

# 稀疏分解在跟踪干扰信号特征提取中的应用

闫云斌 全厚德 崔佩璋

(军械工程学院信息工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘 要:** 针对跳频通信中跟踪干扰识别特征提取问题, 提出了一种基于稀疏分解的跟踪干扰特征提取方法。简要介绍了稀疏分解的基本原理。根据跟踪干扰信号与跳频信号比较在时域存在时间延迟, 在频域幅值大于跳频信号幅值的特点, 通过对跳频信号和跟踪干扰信号进行重构, 获得能表明两者之间显著差异的特征参数。仿真实验表明, 该方法提取的特征参数, 在信噪比大于 5dB 时, 对跟踪干扰的识别率达到 95% 以上, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 稀疏分解; 跳频信号; 跟踪干扰信号; 特征提取; 时间延迟; 信号重构

**中图分类号:** TN914.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2012)12-1714-07

## Application of Sparse Decomposition in Feature Extraction for Follower Jamming Signals

YAN Yun-bin QUAN Hou-de CUI Pei-zhang

(Information Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** A novel method is presented for feature extraction of follower jamming signals by using sparse decomposition technique. The basic principles of sparse decomposition are introduced. According to the difference of time delay in the time domain and amplitude in the frequency domain between the frequency hopping (FH) signals and follower jamming (FJ) signals, the marked difference feature extraction is obtained when the FH signals and FJ signals are reconstructed. The simulation results show that the recognition rate of FJ can achieve 95% when the SNR is greater than 5dB, and the feasibility and effectiveness of the method is verified.

**Key words:** sparse decomposition; frequency-hopping signals; follower jamming signals; feature extraction; time delay estimation; signal reconstruction

### 1 引言

跳频通信因其良好的抗干扰性、低截获概率及组网能力,在战术通信中得到了广泛的应用。一般跳频信号的载波可以按照预先设定的频表随机跳变,从而有效的躲避敌方的干扰。但是当干扰信号与跳频信号频率相同,形成跟踪干扰时,仍然会对跳频通信造成很大的威胁<sup>[1]</sup>。针对跳频通信跟踪干扰的抑制技术,文献[2]利用天线调零技术和跳频技术相结合来抑制跟踪干扰;在此基础上,文献[3]提出将数字波束形成和跳频通信相结合,通过空域滤波,将信号和干扰分离,从而提高系统的抗跟踪干扰性能;但是,由于跳频载波频率变化会引起波束指向偏差,导致在期望方向产生

波束增益损失,使得系统存在相关干扰时,自适应波束形成在相关干扰方向中的零陷能力下降,为此,文献[4]提出了一种基于相位补偿和空间平滑的跳频通信干扰抑制方案,对跟踪干扰具有较好的零陷抑制能力。而跟踪干扰抑制的前提是对跟踪干扰信号进行特征提取,以识别出跟踪干扰信号。针对干扰信号的识别,相关研究主要集中在雷达辐射源信号的识别<sup>[5]</sup>和直扩系统中干扰类型的识别<sup>[6]</sup>,而针对跳频通信中跟踪干扰识别问题,在公开的文献中还鲜有报道。

对信号的特征提取通常借助时频分析手段,如 Wigner-Ville 分布(Wigner-Ville distribution, WVD)、小波变化<sup>[7]</sup>等时频分析方法,但是当频率随时间非线性变化时,WVD 会出现严重的交叉项干扰,而小波变化

等时频分析方法的性能与采样率、分析频带的选择有关,缺乏自适应性。近几年来,随着稀疏分解理论的逐步完善,其在信号处理领域的优势逐渐体现出来。稀疏分解的目的是从一个过完备的矢量集(或函数集)中选择尽量少的元素来表示已知信号。稀疏分解不仅能够得到信号精确的时频分布,同时不会产生交叉项干扰,所以被广泛的应用于多分量信号的时频分析<sup>[8-9]</sup>,跳频信号和跟踪干扰信号可以看成多个信号分量的线性组合,因此,可以采用稀疏分解对跳频信号和跟踪干扰信号进行特征提取。

