



基于时频矩阵局部对比度的跳频信号参数估计

刘佳敏¹, 赵知劲^{1,2}, 尚俊娜¹, 叶学义¹

(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重点实验室, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 为了提高低信噪比下跳频信号参数估计性能, 提出了一种基于时频矩阵局部对比度的跳频信号参数估计算法。根据跳频信号和噪声的时频分布不同特点, 利用时频矩阵在不同尺度滑窗下的局部能量对比值均值, 得到多尺度局部能量对比特征矩阵, 通过此特征矩阵和自适应阈值分离得到仅保留了跳频信号时频信息的时频矩阵 $\mathbf{P}$ 。然后从 $\mathbf{P}$ 中提取时频跳变信息, 精确估计跳频信号的跳频周期、起跳时间和跳变频率。仿真结果表明, 与传统局部对比度 (local contrast measure, LCM) 法及形态学滤波法相比, 本文算法具有更好的跳频信号提取效果和更高的参数估计精度, 其有效性与实用性在 DSP+FPGA 的硬件系统上得到了测试验证。

关键词: 参数估计; 时频分析; 局部对比度; 硬件验证

中图分类号: TP414.41

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021239

Parameter estimation of frequency hopping signal based on time-frequency matrix LCM

LIU Jiamin¹, ZHAO Zhijin^{1,2}, SHANG Junna¹, YE Xueyi¹

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: To improve the performance of the parameter estimation of frequency hopping signal under low signal-to-noise ratio, a parameter estimation algorithm of frequency hopping signal based on time-frequency matrix LCM was proposed. Considering the different characteristics of time-frequency distribution of frequency hopping signal and noise, the mean local energy comparison value of the time-frequency matrix under different scale sliding windows was used, and the multi-scale local energy comparison feature matrix was introduced, so the time-frequency matrix $\mathbf{P}$ that only contains the time-frequency information of the frequency hopping signal could be obtained through this feature matrix and the adaptive threshold separation. And then, by extracting the time-frequency hopping information from $\mathbf{P}$, the period, hopping time and frequency of the frequency hopping signal could be accurately estimated. The simulation results show that compared with the traditional local contrast measure (LCM) and morphological filtering method, the proposed algorithm has better frequency hopping signal extraction effect and higher pa-

收稿日期: 2021-08-01; 修回日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U19B2016)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U19B2016)

parameter estimation accuracy. And then the tests of the algorithm on the DSP+FPGA hardware system verify the effectiveness and practicability.

Key words: parameter estimation, time-frequency analysis, local contrast, hardware verification

1 引言

跳频通信具有低截获率、较强的抗多径、抗干扰能力以及组网能力等特点,也给跳频信号侦察技术增加了难度^[1-3]。跳频信号参数估计作为侦察任务中的关键环节,受到国内外相关研究者的重点关注^[4-6]。

跳频信号参数包括跳变频率、跳频周期和起跳时间等,主要有基于原子分解^[7]、基于压缩感知^[8]、基于时频分析^[9]以及基于图像处理^[10]等估计方法。其中,基于时频分析与基于图像处理的方法凭借其简单高效以及对非平稳信号分析的独特优势,成为目前的主流方法。文献[11-14]在不同时频分析技术的基础上提取跳频信号的时频脊线实现参数估计。文献[11-12]采用线性时频分布分析跳频信号,但不能兼顾时域与频域分辨率;文献[13-14]采用二次型时频分布,具有较高时频分辨率,但存在交叉项干扰。文献[15]将短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)和平滑伪魏格纳分布(smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)组合的时频分析方法,具有较高估计精度,但计算量大。文献[16]采用尺度不同的两个窗口对跳频信号进行双窗谱分析,在保证时频分辨率的同时降低计算复杂度,但估计性能受窗长的影响大。为了提高跳频信号参数估计性能,文献[17-20]将图像处理技术应用于信号时频图,以消除噪声和其他干扰信号的影响。文献[17]采用灰度共生矩阵提取时频图的纹理特征进行参数估计。文献[18-19]通过形态学滤波消除噪声和其他干扰信号,文献[19]在形态学滤波的基础上采用 OPTA 细化算法对时频图像进行优化,但算法估计性能仍依赖于形态学结构元素的构

