

基于稀疏重构的跳频信号检测方法

东润泽¹, 郭 英^{1,2}, 于欣永¹, 孟 涛¹, 张坤峰¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 石家庄, 050081)

摘要 针对复杂电磁环境下跳频信号的检测问题,提出了一种基于稀疏重构的跳频信号检测方法,首先采用近似 l_0 范数算法对含有干扰的跳频信号进行稀疏重构,采用拟牛顿法求解无约束多维最优化问题,然后对得到的时频图的频率分量进行二值形态学滤波以去除干扰和噪声,最后通过统计匹配信号的个数完成信号的检测。同时为提高算法的自适应能力,在选取二值化阈值时采用最大类间方差法。理论分析和仿真实验表明该算法在较低信噪比下仍能克服干扰和噪声并较好地保存各跳,实现对跳频信号的检测。

关键词 跳频信号;稀疏重构;近似 l_0 范数;形态学滤波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.014

中图分类号 TN911.7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0077-06

A Frequency Hopping Signal Detection Method Based on Sparse Reconstruction

DONG Runze¹, GUO Ying^{1,2}, YU Xinyong¹, MENG Tao¹, ZHANG Kunfeng¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to detect frequency hopping signals in complex electromagnetic environment, this paper utilizes the approximate l_0 norm algorithm for reconstructing the frequency hopping signal with interference according to the sparsity of frequency hopping signal in frequency domain. The unconstrained multi-dimensional optimization problem is solved by the quasi Newton method, and the paper utilizes the obtained time-frequency map as an image for performing two value morphological filtering to eliminate the interference and noise. Frequency hopping signal is detected by counting the number of matched signals. In view of improving the adaptability of the algorithm, this paper uses the Otsu method in selecting binarization threshold. The theoretical analysis and the simulation show that the algorithm not only can overcome the interference under low SNR condition but also can accomplish signal detection.

Key words: frequency hopping signals; sparse recovery; approximate l_0 norm; morphological filtering

近年来,跳频通信因其抗远近效应和较强的抗干扰能力等特性,在商业和军事领域有着很好的应用价值^[1],对跳频通信的侦察主要包括跳频信号检

测、跳频信号参数估计及网台分选三大任务。其中跳频信号检测是进行后续处理的基础,对复杂电磁环境下跳频信号的检测问题进行研究具有重要

收稿日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61601500)

作者简介: 东润泽(1995—),男,甘肃天水人,硕士生,主要从事通信信号侦察处理研究。E-mail:m13141499464@163.com

引用格式: 东润泽,郭英,于欣永,等. 基于稀疏重构的跳频信号检测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 77-82.
DONG Runze, GUO Ying, YU Xinyong, et al. A Frequency Hopping Signal Detection Method Based on Sparse Reconstruction [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 77-82.

意义^[2]。

国内外学者就跳频信号的检测问题进行了大量研究,文献[3~4]提出采用单跳自相关技术(Single Hop Autocorrelation Technique)作为预检测处理器,具有优越的抗噪声性能,但需要预先知道跳速。文献[5~6]提出一种基于宽带多通道电磁辐射射的能量检测方法,通过把整个频带分成若干个子带,在每个子带中分别进行信号的检测再综合判决结果来进行跳频信号的检测,可以达到最优的检测性能,但是计算复杂,且同样需要知道跳频信号的相关参数信息。文献[7]采用自适应局部时频阈值对接收到信号的谱图进行预处理,然后通过谱图修正和时间占有度的统计去除大部分干扰,最终得到跳频信号的时频图,从而完成对跳频信号的检测。文献[8]同样先得到接收信号的谱图,然后提取其中的图像特征,建立基于图像特征的跳频信号检测和参数估计混合模型,在利用自适应门限检测跳频信号的同时对跳频信号参数进行估计。文献[9]提出选取不同的模板对时频图中的信号进行匹配,在存在干扰的情况下仍可以完成跳频信号的检测,但虚警概率较高。文献[10~12]提出采用基于时频图修正的方法来检测跳频信号。文献[13]提出通过压缩测量矩阵建立原始信号与测量信号的联系,然后通过似然比检验的方法完成对跳频信号的检测,并通过设计自适应测量矩阵的方法来提高检测性能。文献[14]先计算噪声的频率分布,再从时频图中减去干扰以得到跳频的频点。

