

基于滑窗和原子字典的压缩域跳频信号参数估计算法

付卫红 张云飞* 韦娟 刘乃安
(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

摘要: 现有跳频信号参数估计算法大多没有考虑跳频信号的结构特性,在低信噪比下存在计算复杂度高或估计精度低的缺点,针对这一问题,该文提出一种基于滑窗和原子字典的压缩域跳频信号参数估计算法。用滑窗法对所处理的跳频信号进行整周期滑动压缩采样,粗略估计出跳频信号的跳变时刻,以块对角化的傅里叶正交基作为稀疏基精确估计出跳变前后的频率,在此基础上构建可以表示跳频信号局部时频特性的原子字典,通过匹配追踪算法准确估计出跳频信号的跳变时刻。实验结果表明,该算法在显著降低信号采样数据量和计算复杂度的同时,保持了跳频信号参数的高精度估计。

关键词: 跳频信号; 压缩采样; 参数估计; 原子字典

中图分类号: TN914.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2600-07

DOI: 10.11999/JEIT170084

Parameter Estimation Algorithm for Frequency-hopping Signal in Compressed Domain Based on Sliding Window and Atomic Dictionary

FU Weihong ZHANG Yunfei WEI Juan LIU Naian
(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Most existing parameter estimation algorithms for Frequency Hopping (FH) signal do not consider the structural characteristics of FH signals, and have the disadvantages of high computational complexity or low estimation accuracy in low signal-to-noise ratio circumstance. To solve this problem, this paper proposes a parameter estimation algorithm for frequency hopping signal in compressed domain based on sliding window and atomic dictionary. The frequency hopping signal is acquired by sliding compression sampling, and hopping time is roughly estimated with sliding window method. The Fourier orthogonal basis of block diagonalization is used as sparse basis to estimate the frequency of the signal. An atomic dictionary, which can represent the local time-frequency characteristics of the frequency hopping signal, is constructed based on the estimated frequency and rough hopping time. Then the hopping time can be estimated accurately by the matching pursuit algorithm. Simulation results show that this algorithm can significantly reduce the sampling data and computational complexity, while maintaining the high accuracy estimation.

Key words: Frequency-hopping signal; Compressive sampling; Parameter estimation; Atomic dictionary

1 引言

由于跳频信号具有良好的抗干扰性、低截获性和易于组网等特点,因此在军事通信领域得到广泛应用^[1]。跳频信号参数估计在通信对抗中作为干扰、截获以及瓦解敌方正常通信的前提,成为亟待解决的问题。目前一般采用时频分析法^[2-6]和原子分解

法^[7-9]对跳频信号参数进行估计,但这两种算法均存在较大局限性。

时频分析法是基于时间和频率的联合函数来同时描述不同时间及频率下的信号能量密度或强度,其代表有 STFT^[2]和 Wigner-Ville 分布^[3-6]。其中 STFT 采用固定窗函数,时间、频率分辨率均受窗长约束,不能同时得到优化。Wigner-Ville 分布在对多分量信号和频率非线性变化的单分量信号进行处理时,会产生交叉项,进而对信号分量的正确判断产生严重干扰。虽然基于平滑伪 Wigner-Ville 分布(SPWVD)的算法^[2]可以通过时频域的平滑来降低交叉干扰,但同时也降低了时间和频率的分辨率。

收稿日期: 2017-01-23; 改回日期: 2017-05-09; 网络出版: 2017-06-27

*通信作者: 张云飞 1368919836@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61201134), 高等学校学科引智计划(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61201134), 111 Project (B08038)

此外, 当信噪比低于某个阈值时, 时频分析法对跳频信号参数估计的精确度明显降低。

原子分解法能够将待分析信号在冗余原子字典里分解成若干原子的组合, 从而得到信号的稀疏表示。利用获得的原子组合, 结合参数估计算法就可以实现跳频信号参数估计。范海宁等人^[7,9]在此原理基础上建立了符合跳频信号结构的三参数冗余原子字典, 该方法能够在较低信噪比条件下实现高精度参数估计, 但是迭代停止条件难以确定, 选择不当极易影响估计精度; 此外, 建立的冗余原子字典规模一般较大, 使得估计算法的复杂度很高。