依据稀疏分解理论,对跳频信号和跟踪干扰信号进行多参数的稀疏分解,可以在时频域提取其细微特征参数,包括稀疏系数与选取的主要原子参数集。特别针对跳频通信中的跟踪干扰,由于该类干扰与跳频信号在时频域均相同或近似,只有通过找出两者在特征参数空间的细微差异才能辨识出。因此采用稀疏分解是解决这一问题的有力手段。

## 2 稀疏分解理论简介

设  $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M]$  为一个过完备集,称为词典,满足  $\text{rank}(\Phi) = N < M$ ; 其中  $\phi_i \in R^N (i=1, 2, \dots, M)$  称为原子,一般表征具有物理意义的信号。对于给定的观测信号  $s \in R^N$ , 可以用  $\Phi$  中的部分原子线性表示,即使得

$$\Phi \alpha = s \quad (1)$$

其中  $\alpha \in R^M$  为稀疏表示系数向量。式(1)存在无穷多个解,稀疏分解的目的就是通过寻找非零元素最少的稀疏表示向量  $\alpha$ , 即求解

$$\min_{\alpha \in R^M} \|\alpha\|_0 \quad \text{s.t. } \Phi \alpha = s \quad (2)$$

这是一个 NP 难题。一般地,由于  $l_0$ -范数不稳健,常采用  $l_1$ -范数的 BP 算法<sup>[10]</sup>, 或者采用稀疏度量  $d(\cdot)$  来逼近  $\|\cdot\|_0$ , 从而获得稀疏解<sup>[11]</sup>。

## 3 跳频通信跟踪干扰信号的特征提取

### 3.1 跟踪干扰信号的时域信号模型

跳频信号是一类载频在伪随机序列控制下随时间变化的非平稳信号,在接收端,设在观察时间  $L$  内跳频接收机共接收到  $M$  跳信号,则接收到的信号可以表示为

$$s(t) = \sqrt{2S} \sum_{k=1}^M m_i(t) \text{rect}_{T_H}(t - kT_H - t_1) \exp(j2\pi f_k(t - kT_H - t_1) + j\theta_k) + n(t), 0 < t \leq L \quad (3)$$

其中  $S$  信号功率,  $m_i(t)$  是经过基带调制的传输数据,  $f_k$  和  $\theta_k$  是第  $k$  跳的载波频率和相位,  $T_H$  是跳频信号驻留时间,而  $M$  为观测时间内产生的跳频频点数,  $n(t)$  为高斯白噪声,  $\text{rect}_{T_H}$  为宽度为  $T_H$  的矩形窗。

$$\text{rect}_{T_H}(t) = \begin{cases} 1, & t \in (-T_H/2, T_H/2) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$t_1$  是第一个跳变时刻,则第  $k$  个跳变时刻为  $t_1 + (k-1)T_H$ 。

跟踪干扰是指干扰信号能跟踪跳频信号频率跳变的一种干扰方式,由于和跳频信号在时域和频域特征相吻合,其主要区别主要体现在时间延迟和调制信号的不同。因此判断跳频通信存在跟踪干扰,时间延迟是一个很重要的特征参数。假如在第  $j$  跳跟踪干扰跟踪上了跳频信号,那么其数学模型可以如下式所示。

$$s_j(t) = \sqrt{2J} \text{rect}_{T_H}(t - kT_H - t_1 - \tau) m_j(t) \exp(j2\pi f_k(t - kT_H - t_1 - \tau) + j\varphi_k), 0 < t \leq L \quad (5)$$

式中  $J$  为干扰信号功率,  $m_j(t)$  为跟踪干扰在基带调制后的干扰信号,  $f_k$  是捕获侦察到的跳频信号的载频,  $\tau$  为线性时延函数,由两部分组成,一部分是是干扰机的反应时间(含侦察引导或转发),另一部分为跳频信号从发射机到干扰机,干扰机到跳频接收机的传输时间与跳频发射机到接收机时间之差。由式(5)可知,如果在  $L$  内,得到的每跳信号均存在一个时延,而时延满足  $0 < \tau \leq T_H$  那可以判断该跳频通信中可能存在跟踪干扰,结合其他特征参数,即可判断该跳频通信存在跟踪干扰。