针对以上算法存在的低信噪比下检测效果不好和未考虑跳频信号的频域稀疏性的问题,本文利用跳频信号在频域的稀疏性,先构造傅里叶基观测矩阵对原始信号进行压缩测量,得到观测矩阵,然后利用近似 l_0 范数算法重构出稀疏向量,从而得到清晰的时频图,最后采用形态学滤波的方法消除定频和突发信号干扰,通过统计匹配信号的个数完成对跳频信号的检测。仿真实验表明该方法具有良好的抗噪声能力和对干扰的鲁棒性,在信噪比为0 dB时也能得到清晰的时频图,有较好的检测效果。

1 信号模型

1.1 跳频信号模型

假设一跳频信号 $s_m(t)$ 在观测时间 $[0, T]$ 内共有 K 跳,则 $s_m(t)$ 可表示为:

$$s_m(t) = \sum_{k=1}^K a_{m,k} \exp(j2\pi f_{m,k}t), t \in [t_{k-1}, t_k] \quad (1)$$

式中: $[t_{k-1}, t_k]$ 代表第 k 跳的驻留时间, $a_{m,k} \in \mathbb{C}$ 和

$f_{m,k} \in [f_{\min}, f_{\max}]$ 分别代表第 k 跳的复幅度和驻留频率。

设在时间 $[0, T]$ 内有 M 个跳频信号进入接收机,则含噪的接收信号 $y(t)$ 可表示为:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) + v(t), 0 \leq t < T \quad (2)$$

式中: $v(t)$ 代表均值为零,方差为 σ^2 的复加性高斯白噪声。数字化后的接收信号模型为:

$$y(nT_s) = \sum_{m=1}^M s_m(nT_s) + v(nT_s), n \in \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (3)$$

$$s_m(nT_s) = \sum_{k=1}^K a_{m,k} \exp(j\omega_{m,k}n), n_{k-1} \leq n < n_k \quad (4)$$

式中: $T_s = \frac{1}{2f_{\max}}$; $n_k = \lceil t_k/T_s \rceil$; $N-1 = \lfloor T/T_s \rfloor$; $\omega_{m,k} = 2\pi f_{m,k}T_s$,式(3)的矢量形式表示为:

$$\mathbf{y} = \sum_{m=1}^M \mathbf{s}_m + \mathbf{v} \quad (5)$$

跳频信号检测和估计就是在已知观测信号 $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]$ 的基础上,估计观测时间内跳频信号的数目 M ,起跳时刻 t_k ,跳频频率集 $\{\omega_{m,k}\}$ 等参数。

1.2 稀疏重构模型

假设信号 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^P$ 在一组正交基或紧框架下是稀疏的,即 $\mathbf{x} = \mathbf{\Psi}\boldsymbol{\alpha}$,其中 $\mathbf{\Psi} \in \mathbb{C}^{P \times P}$, $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{C}^P$ 是稀疏的且 $\|\boldsymbol{\alpha}\|_0 = k \ll P$,则可以用一个与基矩阵 $\mathbf{\Psi}$ 不相关的观测矩阵 $\mathbf{\Phi}$ 将 \mathbf{x} 投影到 \mathbf{y} 上:

$$\mathbf{y} = \mathbf{\Phi}\mathbf{\Psi}\boldsymbol{\alpha} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{\Phi} \in \mathbb{C}^{Q \times P}$, $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^Q$ 为测量向量。令 $\mathbf{A} = \mathbf{\Phi}\mathbf{\Psi}$,式(6)在有噪声的情况下可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{v} \quad (7)$$