另外跳频信号是一种典型的稀疏信号, 将压缩感知理论^[10-12]应用于跳频信号参数估计^[13-16]可以有效解决跳频信号侦查中高带宽带来的高采样率和海量数据处理问题, 例如, 基于压缩感知的跳频信号跳变时刻估计算法^[14], 该算法在跳周期已知的情况下, 对跳频信号进行整周期滑动压缩采样, 计算出信号在傅里叶正交基上前两个权值最大的稀疏系数, 并由此对前后两跳的持续时间进行判断, 进而估计跳变时刻。与时频分析法相比, 该算法的估计精度有所提升, 但与原子分解法相比, 参数估计精度还存在一定差距。

面对上述问题, 本文旨在将压缩感知理论和原子分解估计算法联合应用到跳频信号参数估计中, 提出了一种新的跳频参数估计算法, 该算法在跳频周期已知时, 不需要对跳频信号进行重构, 只利用压缩测量值就可以实现对跳频信号参数的估计, 以期在不增加计算复杂度的前提下实现较高估计精度。

2 跳频信号模型

跳频信号是一类载频受伪随机序列控制的非平稳信号, 可以表示为

$$s(t) = \sqrt{2S} \sum_k \text{rect}_{T_H}(t - kT_H - t_1) \cdot e^{j2\pi f_k(t - kT_H - t_1) + j\theta_k} + n(t), \quad 0 < t < L \quad (1)$$

其中, L 为观测时间, $n(t)$ 为高斯白噪声, S 为信号功率, $\text{rect}_{T_H}(t)$ 为宽度为 T_H 的矩形窗, T_H 为跳频周期, f_k 为第 k 跳的中心频率, θ_k 为第 k 跳的相位, t_1 为第 1 个跳变时刻。

在对跳频信号参数进行估计时, 每次处理的都是一个跳频周期长度的信号。所以仅考虑一个单周期跳频信号模型, 其离散化数学模型为

$$S_p(n) = \begin{cases} e^{j2\pi f_1 n T_s + j\theta_1}, & n = 1, 2, \dots, K \\ e^{j2\pi f_2 (n-K) T_s + j\theta_2}, & n = K + 1, K + 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

其中, T_s 为采样周期, N 为一个跳频周期的采样点数, K 为频率跳变点, f_1 和 f_2 分别为跳变前后的频率。观察式(2)可得到, 单周期长的跳频信号 S_p 一共有 N 个采样点, 其中在频点 f_1 上有 K 个样点, 在频点 f_2 上有 $N - K$ 个样点。

3 算法原理

用滑窗法对接收到的跳频信号进行整周期滑动压缩采样, 然后根据不同时刻相邻两跳信号窗函数的特点, 计算信号在傅里叶正交基上前两个权值最大的稀疏系数并确定其对应位置, 由此对前后两跳持续时间进行判断, 实现跳频信号跳变时刻的粗略估计。在粗估计出跳时的基础上, 建立块对角化的傅里叶正交基, 精确估计跳变前后的频率。以粗估计出的跳变时刻为中心选取精确估计跳变时刻所需的观测信号, 观测信号的长度要大于粗估计误差, 并且只包含一个跳变时刻, 依据观测信号的结构特点建立跳变时刻依次改变的时频原子字典, 然后采用相关运算的方法选择与观测信号最匹配的原子, 实现跳变时刻的精确估计。

3.1 基于滑窗的跳时粗估计

用窗函数可以将跳频信号 S_p 分解为长度为 N 的信号 S_{p1} 和 S_{p2} , 即

$$\left. \begin{aligned} S_{p1}(n) &= e^{j2\pi f_1 n T_s + j\theta_1} g_K(n) \\ S_{p2}(n) &= e^{j2\pi f_2 n T_s + j\theta_2} g_{N-K}(n) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $g_K(n)$ 和 $g_{N-K}(n)$ 分别表示长度为 K 和 $N - K$ 的矩形窗函数。

S_{p1} 和 S_{p2} 在频域对应的傅里叶系数 $F_1(\omega)$ 和 $F_2(\omega)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} F_1(\omega) &= \frac{e^{j\theta_1}}{2\pi} K \text{Sa} \left(\frac{(\omega - \omega_1)K}{2} \right) \\ F_2(\omega) &= \frac{e^{j\theta_2}}{2\pi} (N - K) \text{Sa} \left(\frac{(\omega - \omega_2)(N - K)}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

所以信号 S_p 对应的傅里叶系数为

$$F(\omega) = \frac{e^{j\theta_1}}{2\pi} K \text{Sa} \left(\frac{(\omega - \omega_1)K}{2} \right) + \frac{e^{j\theta_2}}{2\pi} (N - K) \text{Sa} \left(\frac{(\omega - \omega_2)(N - K)}{2} \right) \quad (5)$$