### 3.2 基于稀疏分解理论的跟踪干扰信号时延估计

跟踪干扰在形成条件中存在距离速度等多维局限性,使得跟踪干扰只能在一定的地域内起作用,称为干扰椭圆<sup>[12]</sup>, 由于干扰椭圆可知,跳频信号和跟踪干扰信号一般来自不同的方向,因此如果存在跟踪干扰,假定跳频信号和相关干扰信号的入射角经过波达方向估计(Direction of Arrive DOA)获得,这样采用自适应天线技术,可以在空域把跳频信号和跟踪干扰信号分开处理,这是跟踪干扰识别的前提。

图 1 给出了对相关干扰信号时间延迟的估计,分析图 1,来自  $K$  个天线阵元的跳频信号和相关干扰信号,首先经过宽带信号 DOA 估计,得到跳频信号和其他干扰信号的入射角,通过波束控制器,分别使得天线的主瓣方向对准感兴趣的信号,而将零点方向对准需要抑制的信号方向,把跳频信号和相关干扰信号在空域分离开。

分别对空域分离后的信号进行稀疏分解完成信号的重构,获得相对应的跳频信号载波频率  $f_0(k)$  和时间

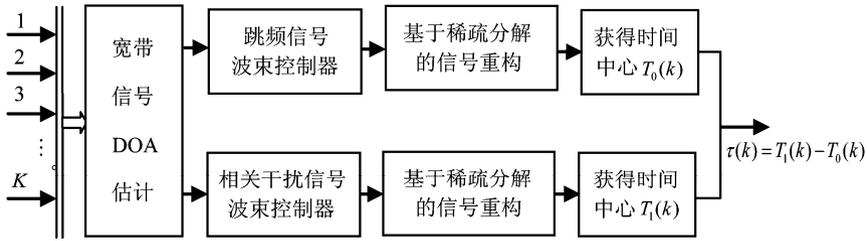


图1 基于稀疏分解的跟踪干扰信号时延估计框图

Fig.1 Block diagram of time delay to FJ signals based on the sparse decomposition

中心  $T_0(k)$ ,  $k=1, 2, \dots, M$ , 为  $L$  内的第  $k$  跳信号, 以及跟踪干扰信号的载波频率  $f_1(m)$  和时间中心  $T_1(m)$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ , 如果跟踪干扰信号中存在该载波频率即  $k=m$ , 那么对应的时间中心之差为估计出来的第  $k$  跳信号存在的时延, 即  $\tau(k) = T_1(k) - T_0(k)$ 。

如果跟踪干扰对跳频通信起作用, 必然存在  $L$  内跳频信号的时延存在  $0 < \tau(k) \leq T_H$ , 这为寻找特征参数提供了依据。如果在  $L$  内通过稀疏分解重构信号得到的跳频信号和相关干扰信号均存在时延而且满足  $0 < \tau(k) \leq T_H$ , 那么可以判定, 跳频信号可能存在跟踪干扰或多径干扰。

跟踪干扰和多径干扰与跳频信号相比较均存在时延, 但是多径干扰存在快衰落的特征<sup>[13]</sup>, 因此在接收端其频谱幅值小于跳频信号。而跟踪干扰一般情况下, 敌方干扰机会做放大处理, 因此在接收端其频谱幅值一般大于跳频信号频谱幅值。通过求取跳频信号和相关干扰信号的频谱, 如果相关干扰信号的频谱幅度大于跳频信号的频谱幅值, 则可以判断, 此时相关干扰信号为跟踪干扰信号。

对时延估计的前提是对跳频信号, 或者跟踪干扰信号进行重构, 因此问题分析的关键转换成了对跳频信号或者跟踪干扰信号进行准确的重构。而跟踪干扰信号在形成过程中, 首先对跳频信号的载频进行截获, 然后在该频点上施加跟踪干扰, 因此跟踪干扰的重构类似于跳频信号。跳频信号的每一跳可以看成是时域不重叠有限长的正弦信号<sup>[9]</sup>, 因此在接收端得到的信号在  $L$  可以看成是时域不重叠有限长正弦信号的线性叠加。

在信号的稀疏分解中, 原子的选取、字典的构造, 求解算法的设计三个问题是利用稀疏分解求解的关键。其中字典的构造一般是从信号中学习得到的, 应该根据信号的先验信息及实际需要设计字典。跳频信号的重构由三个参数决定, 时间中心  $T_k$ 、载波频率  $f_k$  和跳频信号驻留时间  $T_H$ , 由于本文研究的范围属于合作方通信, 因此跳频信号驻留时间是已知的。为了更好的实现跳频信号的重构, 本文根据跳频信号的特点