稀疏信号的重构问题是已知 \mathbf{y} 和 \mathbf{A} 求 $\boldsymbol{\alpha}$ 的最稀疏解的过程,即:

$$\begin{cases} \min \|\boldsymbol{\alpha}\|_0 \\ \text{s. t. } \mathbf{y} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{v} \end{cases} \quad (8)$$

因为 $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}$,而向量二范数的平方可以代表能量,为尽可能减小噪声的影响,同时希望 $\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2$ 最小,式(8)可表示为:

$$\begin{cases} \min \|\boldsymbol{\alpha}\|_0 \\ \min \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2 \end{cases} \quad (9)$$

通过选择适当参数 λ 可将式(9)转化为无约束最优化问题:

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}} (\|\boldsymbol{\alpha}\|_0 + \lambda \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2) \quad (10)$$

式中:参数 λ 是调节前后2项的权重因子。但求解最小 l_0 范数是NP(Non-deterministic Polynomial)-hard^[15]问题,一种常用的方法是构造连续可导函数对 l_0 范数进行逼近。

2 算法原理

本文算法的主要思想是利用近似 l_0 范数重构出在频域具有稀疏性的跳频源信号,再对得到的时频图进行图像处理。

由于跳频信号和噪声、干扰在频域稀疏性上具有差异,这种差异体现在图像上就是灰度值和形态学上的差异,因而可以通过形态学开运算和闭运算等去除噪声和干扰。同时为提高算法的自适应能力,采用最大类间方差法选取二值化阈值,然后对二值化图像进行形态学滤波,得到清晰的时频图以完成跳频信号的检测。算法的流程见图1。

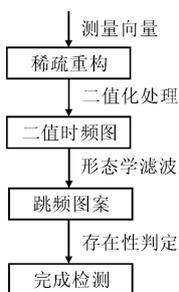


图1 算法流程图

Fig. 1 The flowchart of used algorithm

2.1 近似 l_0 范数稀疏重构算法

假设有1组高斯函数:

$$f_{\sigma}(\alpha) \triangleq \exp(-\alpha^2/2\sigma^2) \quad (11)$$

该高斯函数满足:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} f_{\sigma}(\alpha) \approx \begin{cases} 1, & \alpha = 0 \\ 0, & \alpha \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

令:

$$F_{\sigma}(\alpha) = P - \sum_{i=1}^P f_{\sigma}(\alpha_i) \quad (13)$$

则有:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} F_{\sigma}(\alpha) \approx \|\alpha\|_0 \quad (14)$$

因此式(10)可以转化为求解式(15)最小化问题:

$$\min_{\alpha} L_{\sigma, \lambda}(\alpha) = F_{\sigma}(\alpha) + \lambda \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\alpha\|_2^2 \quad (15)$$

由于 $F_{\sigma}(\alpha) \approx \|\alpha\|_0$ 仅在 $\sigma \rightarrow 0$ 时成立,因此可以选择一个非常小的 σ 以得到 α 的最小 l_0 范数解。 σ 越小 $F_{\sigma}(\alpha)$ 就能越精确地逼近 $\|\alpha\|_0$, 同时 $F_{\sigma}(\alpha)$ 就会有多个局部极小值, 求出 α 的最优解也就越困难。所以我们可以选取1组 σ 的下降序列: $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_J]$, 把前一次最小化式(15)得到的 α 的最优解当作下一次最小化的初始值, 这样随着 σ 的减小, α 就会越来越逼近式(15)的全局最优解。

当 $\sigma = \sigma_j$ 时, 式(15)是一个无约束最小化问题, 本文采用拟牛顿法的 BFGS 形式求解式(15), 因为

拟牛顿法是通过在试探点附近的2次逼近引进拟牛顿条件来确定搜索方向, 在保留牛顿法收敛速度快的优点的同时, 克服了牛顿法计算量大和要求计算机存储量大的缺点^[16]。其算法步骤如下:

步骤1 给定初始值 α^0 , 矩阵 $\mathbf{H}_0 = \mathbf{I}_n$, 迭代精度 $\mu > 0$;