S_p 在频点 ω_1 和 ω_2 处的傅里叶系数的模值是

$$\left. \begin{aligned} |F(\omega_1)| &= \frac{1}{2\pi} K \\ |F(\omega_2)| &= \frac{1}{2\pi} (N - K) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

信号 S_p 在频点 ω_1 和 ω_2 处的频谱泄露程度与矩形窗的宽度有关。由式(6)可得, 当且仅当 $K = N - K$, 即 $K = N/2$ 时, 信号 S_p 在频点 ω_1 和 ω_2 处

的傅里叶系数的模值相等且同时取得最大值。

根据上述原理设计一个长度为 N 观测窗, 使跳频信号从起始位置依次通过观测窗, 对观测窗内的信号进行压缩采样, 通过迭代的方法来选择最优原子以达到对观测窗内压缩采样信号的最优分解。首先将观测窗内的压缩采样信号与稀疏基矩阵的各列进行内积运算, 内积值最大时的列即为最优原子, 内积值即为对应原子的傅里叶系数, 将信号投影到这个原子上, 得到信号的残差向量; 然后将残差向量与压缩后的稀疏基的各列进行内积, 内积值最大时的列为与残差信号最匹配的原子的傅里叶系数。比较这两个傅里叶系数, 若相等, 则观测窗内的信号在其中点处发生跳变, 记录此时的滑动步长 τ 和滑动次数 u ; 若不等, 则向左滑动所需处理的跳频信号, 直到得到的两个权值最大的傅里叶系数相等。依据停止滑动时 $u\tau$ 和 $N/2$ 的关系确定跳变时刻的估计值。

$$\left. \begin{aligned} \hat{K} &= u\tau - N/2, & u\tau > N/2 \\ \hat{K} &= u\tau + N/2, & u\tau < N/2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3.2 跳时、跳频频率精确估计

3.2.1 跳频频率估计 由上节的分析可知, 单周期的跳频信号是 2 稀疏的, 接收到的跳频信号 S_p 可分解为两个分量 S_{p1} 和 S_{p2} , 分量 S_{p1} 包含频率 f_1 , 分量 S_{p2} 包含频率 f_2 。根据跳频信号频率和频率跳变时刻特性构造块对角化傅里叶正交基作为稀疏分解矩阵, 因为跳变时刻值 \hat{K} 已粗略估计出来, 所以构造 $\hat{K} \times \hat{K}$ 的傅里叶正交基 $\Psi_{\hat{K},1}$ 和 $(N - \hat{K}) \times (N - \hat{K})$ 的傅里叶正交基 $\Psi_{\hat{K},2}$, 利用矩阵 $\Psi_{\hat{K},1}$ 和 $\Psi_{\hat{K},2}$ 构造稀疏分解矩阵 $\Psi_{\hat{K}}$ 。

$$\Psi_{\hat{K}} = \begin{bmatrix} \Psi_{\hat{K},1} & \mathbf{0}_{\hat{K} \times (N - \hat{K})} \\ \mathbf{0}_{(N - \hat{K}) \times \hat{K}} & \Psi_{\hat{K},2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{0}_{(N - \hat{K}) \times \hat{K}}$ 为 $(N - \hat{K}) \times \hat{K}$ 的全 0 矩阵, $\mathbf{0}_{\hat{K} \times (N - \hat{K})}$ 为 $\hat{K} \times (N - \hat{K})$ 的全 0 矩阵。

频率估计过程与滑窗法中计算稀疏基上前两个最大的傅里叶系数的方法类似, 从起始位置取一个跳周期长度的信号, 对其进行压缩处理, 通过两次迭代得到所处理信号在构造的块对角化傅里叶正交基 $\Psi_{\hat{K}}$ 上的最优分解, 记录 $\Psi_{\hat{K},1}$ 和 $\Psi_{\hat{K},2}$ 上最优原子的位置 b_1, b_2 , 其即为频域系数向量非零值对应的位置, 并由此确定跳变前后的频率。

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= (b_1 - 1) \times f_s / \hat{K} \\ f_2 &= (b_2 - \hat{K} - 1) \times f_s / (N - \hat{K}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, f_1 是跳变前的频率, f_2 是跳变后的频率。