选取了信号单位能量的加窗正弦函数作为过完备库中的原子, 具体如式(6)所示:

$$\begin{cases} g_k(t) = \text{rect}_{T_H}(t - T_k) \exp(2\pi f_k(t - T_k)) \\ s_k(t) = g_k(t) / \sqrt{\|g_k(t)\|^2} \end{cases} \quad (6)$$

$f_k$  表示正弦函数对应的频率, 其取值为跳频信号所处的频段内所有的跳频频点数  $N_f$ ,  $T_k$  为对应的第  $k$  跳信号的时间中心, 其中  $T_k \in [0, T_H/2]$ , 按照需要的精度均匀取值  $k=1, 2, \dots, N_f$ ,  $N_f$  决定搜索精度,  $N_f$  越大搜索精度越高, 而  $N_f$  的精度则由采样间隔  $T_s$  决定(其中  $T_s = 1/f_s$ ,  $f_s$  为时域的采样频率)。整个原子库的原子个数为  $M = N_f \cdot N_t$ , 据式(6)扩展构建如下的稀疏基。

$$\boldsymbol{\psi} = [s_1(t), s_2(t) \dots s_k(t) \dots s_M(t)] \quad (7)$$

假设  $\alpha_k$  为第  $k$  跳信号对应的复包络, 记  $\boldsymbol{\alpha}$  如下式所示

$$\boldsymbol{\alpha}^T = [\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_k \dots \alpha_M] \quad (8)$$

当  $L$  内不存在某跳信号时  $\alpha_k = 0$ 。由于在  $L$  内跳频信号出现的次数仅是很小一部分, 所以  $\boldsymbol{\alpha}$  中非零元素个数  $K$  远远小于原子库中原子的个数  $M$ 。那么, 式(3)可以描述为

$$s(t) = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} + n_i(t) \quad (9)$$

依据稀疏分解理论, 由跳频信号接收端采样信号估计稀疏系数  $\boldsymbol{\alpha}$  的问题即转化为一般的信号稀疏分解问题, 可以描述为:

$$\min_{\boldsymbol{\alpha} \in R^N} f(\boldsymbol{\alpha}) \quad \text{s.t. } y(t) = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\alpha} + n_i(t) \quad (10)$$

其中  $f(\boldsymbol{\alpha})$  表示稀疏度量函数, 可以选择  $f(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{i=1}^M \ln(1 + \alpha_i^2)$ , 根据式(10), 通过采样获得测量值  $y(t)$  后, 应用推广的正则化 FOCUSS 算法<sup>[11]</sup> 可将稀疏基  $\boldsymbol{\psi}$  中的系数  $\boldsymbol{\alpha}$  重建出来, 对应的在原子库中得到载波频率和时间中心, 从而实现跳频信号的重构。

分别对跳频信号和相关干扰信号进行重构后可知, 对应的时延, 即为相同跳频载波下时间中心之差, 而稀疏重建系数  $\boldsymbol{\alpha}$  对应的非零值, 即为对应跳频频点上的频谱最大幅值。

综上所述,基于稀疏分解的跳频通信跟踪干扰特征提取方法可总结如下:

Step1: 从阵列天线上接收到信号进行辐射源 DOA 估计和波束形成,通过空域滤波,使得跳频信号和相关干扰信号在空域分离。

Step2: 采用稀疏分解理论,通过估计的非零稀疏表示系数  $\alpha$  所在的位置,分别实现跳频信号和相关干扰信号的重构。

Step3: 在跳频信号和相关干扰信号重构后,获得重构信息中相同载波频率对应的时间中心,其中时间中心之差  $\tau(k)$  即为第  $k$  跳信号对应的时延。而非零表示系数  $\alpha$  的值即为对应跳频频点上的频谱最大幅值。

Step4: 如果在观测时间内每跳信号的时延均满足  $0 < \tau(k) \leq T_n$ ,且相关干扰信号的幅度信息大于跳频信号,可以判断存在跟踪干扰。

