下 100 次蒙特卡洛实验结果的平均。

## (1) 实验 1

分析在高斯噪声、定频信号和扫频信号背景下本文算法和文献[12]算法对单跳频信号参数估计性能对比。仿真参数设置如下:信号采样频率为 10 MHz,跳频信号周期为 0.5 ms,频率集为[2.8, 1.5, 3.2, 2.2, 2.0, 3.4, 2.7, 2.4, 1.55, 3.1, 2.1, 1.25, 2.65, 2.1, 3.6, 1.7, 3.0, 2.6, 1.4, 1.6] MHz;两个定频信号的频率分别为 2.5 MHz 和 4.0 MHz;扫频信号中心频率为 0.3 MHz。

两种算法的信号提取正确率曲线如图 4 所示,跳频周期、频率和起跳时间的估计误差曲线如图 5 所示。由图 4 可知本文算法在信噪比为 -5 dB 时,正确率高达 90% 以上,较对比算法提高了 5 dB,这主要是因为对比算法在进行干扰剔除时会弥留一些杂散点影响对跳频信号的正常提取。从图 5 可知,本文算法较对比算法均具有更高的参数估计精度,尤其是频率估计误差的数量级能达到  $10^{-6}$ ,较对比算法降低了 3 个数量级。

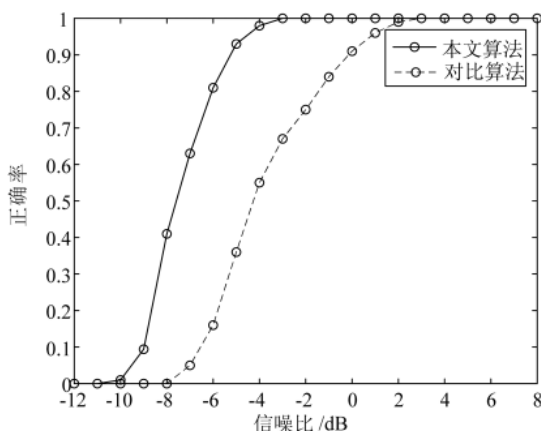


图 4 信号提取正确率

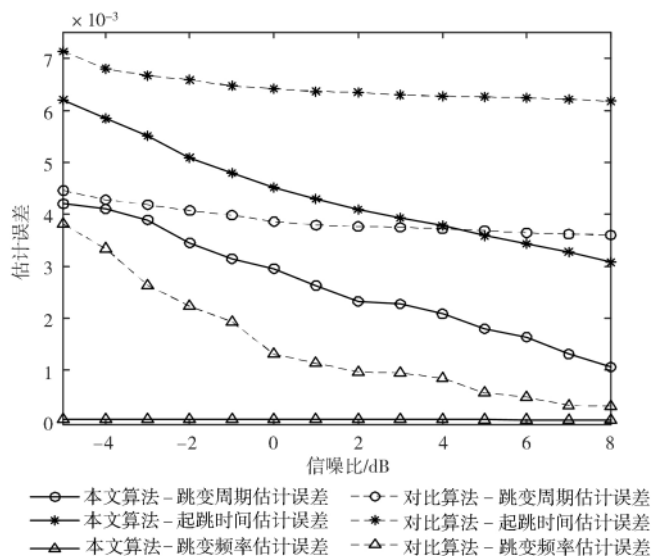


图 5 跳频信号参数估计误差

## (2) 实验 2

分析定频信号与跳频信号发生频率碰撞对本文算

法的影响。在实验 1 的干扰背景基础上,增加一个频率为 1.4 MHz 的定频信号,使之与原跳频信号在部分时段发生频率碰撞。当定频信号与跳频信号发生频率碰撞时,对比算法<sup>[12]</sup>失效,而本文算法在有无频率碰撞时对跳频信号 3 个参数的估计误差曲线如图 6 所示。