在滑窗过程中也可以通过确定前两个权值最大的傅里叶系数所在的位置实现跳频频率的估计, 但是该过程的稀疏基矩阵只反映了跳频信号的频域信息, 没有反映其时域信息, 所以这种方法的频率估计精度较低, 且不能确定估计出的频率的时间先后顺序。在下节的跳变时刻精确估计中构造的时频原子字典需要用到此时估计出的跳频频率, 所以此时的频率估计精度会影响下面跳变时刻的估计性能, 确定估计出的频率时间先后顺序也可以减小构建时频原子字典的规模。

3.2.2 基于原子字典的跳变时刻精确估计 以粗估计出的跳变时刻为中心选取精确估计跳变时刻所需的观测信号, 观测信号的长度要大于粗估计误差, 并且只能包含一个跳变时刻, 此时观测信号内的每个点都是可能的跳变点。选取的观测信号 $\mathbf{s} \in \mathbf{C}^{P \times 1}$ 在一组标准正交基 $[\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_P]$ 上是 2 稀疏的, 观测数据可表示为

$$\mathbf{s} = \Psi \mathbf{x} \quad (10)$$

进行压缩采样后可得

$$\mathbf{y} = \Theta \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{x} \quad (11)$$

其中, Φ 是高斯随机矩阵, $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_P]$ 是正交基或原子字典。

本文算法将 Ψ 设计为可以遍历到所有可能跳变时刻的时频原子字典, P 是精确估计过程所选观测信号的长度, 其大小会影响算法性能, 若长度过小, 会使真正的跳变点不在观测信号内, 影响估计精度; 若长度过大, 会增大构造原子字典的规模, 增加计算复杂度。实验表明, 观测信号长度为 0.15 倍跳周期时可以使算法在降低计算复杂度的同时保持高估计精度。观测信号中包含两个跳频频率, 跳变前后的频率已经通过上节方法估计出来, 且观测信号内的任意时刻都是可能的跳变时刻, 依次改变跳变点, 这样就构造出了符合跳频信号结构特点的时频原子字典。通常构造的原子字典中的原子只表示跳频信号的一跳, 即每个原子中只有一个跳频频率, 但是这样构造出的原子字典各列相关度很高, 原子字典中的原子与观测信号的内积最大值不一定在跳变时刻处^[8]。本文构造的原子字典的每个原子包含 1 个跳频周期内的全部信息, 即每个原子中包含跳变前后两个频率上的信号。假设观测信号的频率由 ω_1 跳变为 ω_2 , 依次改变跳变位置得到对应的原子, 构成原子字典 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{P-1}] \in \mathbf{C}^{P \times (P-1)}$, 其中第 p 个原子为

$$\Psi_p = \left[e^{j\omega_1 \times 1}, e^{j\omega_1 \times 2}, \dots, e^{j\omega_1 \times p}, e^{j\omega_2 \times 1}, e^{j\omega_2 \times 2}, \dots, e^{j\omega_2 \times (P-p)} \right]^T \quad (12)$$

考虑精确估计过程所选取的跳频信号 s 在时刻 K 由频率 ω_1 跳变为 ω_2 , 跳变前后的相位分别为 θ_1 和 θ_2 。则跳频信号可以表示为

$$s = \left[e^{j\omega_1 \times 1 + j\theta_1}, e^{j\omega_1 \times 2 + j\theta_1}, \dots, e^{j\omega_1 \times K + j\theta_1}, e^{j\omega_2 \times 1 + j\theta_2}, e^{j\omega_2 \times 2 + j\theta_2}, \dots, e^{j\omega_2 \times (P-K) + j\theta_2} \right] \quad (13)$$

将精确估计过程选取的跳频信号与原子字典的各个原子进行绝对相关运算, 选择与跳频信号最匹配的原子, 可得

$$\langle |s, \psi_n| \rangle = \begin{cases} \sum_{l=1}^n |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=n+1}^K |e^{j(\omega_1 - \omega_2)l + j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^P |e^{j\theta_2}|, & n < K \\ \sum_{l=1}^K |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^P |e^{j\theta_2}|, & n = K \\ \sum_{l=1}^K |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^n |e^{j(\omega_2 - \omega_1)l + j\theta_2}| + \sum_{l=n+1}^P |e^{j\theta_2}|, & n > K \end{cases} \quad (14)$$

当原子字典中原子的跳变时刻与观测信号的跳变时刻相等, 即 $n = K$ 时, 有

$$\sum_{l=1}^K |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^P |e^{j\theta_2}| = P \quad (15)$$

因为 $\omega_1 \neq \omega_2$, 所以当 $n < K$ 时, 有

$$\sum_{l=1}^n |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=n+1}^K |e^{j(\omega_1 - \omega_2)l + j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^P |e^{j\theta_2}| < P \quad (16)$$