造。文献[20]采用自适应形态学估计跳频信号参数,解决了形态学结构元素选择的普适性问题,但算法实现过程较为复杂。

传统局部对比度(local contrast measure, LCM)是一种根据人眼的视觉特性度量目标显著性的目标检测方法^[21-22]。为提高低信噪比下跳频信号参数估计的精确度和算法性能的稳定性,本文提出了一种基于时频矩阵局部对比度(time-frequency matrix LCM, TFMLCM)的跳频信号参数估计算法。首先,利用不同尺度窗口计算时频矩阵上各点的局部对比度,实现跳频信号与背景噪声的分离;然后,根据时频矩阵上跳频信号的时频信息,完成对跳频信号的跳变时刻、跳变周期以及跳变频率的估计;最后,在 DSP+FPGA 的硬件平台上实现了本文算法对实际跳频信号参数估计的性能测试,验证了算法的实用性。

2 信号模型与时频变换

跳频信号是一种频率在伪随机序列的控制下不断跳变的非平稳信号,其数学模型为:

$$S(t) = \sum_{k=0}^M \text{rect}_T(t - kT - \tau) e^{j2\pi f_k(t - kT - \tau)} + v(t) \quad (1)$$

其中, T 表示跳频周期, $\text{rect}_T(t)$ 表示宽度为 T 的矩形窗, τ 表示起跳时间, f_k 表示跳变频率, M 表示观测时间内跳变频率总数, $v(t)$ 表示高斯白噪声。

对非平稳信号加窗处理得到多个短时平稳信号,并对这些短时平稳信号做傅里叶变换,进而得到跳频信号的 STFT 频谱。信号离散化后的离散 STFT 表达式为:

$$\text{STFT}_s(k, n) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s(m)h(n-m)e^{-j2\pi mk/N} \quad (2)$$



其中, $h(n)$ 表示窗函数, $k=1,2,3,\dots,K$ 表示离散频率点, $n=1,2,3,\dots,N$ 表示离散时间点。时频谱图定义为 STFT 模值的平方, 具有较好的时频聚集性, 其表达式为:

$$\text{SPEC}_s(k,n) = |\text{STFT}_s(k,n)|^2 \quad (3)$$

3 基于时频矩阵局部对比度的跳频信号参数估计

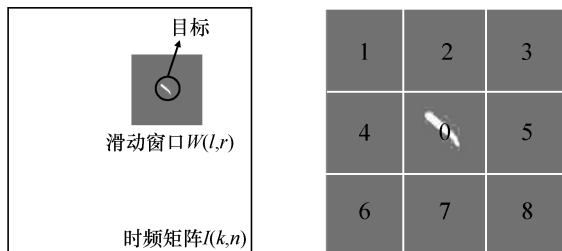
3.1 基于多尺度 LCM 的跳频信号提取

LCM 通过计算图像各个像素点相对其邻域的对比特征, 在提高目标对比度的同时抑制背景噪声, 最后经过自适应阈值分离目标与背景。本文将跳频信号和噪声的时频谱图看作一个时频矩阵, 利用跳频信号能量分布的特点, 采用多尺度 LCM 获得跳频信号的局部特征区域块, 实现跳频信号与背景干扰的分离。

3.1.1 传统 LCM

传统的 LCM 采用固定尺度的滑动窗口逐一计算时频矩阵上各个点的局部能量对比特征值。如图 1 所示, 滑动窗内区域由 9 个子块组成, 当滑动窗口滑到时频矩阵上的某一处时, 假设目标处于窗内中心块, 则周围标号为 1~8 的子块 $w_i(l,r)(i=1,2,3,\dots,8)$ 为其邻域背景块, 每个子块中包含 $L \times R$ 个时频点, 第 i 个子块的能量均值为:

$$e_i = \frac{1}{LR} \sum_{l=1}^L \sum_{r=1}^R w_i(l,r) \quad (4)$$



(a) 时频矩阵与滑动窗口 (b) 滑动窗口 W 区域内的 9 个子块分布

图 1 滑动窗口遍历时频矩阵

则各邻域子块中能量均值的最大值为:

$$E_n = \max(e_i) \quad (5)$$

其中, n 表示表滑动窗的第 n 次滑动, 再找到中心块 $w_0(l,r)$ 的时频能量最大值 L_n :

$$L_n = \max w_0(l,r) \quad (6)$$

为增强目标所在区域的对比度, 定义局部能量对比特征值为:

$$C_n = \frac{L_n^2}{E_n} \quad (7)$$

将此对比特征值 C_n 替换处于滑动窗口第 n 次滑动所在区域中心时频点的能量值。根据式(4)~式(7)使用滑窗对时频矩阵从上至下, 从左往右依次遍历, 得到经 LCM 处理后的特征矩阵。

一般选取尺度为 9×9 共 81 个像素点作为每个子块的最大的尺寸^[13]。当选取尺度为 $L=R=6$ 和 $L=R=9$ 的滑窗对图 2(a) 中的时频图进行 LCM 处理, 结果分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示。当接收信号中存在能量较高、持续时间较短的突发信号时, 由于选取的模板不恰当, 图 2(b) 中无法有效抑制突发信号干扰, 将产生虚警概率, 图 2(c) 中能抑制大部分干扰。由此可知, 窗口大小的选取将影响检测效果, 故提出一种多尺度 LCM 应用于跳频信号提取。

3.1.2 TFMLCM

考虑到跳频信号驻留时长的未知性以及跳频信号的时频信息分布特点, 研究了一种多尺度窗口的 LCM 应用于时频矩阵, 分离跳频信号。

首先, 将时频谱图上各点值按式(8)归一化到 $[0,255]$, 得到时频矩阵 $I(k,n)$:

$$I(k,n) = \frac{255(\text{SPEC}_s(k,n) - \min_I)}{(\max_I - \min_I)} \quad (8)$$

其中, $\max_I$ 和 $\min_I$ 分别表示原时频谱图上的最大值与最小值。

对于大小为 $K \times N$ 的时频矩阵 $I(k,n)$, 时频矩阵的各行代表频率分辨率为 $\frac{f_s/2}{K}$ 的频率分布。

其中, f_s 为信号的采样频率。窗口尺度的选取取

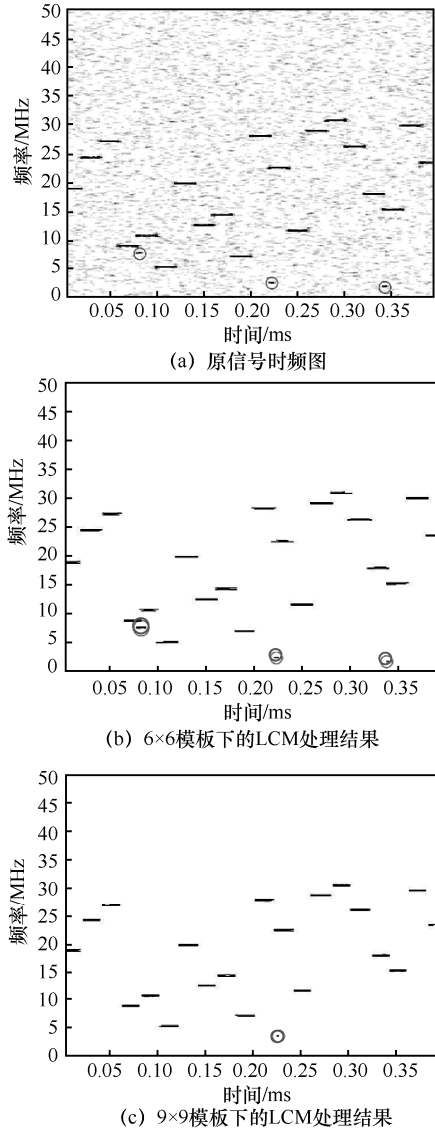


图2 不同尺度模板下的LCM处理结果

决于时频矩阵的实际大小。为提高跳频频率估计精度,令各尺度窗口的子块的行数为3,按照图1(b)中滑窗与子块大小的关系,将窗口的行数固定为9。由于跳频周期的不可预知性,选取多个列数不同的窗口分别对原时频矩阵进行滑窗处理,若最小窗口的列数为 N_1 ,则其他窗口列数取 N_1 的整数倍,且始终令滑窗列数的取值范围在 $[6, 0.3 \times N]$ 之间。同时,为保持多尺度局部能量对比特征值计算前后时频矩阵的尺度不变性,对时频矩阵 $I(k, n)$ 按照不同窗口尺度向四周进行扩充,得到