步骤2 选择下降序列 $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_J]$, 令 $j = 0$, 并确定权重参数 λ ;

步骤3 令 $j = j + 1, \sigma = \sigma^j$, 若 $\|\nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^0)\| \leq \mu$, 本次迭代结束, 极小点为 α^0 并重复本步骤进行下一次迭代, 否则转到步骤4;

步骤4 令 $p^{(0)} = -\mathbf{H}_0 \nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^0)$, 并且 $k = 0$;

步骤5 t_k 满足 $L_{\sigma, \lambda}(\alpha^k + t_k p^{(k)}) = \min_{t \geq 0} L_{\sigma, \lambda}(\alpha^k + t p^{(k)})$, 用一维搜索法求得 t_k , 令 $\alpha^{k+1} = \alpha^k + t_k p^{(k)}$;

步骤6 若 $\|\nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^{k+1})\| \leq \mu, \sigma = \sigma^j$ 的迭代结束, 极小点为 α^{k+1} 并转到步骤3进行下一次迭代, 否则转到步骤7;

步骤7 若 $k + 1 = n$, 令迭代初始值 $\alpha^0 = \alpha^n$ 转到步骤3开始下一次迭代, 否则令:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\mathbf{S}^{(k)} (\mathbf{S}^{(k)})^T}{(\mathbf{S}^{(k)})^T \mathbf{y}^{(k)}} \left[1 + \frac{(\mathbf{y}^{(k)})^T \mathbf{H}_k \mathbf{y}^{(k)}}{(\mathbf{S}^{(k)})^T \mathbf{y}^{(k)}} \right] - \frac{1}{(\mathbf{S}^{(k)})^T \mathbf{y}^{(k)}} [\mathbf{S}^{(k)} (\mathbf{y}^{(k)})^T \mathbf{H}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{y}^{(k)} (\mathbf{S}^{(k)})^T]$$

其中 $\begin{cases} \mathbf{S}^{(k)} = \alpha^{k+1} - \alpha^k \\ \mathbf{y}^{(k)} = \nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^{k+1}) - \nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^k) \end{cases}$, 取 $p^{(k)} = -\mathbf{H}_{k+1} \nabla L_{\sigma, \lambda}(\alpha^{k+1})$ 并令 $k = k + 1$, 转到步骤5;

步骤8 $j = J + 1$ 时整个算法结束, 输出结果 $\hat{\alpha} = \alpha^0$ 。

2.2 二值化门限设定

本文认为整体信号具有稀疏性, 对其进行稀疏重构, 所以重构得到的信号只包含具有稀疏性的信号, 噪声不具有稀疏性而被去除; 线性调频信号 (Linear Frequency Modulation Signal, LFMS) 具有在其持续时间内频率线性变化的特点, 由于跳频信号在持续时间内只有几个特定的跳变频率点, 所以 LFM 的频域稀疏性远低于跳频信号, 体现在重构得到的信号上就是对应于 LFM 的信号幅度小于对应于跳频信号的幅度, 根据这一特点在二值化过程中设置一个门限将 LFM 信号去除。当二值化阈值是最佳阈值时, 处理之后的前景和背景之间的差别应当是最大的, OTSU 算法采用类间方差作为衡量差别的标准。

设 T 为分割前景与背景的门限, 图像中灰度值小于阈值 T 的像素占图像比例为 ω_0 , 其平均灰度为 u_0 ; 灰度值大于阈值 T 的像素占图像比例为 ω_1 , 其平均灰度为 u_1 , 图像的总平均灰度为 u , 类间方差记

为 g , 则有:

$$u = \omega_0 u_0 + \omega_1 u_1 \quad (16)$$

$$g = \omega_0 (u_0 - u)^2 + \omega_1 (u_1 - u)^2 \quad (17)$$

联立式(16)~(17)得:

$$g = \omega_0 \omega_1 (u_0 - u_1)^2 \quad (18)$$

使得 g 最大的 T 即为最佳阈值。

2.3 形态学滤波处理

数学形态学,简称形态学,是一种分析目标形状和空间结构的理论,由数学形态学的基本运算组合而成的操作称为形态学滤波。二值形态学的4种基本运算为膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。