同理, 当 $n > K$ 时, 有 $\sum_{l=1}^K |e^{j\theta_1}| + \sum_{l=K+1}^n |e^{j(\omega_2 - \omega_1)l + j\theta_2}| + \sum_{l=n+1}^P |e^{j\theta_2}| < P$ 。

通过上述分析可知, 在精确估计过程中, 跳频信号与原子字典中各个原子的绝对内积最大值应在跳变时刻处。

综上所述, 基于滑窗和原子分解的压缩域跳频信号参数估计算法步骤如下:

(1)初始化: 滑动次数 $u = 0$, 选择合适的滑动步长 τ 和终止门限 ξ ;

(2)滑动跳频信号使其依次通过长度为 N 的观测窗, 对观测窗内的跳频信号进行压缩采样, 用匹配追踪的方法计算出窗内压缩采样信号在频域上的前两个最大傅里叶系数 $F(j\omega_1)$ 和 $F(j\omega_2)$;

(3)若 $\left| \frac{F(j\omega_1)}{F(j\omega_2)} - 1 \right| < \varepsilon$, 则认为找到了两个幅值相同的傅里叶系数, 根据式(7)计算跳变时刻粗估计

值 \hat{K} ; 若不满足, 则令 $u = u + 1$, 向左滑动跳频信号, 继续进行步骤(2), 直到满足终止条件;

(4)建立以 \hat{K} 为分界点的块对角化的傅里叶正交基, 精确估计出跳变前后的频率 f_1 和 f_2 ;

(5)以步骤(3)中得到的跳变时刻粗估计值为中心选取长度为 $0.15N$ 的观测信号, 结合步骤(4)中得到的跳变前后频率, 构造符合跳频信号结构特性的时频原子字典 Ψ ;

(6)将原子字典中的各原子与观测信号进行相关运算, 相关度最大值所在的位置就是跳变时刻的精确估计值。

4 复杂度分析

本节将分析比较本文算法与滑窗法、原子分解法的算法复杂度。因为每种算法的运行时间主要取决于浮点乘法运算, 所以下面用浮点乘法的运算次数来表征每种算法的计算复杂度。

滑窗法的运算量主要取决于用匹配追踪算法选择稀疏基上两个最优原子, 计算前两个权值最大的傅里叶系数。在压缩比为 k 时, 单次滑动时进行两次内积运算过程需 $2MN$ 次浮点乘法运算, $M = N/k$, 当跳变时刻 $K > N/2$ 时, 期望的滑动次数为 $N/4\tau$, 当 $K < N/2$ 时, 期望的滑动次数为 $3N/4\tau$, 假设 K 在 0 和 N 之间均匀分布, 则滑动次数的期望值为 $N/2\tau$, 所以滑窗法的浮点乘法计算次数为

$$\eta_1 = MN^2/\tau \quad (17)$$

显然步长 τ 越小, 估计的精度就越高, 算法复杂度也越高, 本文取 $\tau = 100$ 。

原子分解法的复杂度主要取决于建立的原子字典的规模。用三参数原子^[7]作为基函数来匹配跳频信号, 在跳周期已知的基础上, 建立的原子字典的规模为 $N \times 2N^2$ 。对跳频信号进行 k 倍压缩, 得到 $M \times 1$ 的观测信号与 $M \times 2N^2$ 的压缩原子字典进行内积运算所需的浮点乘法运算次数为 $M \times 2N^2$ 。单周期的跳频信号的稀疏度为 2, 即需要进行 2 次迭代过程, 所以原子分解法的浮点乘法运算次数为

$$\eta_2 = 4MN^2 \quad (18)$$

本文算法包含跳时粗估计和跳时、跳频频率精确估计两个过程。跳时粗估计过程采用滑窗的方法, 运算量和滑窗法相同。频率精确估计过程中在稀疏基矩阵上估计频率时只需两次迭代, 通过内积运算得到权值最大的两个傅里叶系数即可, 运算次数为 $2MN$, 并且因为此时的稀疏基矩阵为块对角化的傅里叶正交基, 副对角线上零矩阵的存在也会减小计算量。精确估计过程建立的原子字典的规模为