## 4 仿真结果及分析

假设该跳频通信工作在超短波频段,设置工作频段为 30 ~ 88MHz,其中频率间隔为 25kHz,共有 2320 个跳频频点,跳速为 200Hop/s,跳频周期为 0.005s,其中跳频驻留时间为 0.004s,换频时间为 0.001s。在某一

观测时间内接收端在跳频信号波束控制器得到的跳频信号包含 4 跳完整的信号,其中跳频信号样本的跳频频率分别为 35MHz、37.5MHz、42.5MHz 和 40MHz,此时设定接收到的跳频信号的归一化幅度为 1。假定该跳频信号存在跟踪干扰,对应的跟踪干扰信号分别在 35MHz、37.5MHz、42.5MHz 和 40MHz 频点上存在时延,且时延均为 1ms,幅度为 2。在仿真过程中,由于跳频工作的频率很高,在 MHz 数量级上,仿真时采样频率要达到 200MHz 以上,因此本文在仿真过程中,在不对仿真结果产生影响的基础上,适当把载波频率和跳频点的频率等比例降低到 kHz 数量级上,可以提高仿真速度。采样频率为 200kHz。噪声采用零均值的高斯白噪声,在噪声存在情况下,正则化参数的选择和信噪比有关,具体的值可以根据 L-曲线准则估计出<sup>[14]</sup>。

### 4.1 跟踪干扰信号识别特征提取

分别对波束控制器得到的信号进行重构,在高斯白噪声情况下,当信噪比为 10dB 时,利用推广的正则化 FOCUSS 算法在接收端对含有噪声的跳频信号和跟踪干扰信号进行重构。图 2 和图 3 分别给出了跳频信号和跟踪干扰信号以及重构的一次实现下的时域波形图和重构后的跳频信号和跟踪干扰频谱图。

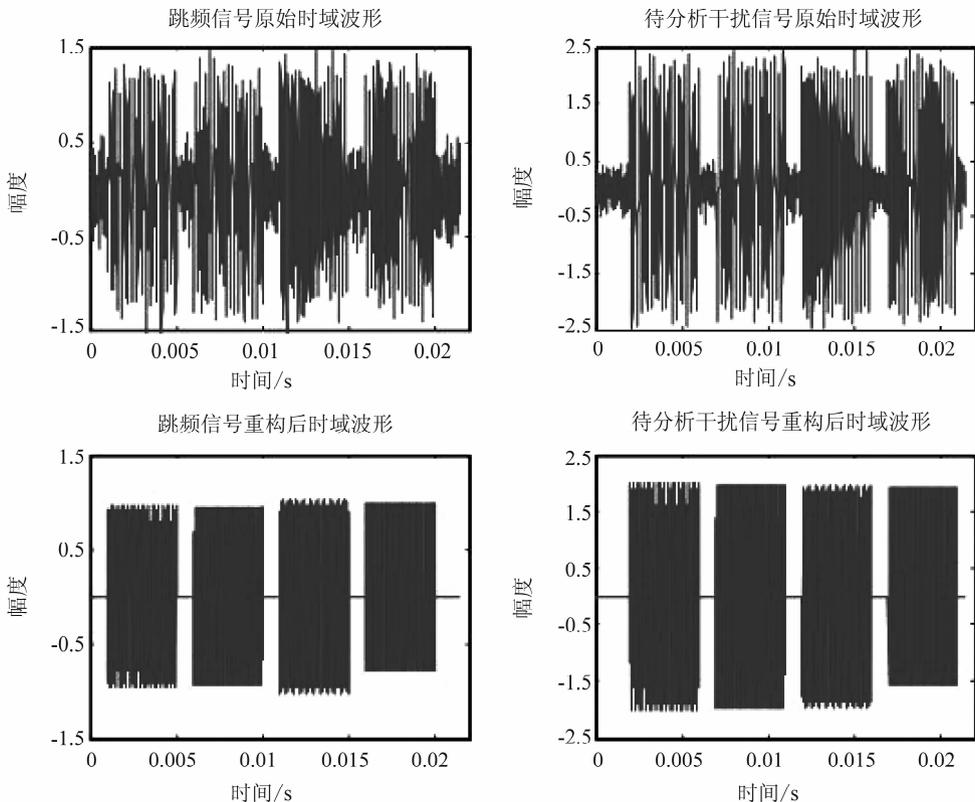


图 2 SNR = 10dB 跳频信号和跟踪干扰信号及重构后的时域图

Fig. 2 The original and reconstruction time domain diagram of FH signal and FJ signal at SNR = 10dB