定义结构元素 B 和图像 A ,则使用 B 腐蚀 A 和 A 被 B 膨胀分别定义为:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (19)$$

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (20)$$

腐蚀运算主要用于消除小于结构元素的物体,消除物体的边界;膨胀运算主要用于填补图像的缝隙。对腐蚀和膨胀运算进行组合即可得到开运算和闭运算。开运算定义为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (21)$$

由式(21)可以看出,开运算即为先用 B 对 A 进行腐蚀运算,再用 B 对腐蚀结果进行膨胀。其功能是消除细小的突出物,使轮廓变得光滑。闭运算定义为:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (22)$$

由式(22)可以看出,闭运算即为先用 B 对 A 进行膨胀,再用 B 腐蚀结果。其功能是连接狭窄的断开,填补细小的孔洞,使轮廓变得光滑。

突发信号具有频率不变,时间上不连续的特点,体现在时频图上就是一组频率一致的短线段,因此定义线形狭长结构元素 B_1 对时频图进行闭运算,将代表突发信号的短线段连接起来,使其形态类似于定频信号再与定频信号一起去除。

假设跳速范围已知: (f_1, f_2) , 持续时间在区间 $(1/f_2 \text{ s}, 1/f_1 \text{ s})$ 内的信号称为匹配信号,持续时间大于 $1/f_1 \text{ s}$ 和小于 $1/f_2 \text{ s}$ 的信号认为不是跳频信号,因此定义长度大于 $1/f_1 \text{ s}$ 的线形狭长结构元素 B_2 , 对时频图进行开运算,再从开运算之前的时频图中减去开运算的结果,去除定频信号。

3 算法流程

3.1 稀疏信号重构

步骤1 设定矩阵 A 和测量向量 y , 使初始值 α^0 为 $y = A\alpha$ 的最小二乘解;

步骤2 选择下降序列 $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_J]$, 通过 BFGS 算法迭代求得稀疏向量 α ;

步骤3 由稀疏向量 α 得到重构后的信号的时频图。

3.2 时频图二值化处理及形态学滤波

步骤1 由于 LFM 信号的幅度低于跳频、定频及突发信号,将时频图进行灰度化处理以去除 LFM 信号;

步骤2 采用最大类间方差法选取二值化阈值,对灰度时频图进行二值化处理,得到初始时频图 A_0 ;

步骤3 定义结构元素 B_1 , 对时频图 A_0 进行闭运算,连接属于突发信号的频率分量,得到时频图 A_1 ;

步骤4 定义结构元素 B_2 , 对时频图 A_1 进行开运算,得到只剩定频和已连接的突发信号的时频图 A_2 ;

步骤5 从 A_1 中减去 A_2 得到纯净跳频信号 $A_3 = A_1 - A_2$;

步骤6 统计匹配信号的个数,若在 $(\lfloor T f_1 \rfloor, \lfloor T f_2 \rfloor)$ 区间内则认为存在跳频信号,其中 T 为信号持续时间, (f_1, f_2) 为跳速范围。

4 仿真实验

为验证本文算法在复杂电磁环境下检测跳频信号的有效性,本节通过仿真实验进行跳频信号检测性能的分析。

4.1 实验1

设置的仿真条件为采样率 $f_s = 200 \text{ kHz}$, 信号持续时间 $T = 0.00512 \text{ s}$, 跳频信号信噪比为 0 dB , 跳速为 1562.5 hop/s , 归一化的跳频频率集为 $[0.0547, 0.1484, 0.0234, 0.1016, 0.2422, 0.4766, 0.3828, 0.1953]$ 。在信号持续时间内存在一个归一化频率为 0.36 的突发信号; 一个归一化频率为 0.26 的定频信号; 一个归一化频率从 0 增加到 0.25 的线性调频信号。