$P \times (P - 1)$ ，进行 k 倍压缩后，得到 $Q \times (P - 1)$ 的压缩感知矩阵 Θ ，其中 $Q = P/k$ ，选择匹配原子需要进行的浮点乘法计算次数为 $Q(P - 1)$ ，所以本文算法的浮点乘法运算次数为

$$\eta_3 = MN^2 / \tau + 2MN + Q(P - 1) \quad (19)$$

表 1 给出了上述 3 种算法在不同跳周期长度和压缩比下的计算量，并将本文算法与滑窗法、原子分解法的计算复杂度进行了比较。由比较结果可得，在相同的跳频周期长度和压缩比条件下，本文算法的计算复杂度略高于滑窗估计算法，但远远低于原子分解法。但是由后面的仿真结果可以看出，本文算法的估计精度与原子分解法相当，较滑窗法有很大程度的提升。另外，随着压缩比的增加，3 种算法的计算量都会减小，说明压缩感知理论可以有效地解决海量信号处理问题。

5 仿真分析

仿真实验 1 不同算法的跳频信号参数估计性能

参数设置：采样速率 $f_s = 1$ MHz，符号速率为 400 chip/s，每个码元内有一跳，即跳频速率等于码元速率，调制方式为 2PSK，跳频图案为 {200,400,100,300,500} kHz，第 1 跳的持续时间为 1.875 ms (3/4 个跳周期)。压缩采样过程 Φ 为随机高斯矩阵，压缩比 k 为 2，滑窗粗估计过程中 Ψ 为傅里叶正交基，用匹配追踪算法计算信号在频域的前两个权值

最大的傅里叶系数，滑动步长 τ 为 100，误差限 ξ 为 0.08；精确估计频率时 Ψ 为块对角化的傅里叶正交基，跳时精确估计过程 Ψ 为依据在相应信噪比下由粗估计过程估计出的跳变时刻和精确估计的跳频频率建立的原子字典。分别用式(20)和式(21)表征跳变时刻和跳频频率估计误差。经过 1000 次独立的蒙特卡洛实验可以得到如图 1，图 2 的结果。

$$\text{err}_t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{t - \hat{t}}{T} \right)^2 \quad (20)$$

$$\text{err}_f = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{|f - \hat{f}|}{|f|} \right)^2 \quad (21)$$

从仿真结果可以看出，基于原子字典的跳时精确估计过程的参数估计性能较滑窗法有明显的提升，这是因为精确估计过程构造的原子字典很好地刻画了跳频信号的局部时频结构，在有效抑制交叉项的同时保证了高的时频聚集性。同时本文算法的跳时估计精度略高于原子分解法，缘于原子分解法针对所处理的整周期跳频信号构造原子字典，本文算法所选取的观测信号为整周期跳频信号的一部分，构造的原子字典只针对所有可能的跳变时刻，降低了错误估计的概率。另外，在达到相同跳频频率估计精度时，本文算法所需的信噪比较原子分解法低 2 dB，较滑窗法低 4 dB，这是因为本文算法在频率估计过程利用粗估计出的跳变时刻建立了符合跳频信号结构特性的稀疏基矩阵。

表 1 3 种算法在不同跳周期长度和压缩比下的运算量

| 算法 | N=2500 | | N=1000 | |
|-------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | k=4 | k=8 | k=4 | k=8 |
| 滑窗法(η_1) | 3.906×10^7 | 1.953×10^7 | 2.500×10^6 | 1.250×10^6 |
| 原子分解法(η_2) | 1.563×10^{10} | 7.813×10^9 | 1.000×10^9 | 5.000×10^8 |
| 本文算法(η_3) | 4.215×10^7 | 2.120×10^7 | 3.005×10^6 | 1.503×10^6 |
| η_1 / η_3 | 0.925 | 0.920 | 0.832 | 0.832 |
| η_2 / η_3 | 370.818 | 368.538 | 332.779 | 332.668 |