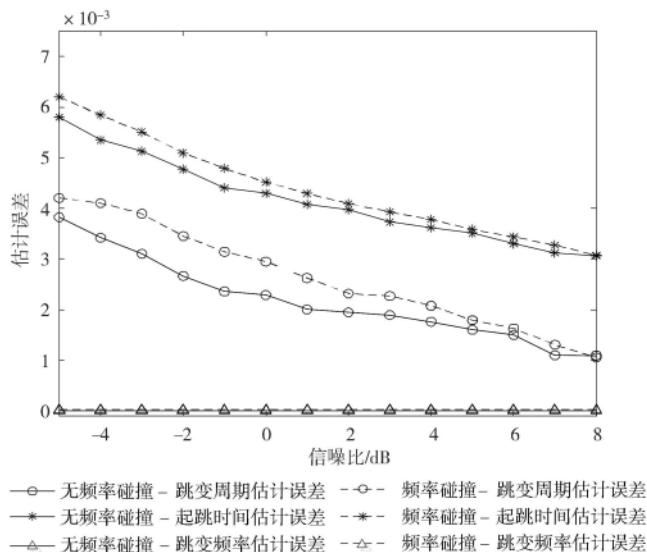


图 6 有无频率碰撞下的跳频信号参数估计误差

由图 6 可知,与无频率碰撞时的估计结果相比,发生频率碰撞时本文算法的跳变周期、起跳时间的估计性能恶化在  $10^{-3}$  之内,并随着信噪比的增大,两种情况下的性能差距不断缩小;跳变频率的估计性能几乎没有改变,仍能保持在  $10^{-6}$  的数量级;且与图 5 曲线相比,仍优于对比算法<sup>[12]</sup>在未发生频率碰撞时的性能。

## (3) 实验 3

分析不同干扰功率对本文算法的多个跳频信号参数估计性能影响。参数设置如下:信号采样频率为 25 MHz,跳变周期为 0.5 ms 的跳频信号 1,频率集为[10, 8.0, 6.5, 5.0, 9.0, 7.5, 3.5, 8.5, 6.0, 4.5, 3.5, 7.0] MHz;跳变周期为 1 ms 的跳频信号 2,频率集为[6.0, 7.6, 9.0, 2.5, 10, 9.5, 3.5, 8.0, 5.7, 7.5, 2.8, 8.5, 9.6, 6.0, 2.4, 3.0, 5.0, 3.7, 8.25, 7.0, 5.5, 9.2, 6.25, 7.9] MHz;3 个定频信号的频率分别为 9.5 MHz、6.5 MHz 和 3.8 MHz;3 个突发信号的频率分别为 4.8 MHz、2.9 MHz 和 6.3 MHz;扫频信号中心频率为 1.5 MHz。改变干扰信号的功率,在不同信干比(即跳频信号功率与定频、扫频、突发信号功率之和的比值, SIR)下,本文算法对各参数的估计误差如图 7~图 9 所示。

仿真结果表明,当信干比从 3 dB 下降到 1 dB 时,参数估计误差仍在同一个数量级,且干扰功率大小对跳频频率估计性能影响较小。故本文算法能有效抑制各种干扰,准确估计出多个跳频信号参数。