通过 SPWVD 及稀疏重构得到的时频图见图 2、图 3。从图 2 和图 3 可以看出,相比 SPWVD 得到的时频图,稀疏重构得到的时频图能够很好地消除交叉项的干扰,并能提供较高的频率分辨率,较完整地保存了信号和干扰的形态特征,有利于进行形态学滤波。对稀疏重构后的时频图进行形态学滤波处理,得到的结果见图 4。

图 4(a)通过对稀疏重构后的时频图进行二值化处理去除了 LFM 信号,图 4(b)通过对时频图进行闭运算将突发信号连接起来,图 4(c)通过对时频图进行开运算去除了跳频信号,最后通过统计

图 4(d) 中匹配信号的个数完成对跳频信号的检测。

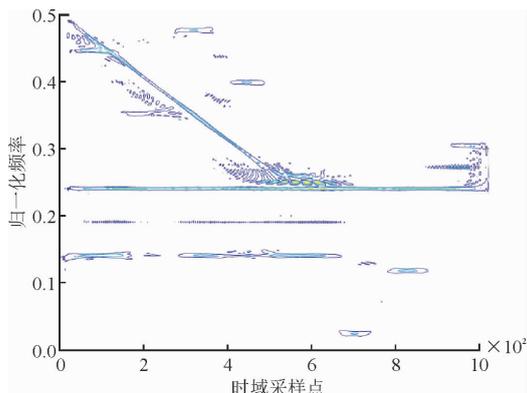


图 2 SPWVD 时频图

Fig. 2 Time-frequency figure of input signal by SPWVD

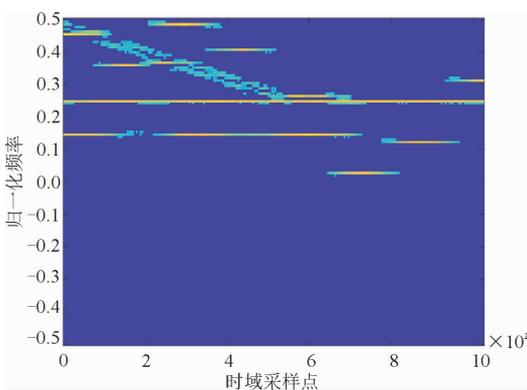


图 3 稀疏重构后的时频图(单跳频信号)

Fig. 3 Time-frequency figure of input signal after sparse reconstruction(single frequency hopping signals)

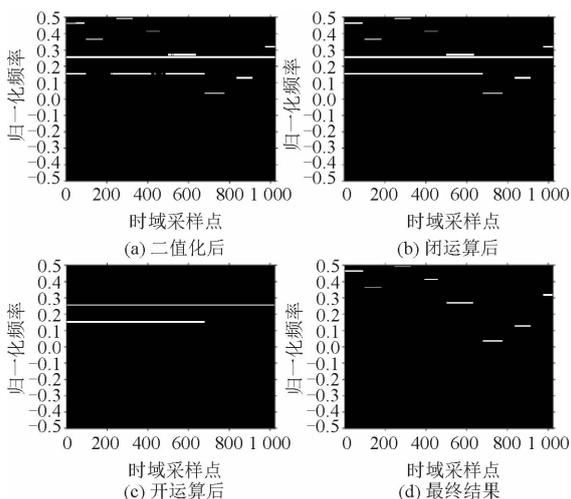


图 4 形态学滤波处理过程(单跳频信号)

Fig. 4 Processing steps of morphological filtering (single frequency hopping signals)

4.2 实验 2

在实验 1 的基础上增加 1 个跳频信号,其归一化的跳频频率集为 $[0.164\ 1, 0.070\ 3, 0.117\ 2, 0.312\ 5]$,其它条件不变,稀疏重构结果和形态学滤波处理过程分别见图 5、图 6。