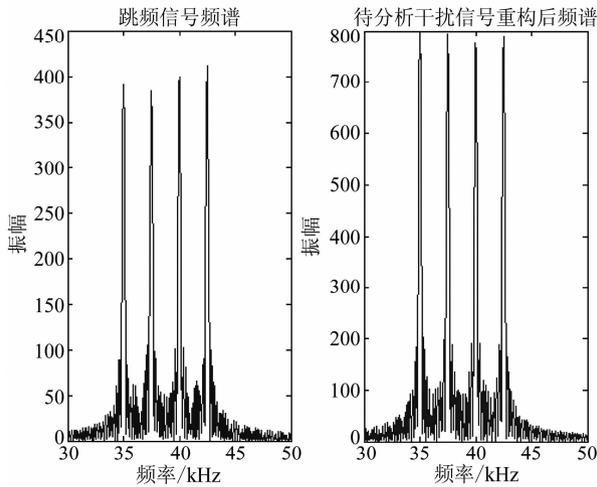


图3 SNR=10dB时跳频信号和跟踪干扰信号重构后频谱  
Fig.3 The original and reconstruction frequency domain diagram of FH signal and FJ signal at SNR=10dB

由图2可知,跳频信号和干扰信号在待分解的四个跳频频点上对应的时间中心为  $T_0(k) = [0.003, 0.008, 0.013, 0.018]$  和  $T_1(k) = [0.004, 0.009, 0.014, 0.019]$  (单位/s),而时间延迟即为两个对应频点上的时间中心之差,从图2可以明显的看出,使用该方法可以实现跟踪干扰信号时延的精确估计。而从图3中可

以明显的看出,跟踪干扰信号的频域幅值明显大于跳频信号的幅值,而每个频点频谱幅值的最大值即为跳频信号和跟踪干扰信号的每跳信号重构中的稀疏重建系数,其中跳频信号为  $[0.98, 0.96, 1.02, 0.99]$ ,跟踪干扰信号为  $[1.99, 1.98, 1.97, 1.93]$ 。

当信噪比为5dB时,图4和图5分别给出了跳频信号和跟踪干扰信号以及重构的一次实现下的时域波形图和重构后的跳频信号和跟踪干扰频谱图。由图4和图5看出,当信噪比为5dB时,该方法仍然能够精确的估计出时延,同时重构后的跟踪干扰信号幅度也大于跳频信号幅度。

从图2~图5可知,如果跳频信号存在跟踪干扰,那么满足两个特征,即跳频信号每跳信号时延满足  $0 < \tau(k) \leq T_H$ ,跟踪干扰的频谱最大幅值,即信号的稀疏分解系数大于跳频信号的稀疏分解系数。

为了验证所提取的特征参数的有效性,应用统计决策方法对分别接收到的信号进行识别。根据上述仿真的条件,在干信比一定的条件下,信噪比以1dB为步长从0dB变化至25dB,每个不同的SNR下Monte Carlo实验次数为100次,分别经过稀疏分解方法对得到的信号进行重构,得到跟踪干扰信号识别的两个特征参数,图6