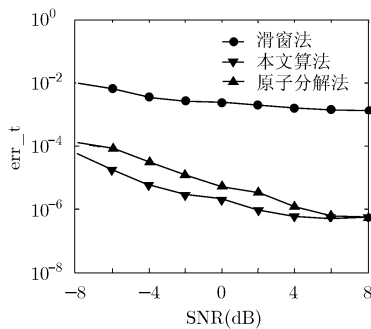


图 1 不同算法跳变时刻性能估计对比图

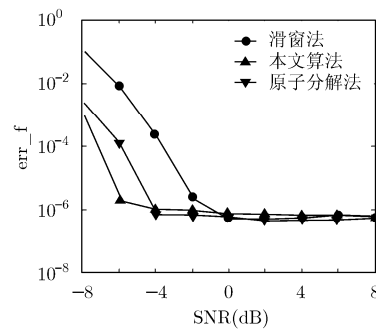


图 2 不同算法跳频频率性能估计对比图

仿真实验 2 仿真参数对跳频信号参数估计的影响

改变压缩比 k , 跳频信号参数及观测矩阵的设置与仿真实验 1 相同, 每组仿真进行 1000 次独立实验。

图 3 和图 4 分别表征本文算法在不同压缩比下的跳频频率和跳变时刻估计性能, 由仿真结果可以得出, 随着压缩比的增加跳频频率和跳变时刻的估计精度都逐渐降低。所以在低信噪比环境下可以通过降低压缩比来保持高精度参数估计, 在高信噪比环境下, 可以通过适当增加压缩比来减小参数估计的运算量。从图 4 中可以看出, 信噪比越低, 跳时估计性能受噪声的影响就越大, 这是因为跳变时刻精确估计过程中的原子字典是在频率估计的基础上构造出来的, 在信噪比较高时, 频率估计准确, 跳时估计精度只受噪声的影响; 在信噪比较低时, 频率估计的不准确也是使得跳时估计精度降低的原因。

设精确估计跳时过程所选的观测信号长度 P 与跳周期长度 N 的比值为 λ , 即 $\lambda = P/N$ 。在每次独立实验中分别将 λ 从 0.02 取值到 0.26, 间隔为 0.02, 压缩比 $k = 4$, 分别经过 1000 次独立实验, 得到在信噪比为 -8 dB, -6 dB, 0 dB 和 8 dB 的条件下, 不同观测信号长度与跳时估计误差的关系。

由图 5 可以看出, 在信噪比较高时, 跳时估计

误差随观测信号长度的增大而减小, 但当观测信号长度增大到一定程度时, 跳时估计精度基本保持不变。在信噪比低于 -8 dB 时, 跳时估计精度基本不再受观测信号长度影响, 这是因为噪声过大时, 此方法对跳时估计已经失效。另外, 观测信号长度也会影响算法复杂度。综合考虑参数估计精度和算法复杂度, 本文算法选取 $P = 0.15N$ 。

6 结束语

本文提出了一种基于滑窗和原子分解的压缩域跳频信号参数估计算法, 同时对影响参数估计精度的因素进行了仿真。本算法采用滑窗法粗略估计出跳频信号的频率跳变时刻, 在此基础上构造了块对角化的傅里叶正交基, 根据压缩采样信号与此正交基最匹配的前两个原子的位置确定信号跳变前后的频率。然后由粗估计出的跳时和跳变前后的频率构建了符合跳频信号结构特性的时频原子字典, 通过选择与所处理跳频信号最匹配的原子来精确估计跳变时刻。滑窗过程和原子匹配过程都利用了跳频信号在频域稀疏的结构特性, 在非重构原始跳频信号的前提下, 直接根据压缩测量值实现了跳频信号参数的估计。与滑窗法相比, 本文算法在略微增加计算复杂度的条件下, 显著提升了跳变时刻和跳频频率的估计精度; 与原子分解法相比, 本文算法在显著降低计算复杂度的同时, 保持了原有算法的估计精度。