从图 5 和图 6 可以看出,在多跳频信号条件下通过稀疏重构算法得到的时频图仍有较高的频率分辨率,信号和干扰的形态特征保留较好;本文方法在多跳频信号下虽然存在噪点,但对统计匹配信号的个数影响不大,因此本文方法适用于多跳频信号。

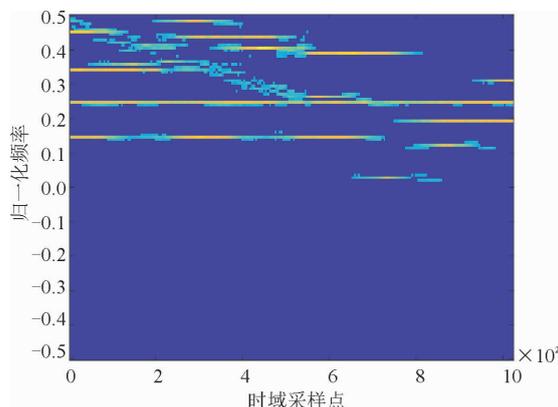


图 5 稀疏重构后的时频图(多跳频信号)

Fig. 5 Time-frequency figure of input signal after sparse reconstruction(multi-frequency hopping signals)

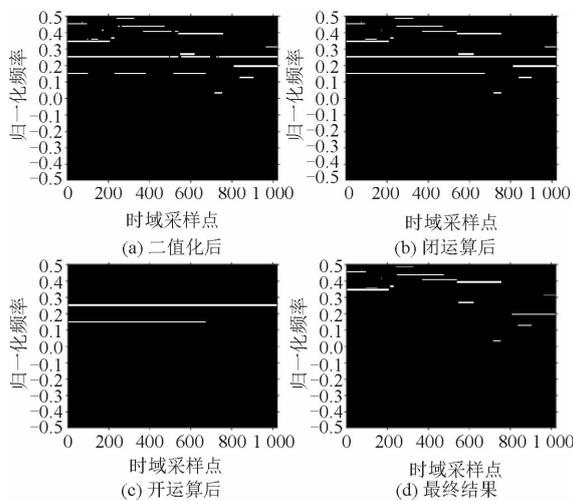


图 6 形态学滤波处理过程(多跳频信号)

Fig. 6 Processing steps of morphological filtering (multi-frequency hopping signals)

4.2 实验 3

为了分析噪声对本文算法的影响,仿真条件设置同实验 1,跳频信号信噪比从 -4 dB 以 1 dB 为间隔增加至 10 dB ,在每个信噪比下进行 100 次蒙特卡罗仿真,假设跳速范围为 $(800, 2\ 000)$,则匹配信号个数在区间 $(4, 10)$ 内就认为存在跳频信号。本文方法和文献 [12] 方法的正确检测概率随信噪比变化曲线见图 7。

从图 7 可以看出,在低信噪比下本文方法正确检测概率明显高于文献 [12] 方法,且若以检测概率达到 90% 以上为标准,本文对信噪比的要求比文献 [12] 低约 1 dB 。

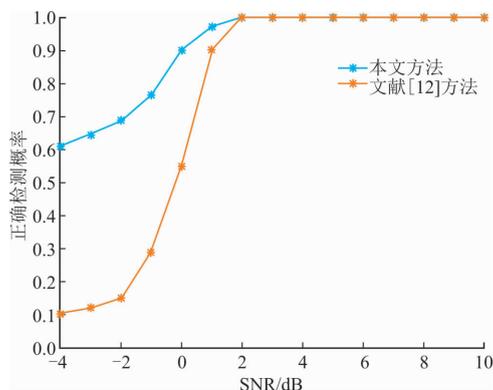


图7 2种算法性能比较

Fig. 7 Performance comparison of two algorithms

5 结语

本文主要是将稀疏重构应用到跳频信号的检测之上,详细推导了近似 l_0 范数稀疏重构算法,然后根据跳频信号和干扰信号在时频图上形态的差异,运用形态学滤波方法去除干扰,最后通过统计匹配信号的个数完成跳频信号的检测。仿真实验表明本文算法适用于多跳频信号的检测,能够在低信噪比条件下去除干扰获得清晰的时频图,完成跳频信号的检测。