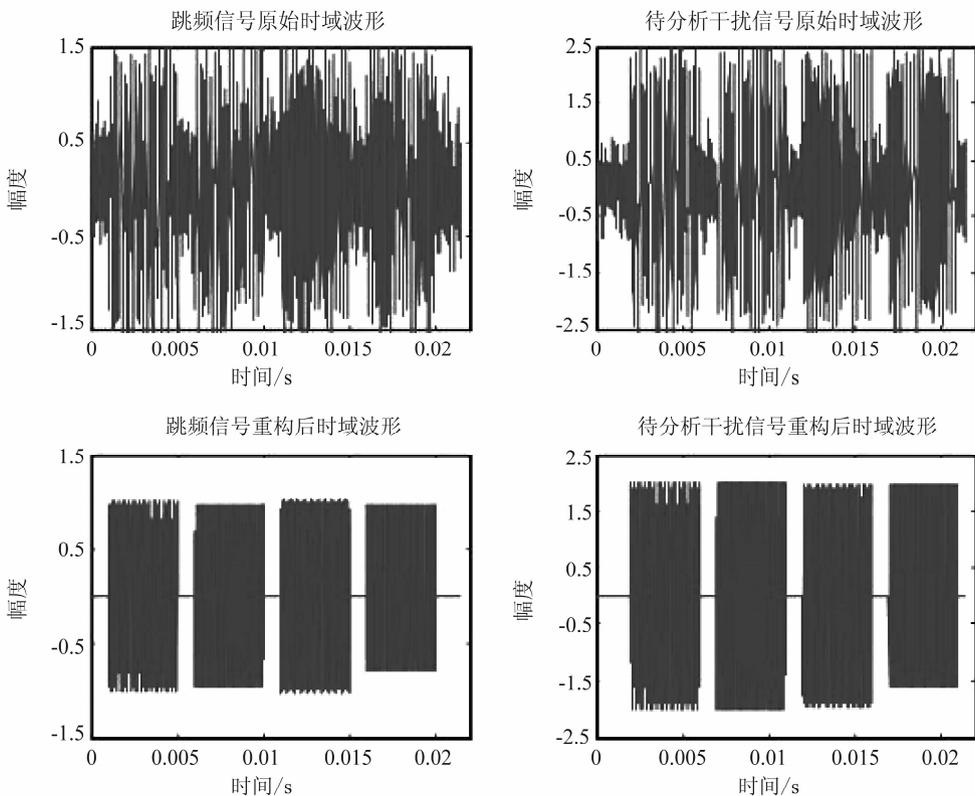


图4 SNR=5dB跳频信号和跟踪干扰信号及重构后的时域图

Fig.4 The original and reconstruction time domain diagram of FH signal and FJ signal at SNR=5dB

给出了跟踪干扰识别的性能曲线,如从图 6 可以看出,在 SNR 大于 5dB 时,识别率达到 95% 以上。

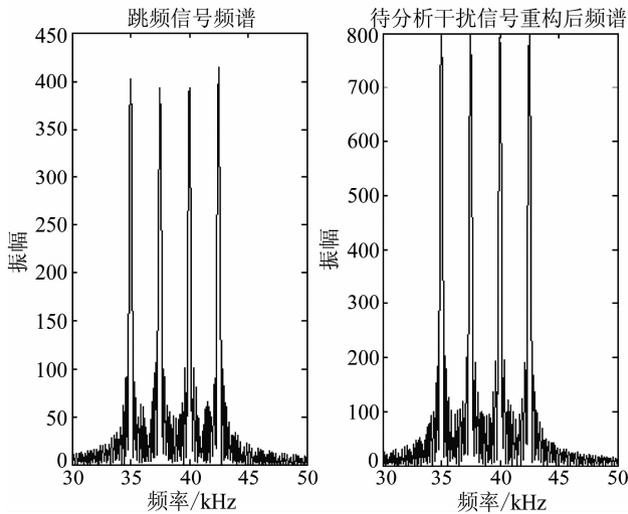


图 5 SNR=5dB 时跳频信号和跟踪干扰信号重构后频谱图

Fig. 5 The original and reconstruction frequency domain diagram of FH signal and FJ signal at SNR=5dB

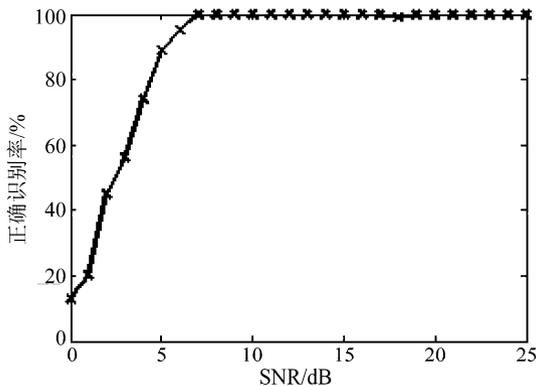


图 6 跟踪干扰识别性能曲线

Fig. 6 The relation of recognition probability of FJ

## 5 结论

将稀疏分解理论应用于跳频通信对抗领域,利用跳频信号和跟踪干扰信号辐射方向的不同,采用自适应天线技术,在空域把信号分离,然后根据跟踪干扰信号和跳频信号比较,在时域存在时延和在频域跟踪干扰信号的最大幅值大于跳频信号幅值的特点,采用稀疏分解理论分别对跳频信号和跟踪干扰信号进行重构,得到了表明跳频信号和跟踪干扰信号两者之间的显著差异的特征参数,为进一步自动识别跳频通信中跟踪干扰打下基础。仿真结果表明,当 SNR 大于 5dB 时,对跟踪干扰的识别率达到了 95% 以上。理论分析和仿真实验验证了该方法的可行性和有效性。