## 5 结论

本文利用多尺度形态学滤波和谱图对消法滤除噪

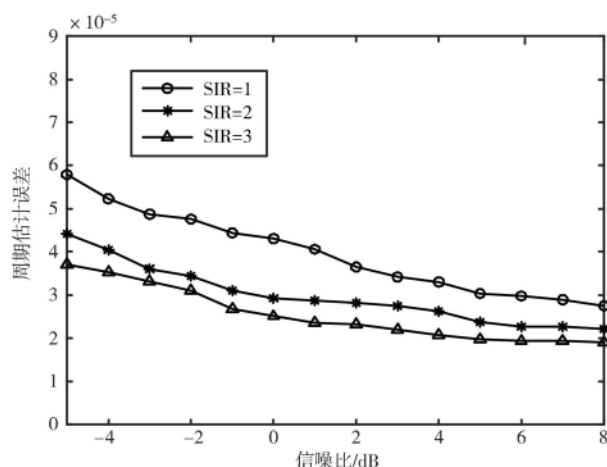


图7 不同干扰强度下跳变周期估计误差曲线

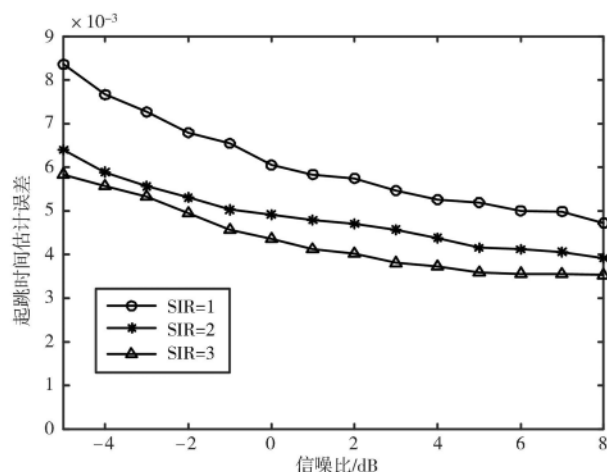


图8 不同干扰强度下起跳时刻估计误差曲线

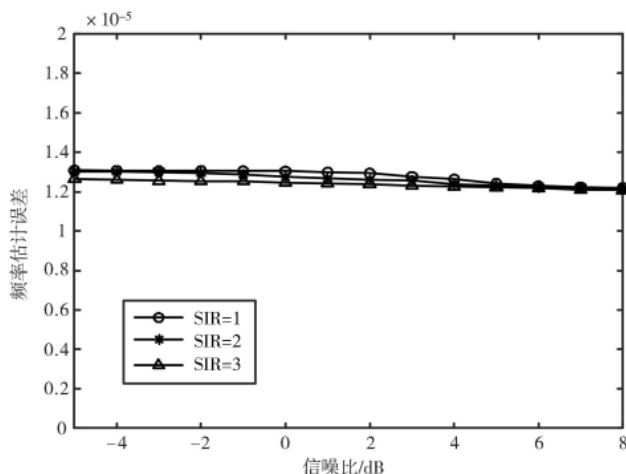


图9 不同干扰强度下跳变频率估计误差曲线

声及各种干扰信号,并通过连通域标记和改进的 K-means 算法实现异速多跳频信号的提取与分离。该算法提高了跳频信号的提取质量,在低信噪比下具有较高的估计精度,且突破了现有图像处理方法的应用局限,能在定频信号与跳频信号发生频率碰撞以及复杂电磁环境下精

确估计出多个跳频信号的参数。

#### 参考文献

- [1] 陈利虎,张尔扬.一种多分量跳频信号参数盲估计方法[J].信号处理,2009,25(2):194-198.
- [2] 张宝林,吕军,李彤,等.一种改进的跳频信号参数估计方法[J].电讯技术,2018,58(11):1310-1316.
- [3] 付卫红,王璐,贾坤,等.基于 STFT 与 SPWVD 的跳频参数盲估计算法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(9):59-63.
- [4] 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(2):150-154.
- [5] BARBAROSSA S, SCAGLIONE B. Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distributions[C]//First IEEE Signal Processing Workshop on SPAWC, 1997:710-711.
- [6] 曾晓宇,矫文成,孙慧贤.异速跳频干扰下跳频信号的参数估计[J].火力与指挥控制,2020,45(4):183-187.
- [7] 冯涛,袁超伟.基于时频脊线的跳频参数盲估计[J].电子学报,2011,39(12):2921-2925.
- [8] 张盛魁,姚志成,何岷,等.改进时频脊线的跳频参数盲估计算法[J].系统工程与电子技术,2019,41(12):2885-2890.
- [9] 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.
- [10] 赵方超,蒋建中,郭军利,等.形态学滤波与组合时频分布跳频信号参数估计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(6):942-947.
- [11] 殷婕,龚晓峰,武瑞娟,等.基于图像处理的跳频信号参数估计[J].电子技术应用,2013,39(1):83-85,89.
- [12] 席有猷,李志刚,王苗.结合图像处理与时频分析的直扩/跳频信号参数估计[J].电讯技术,2014(8):1071-1076.
- [13] 王新,黄兆云.基于多结构元素的数学形态学图像边缘检测[J].计算机工程与应用,2008(7):89-90,112.
- [14] 王家良,程春玲.一种多层自适应形态滤波算法[J].计算机科学,2015,42(5):72-77.
- [15] 张盛魁,姚志成,何岷,等.基于时频方差聚类的 FH 信号参数盲估计[J].系统工程与电子技术,2020,42(8):1662-1667.

(收稿日期:2021-03-06)

#### 作者简介:

刘佳敏(1997-),通信作者,女,硕士研究生,主要研究方向:软件无线电,E-mail:1483921509@qq.com。

赵知劲(1959-),女,博士,教授,主要研究方向:通信信号处理、认知无线电、自适应信号处理等。

叶学义(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向:图像处理、模式识别、信息隐藏。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所