参考文献(References):

- [1] 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)
- [2] 沙志超.单/多通道跳频信号侦察处理关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013.
SHA Z C, Research on the Key Processing Technologies for the Reconnaissance of FHSS Signals with Single or Multiple Channels [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] POLYDOROS A, KAI W. LPI Detection of Frequency Hopping Signals Using Autocorrelation Techniques [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 3(5): 714-726.
- [4] HINEDI S, POLYDOROS A. DS/LPI Autocorrelation Detection in Noise Plus Random-tone Interference [C]// Military Communications Conference, 1988. Milcom 88, Conference Record. Century Military Communications—What's Possible? IEEE, 1990: 443-447.
- [5] MILLER L E, LEE J S, TORRIERI D J. Frequency-hopping Signal Detection Using Partial Band Coverage [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1993, 29(2): 540-553.
- [6] DILLARD R A. Detectability of Spread-Spectrum

- Signals [J]. Transactions on Aerospace & Electronic Systems IEEE, 1979, AES-15(4): 526-537.
- [7] LUAN H, JIANG H. Blind Detection of Frequency Hopping Signal Using Time-Frequency Analysis [C]// International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. IEEE, 2010: 1-4.
- [8] LUO S E, LUO L Y. Adaptive Detection of an Unknown FH Signal Based on Image Features [C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. IEEE, 2009: 1-4.
- [9] 李琰,李天昀,葛临东.一种基于图像分割和模板匹配的短波跳频信号盲检测算法[J].信息工程大学学报,2010,11(6):756-761.
LI Y, LI T Y, GE L D. Blind Detection of High Frequency FH Signals Based on Image Segmentation and Template Matching [J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(6): 756-761. (in Chinese)
- [10] 贾宏雷,江桦.基于形态学处理的短波跳频信号宽带时频检测算法[J].信息工程大学学报,2013,14(2):173-179.
JIA H L, JIANG H. Wideband Time-Frequency Detection Algorithm of Short-Wave Frequency Hopping Signals Based on Morphology Processing [J]. Journal of Information Engineering University, 2013, 14(2): 173-179. (in Chinese)
- [11] 古培,王斌.基于二次灰度形态学滤波的跳频信号盲检测[J].信息工程大学学报,2015,16(1):79-83.
GU P, WANG B. Blind Detection Method of FH Signals Based on Twice Gray-Level Morphological Filtering [J]. Journal of Information Engineering University, 2015, 16(1): 79-83. (in Chinese)
- [12] 赵方超,蒋建中,郭军利,等.基于自适应形态学边缘检测的时频检测算法[J].计算机应用与软件,2014,31(9):279-282.
ZHAO F C, JIANG J Z, GUO J L, et al. Time-Frequency Detection Algorithm Based on Adaptive Morphological Edge Detection [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(9): 279-282. (in Chinese)
- [13] LIU F, MARCELLIN M W, GOODMAN N A, et al. Compressive Sampling for Detection of Frequency-Hopping Spread Spectrum Signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(21): 5513-5524.
- [14] BROWN C, KOWALSKE K, ROBERTSON C. Detection of Frequency-hopped Waveforms Embedded in Interference Waveforms [C]// IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2005: 2973-2978.
- [15] AMALDI E, KANN V. On the Approximability of Minimizing Nonzero Variables or Unsatisfied Relations in Linear Systems [J]. Theoretical Computer Science, 1998, 209(1-2): 237-260.
- [16] 王军华,黄知涛,周一宇,等.基于近似 l_0 范数的稳健稀疏重构算法[J].电子学报,2012,40(6):1185-1189.
WANG J H, HUANG Z T, ZHOU Y Y, et al. Robust Sparse Recovery Based on Approximate l_0 Norm [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1185-1189. (in Chinese)