## 参考文献

- [1] Chiho Lee, Unseob Jeong, Performance of follower noise jammers considering practical tracking parameters [C]. 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference, 2006 (6): 61-65.
- [2] Eken F, Use of antenna nulling with frequency-hopping against the follower jammer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(9): 1391-1397.
- [3] 段志强, 张林让, 朱永春. 基于自适应天线的跳频系统干扰抑制方法 [J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 296-299.  
DUAN Zhi-qiang, ZHANG Lin-rang, ZHU Yong-chun. A jamming rejection method for FH system based on adaptive antenna [J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE, 2004, 19(6): 296-299. (in Chinese)
- [4] 尚佳栋, 王祖林, 郭旭静等. 基于二维虚拟空间平滑算法的跳频通信系统跟踪式干扰抑制研究 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1193-1197.  
SHANG Jia-dong, WANG Zu-lin, GUO Xu-jing, et al. Research of tracking interference suppression in FH system based on two-dimensional virtual space smoothing algorithm [J]. Journal of Electronics & Information technology, 2011, 33(5): 1193-1197. (in Chinese)
- [5] 孙闽红, 唐斌. 基于原子分解理论的雷达欺骗式干扰信号特征提取 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 550-555.  
SUN Min-hong, TANG Bin. Feature extraction of radar deceptive-jamming signal based on atomic decomposition [J]. Chinese journal of radio science, 2008, 23(3): 550-555. (in Chinese)
- [6] YANG Xiao-ming, TAO Ran. An automatic interference recognition method in spread spectrum communication system [J]. Journal of china ordnance, 2007, 3(3): 215-220.
- [7] 任春辉, 魏平, 肖先赐. 改进的 Morlet 小波在信号特征提取中的应用 [J]. 电波科学学报, 2003, 18(6): 633-637.  
REN Chun-hui, WEI Ping, XIAO xian-ci. Application of modified Morlet wavelet in feature extraction [J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE, 2003, 18(6): 633-637. (in Chinese)
- [8] Lopez-Risueno, G, Grajal, J, Yeste-Ojeda, O. Atomic decomposition based radar complex signal interception [J]. IEEE. Proc. -Radar Sonar Navigation, 2003. 150(4):

323-331.

- [9] 范海宁, 郭英. 一种新的跳频信号参数盲估计算法[J]. 信号处理, 2009, 25(11): 1754-1759.  
FAN Hai-ning, GUO Ying. A novel blind parameter estimation algorithm of frequency-hopping signals[J]. Signal Processing, 2009, 25(11): 1754-1759. (in Chinese)
- [10] Chen S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM Review, 2001, 43(1): 129-159.
- [11] 杜小勇, 胡卫东, 郁文贤. 推广的正则化 FOCUSS 算法及收敛性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 922-925.  
DU Xiao-yong, HU Wei-dong, YU Wen-xian. Generalized regularized FOCUSS algorithm and its convergence analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 922-925. (in Chinese)
- [12] DON J. TORRIERI. Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency-Hopping Communications [J]. IEEE Journal on Selected areas in Communications, 1990, 7(4), 569-575.
- [13] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社. 2008.
- [14] Johnston, P. R, Gulrajani, R. M. Selecting the corner in

the L-curve approach to Tikhonov regularization [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(9): 1293-1296.

### 作者简介



闫云斌(1984-), 男, 山西朔州人, 博士生, 研究方向为跳频通信系统干扰识别及抑制。E-mail: zkjysybyb@163.com



全厚德(1963-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为通信设备性能测试。



崔佩璋(1974-), 男, 山西长治人, 硕士, 讲师, 研究方向为信息与通信工程。