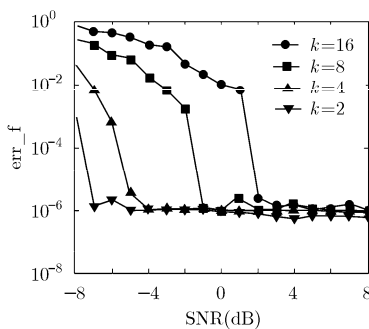


图 3 压缩比对跳频频率估计性能的影响

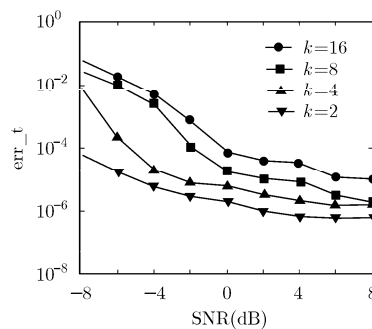


图 4 压缩比对跳变时刻估计性能的影响

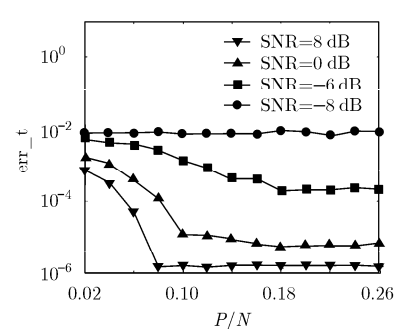


图 5 观测信号长度对跳变时刻估计性能的影响

参考文献

- [1] TORRIERI D J. Mobile frequency-hopping CDMA system [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(8): 1318-1327. doi: 10.1109/26.864169.
- [2] AMIN M G. Interference mitigation in spread spectrum communication systems using time-frequency distributions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(1): 90-101. doi: 10.1109/78.552208.
- [3] 赵俊, 张朝阳, 赖利峰, 等. 一种基于时频分析的跳频信号参数估计方法[J]. *电路与系统学报*, 2003, 8(3): 46-50. doi: 10.3969/j.issn.1007-0249.2003.03.011.
- [4] ZHAO Jun, ZHANG Chaoyang, 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. doi: 10.3969/j.issn.1007-0249.2003.03.011.
- [4] BSRBAROSSA S and SCAGLIONE A. Parameter estimation of spread spectrum frequency hopping signals using time-frequency distributions[C]. *Signal Processing*

- Advances in Wireless Communications of First Signal Processing Workshop, Paris, France, 1997: 213–216.
- [5] ANGELOSANTE D and GIANNAKIS G B. Estimating multiple frequency-hopping signal parameters via sparse linear regression[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(10): 5044–5056. doi: 10.1109/TSP.2010.2052614.
- [6] 吕晨杰, 王斌, 唐涛. 采用局部特征尺度分解的跳频信号参数盲估计算法[J]. 信号处理, 2015, 31(3): 308–313. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2015.03.008.
- LÜ Chenjie, WANG Bin, and TANG Tao. Blind parameter estimation of frequency hopping signal using local characteristic-scale decomposition[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(3): 308–313. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2015.03.008.
- [7] 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): 1754–1758. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2009.11.017.
- FAN Haining and GUO Ying. A novel blind parameter estimation algorithm of frequency-hopping signals[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(11): 1754–1758. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2009.11.017.
- [8] HUANG Anmin, GUAN Gui, MEHBODNIYA A, *et al.* A block orthogonal matching pursuit algorithm based on sensing dictionary[J]. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, 6(5): 992–999. doi: 10.5897/IJPS11.171.
- [9] 范海宁, 郭英, 艾宇. 基于原子分解的跳频信号盲检测和参数盲估计算法[J]. 信号处理, 2010, 26(5): 695–702. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.010.
- FAN Haining, GUO Ying, and AI Yu. Blind detection and parameter estimation algorithm based on atomic decomposition[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 695–702. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2010.05.010.
- [10] CANDES E J, ROMBERG J, and TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489–509. doi: 10.1109/TIT.2005.862083.
- [11] CANDES E J and TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406–5425. doi: 10.1109/TIT.2006.885507.
- [12] RICHARD G, CANDES E, ROBERT N, *et al.* Compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 12–13. doi: 10/1109/MSP.2008.915557.
- [13] 张春磊, 李立春, 王大鸣. 压缩域宽带跳频信号跳变时刻估计算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 122–129. doi: 10.11805/TKYDA201501.0122.
- ZHANG Chunlei, LI Lichun, and WANG Daming. A hopping transition time estimation algorithm for wide-band frequency-hopping signal in compressed domain[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(1): 122–128. doi: 10.11805/TKYDA2015.0122.
- [14] ZHAO Lifan, WANG Lu, BI Guoan, *et al.* Robust frequency-hopping spectrum estimation based on sparse Bayesian method[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2): 781–793. doi: 10.1109/TWC.2014.2360191.
- [15] 陈莹, 钟菲, 郭树旭. 非合作跳频信号参数的盲压缩感知估计[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 531–537. doi: 10.12000/JR15106.
- CHEN Ying, ZHONG Fei, and GUO Shuxu. Blind compressed sensing parameter estimation of non-cooperative frequency hopping signal[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 531–537. doi: 10.12000/JR15106.
- [16] WANG Lixin, ZHANG Binze, and ZHAO Yizhi. Compressive sampling and rapid reconstruction of broadband frequency hopping signals with interference[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2015, 34(5): 1535–1547. doi: 10.1007/s00034-014-9912-4.
- 付卫红: 女, 1979年生, 副教授, 研究方向为宽带无线通信、通信信号处理.
- 张云飞: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为跳频信号参数估计、压缩感知.
- 韦娟: 女, 1973年生, 副教授, 研究方向为卫星通信与移动通信.
- 刘乃安: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为无线通信与射频、扩展频谱通信与通信对抗.