预处理后的时频矩阵 $q_i(k, n)$ 。对于窗口尺度为 $9 \times N_1$ 的模板, $I(k, n)$ 扩充后的情况如图3所示。根据原含噪时频矩阵 $I(k, n)$ 的实际取值,矩阵扩充部分的取值为 $[0, 10]$ 区间的随机数,对应高斯噪声。

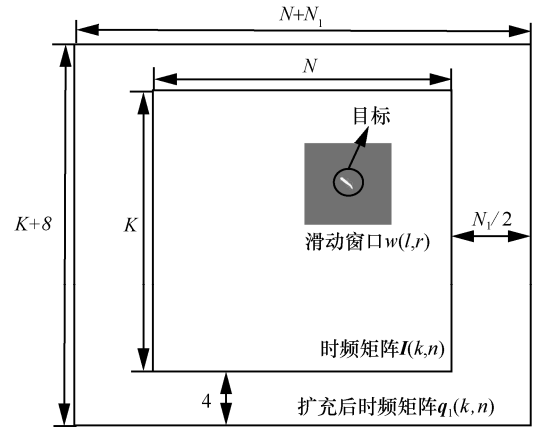


图3 扩充后时频矩阵 $q_i(k, n)$

对不同尺度窗口下预处理后的时频矩阵 $q_i(k, n)$ 上的各点按式(4)~式(7)分别计算局部能量对比特征值,并提取原时频矩阵所对应区域,得到特征矩阵 $q'_i(k, n)$, i 取 $1, 2, \dots, Z$, Z 为滑动窗的个数。按式(9)计算不同滑窗尺度下的特征矩阵的均值,以减少因滑窗尺度选取不当造成的虚警或漏检现象,最终得到多尺度时频局部能量对比特征矩阵 Q 。

$$Q(k, n) = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z q'_i(k, n) \quad (9)$$

其中, i 取 $1, 2, \dots, Z$; $k = 1, 2, 3, \dots, K$; $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

选取合适的门限阈值 Th , 当矩阵 Q 上某点的值大于该门限时,即存在跳频信号,利用式(10)分离出跳频信号时频矩阵 P 。

$$P(k, n) = \begin{cases} Q(k, n), & Q(k, n) > Th \\ 0, & Q(k, n) < Th \end{cases} \quad (10)$$

其中, u 和 σ 分别表示矩阵 Q 的均值和标准方差, β



表示自适应分割系数, 根据实验经验通常取 3~8;

$k=1,2,3,\dots,K$; $n=1,2,3,\dots,N$ 。

3.2 跳频信号参数估计

经 TFMLCM 处理后得到的矩阵 $\mathbf{P}$ 仅保留了跳频信号的时频信息, 在矩阵 $\mathbf{P}$ 上依次搜寻每一列的峰值点, 即若 $\mathbf{P}(i_{\max}, j) = \max(\mathbf{P}(:, j))$, 则 $F(j) = i_{\max}$, 其中, $i_{\max}$ 的取值范围为 $1,2,3,\dots,K$, $j=1,2,3,\dots,N$ 。

数组 F 表示各个时间点的信号频率分量, 对 F 各前后两个元素求差分, 找到跳频信号频率发生跳变的时刻点所对应的列, 存入集合 Stp , 如式 (11) 所示。

$$\begin{aligned} \text{diff_}F &= \text{diff}(F) \\ \text{Stp}(i) &= j, \text{diff_}F(j) > u1 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $u1$ 表示差分阈值, 取值为子块的行数 3。假设满足式 (11) 的跳变时刻点的个数为 N_t , 则 $i=2,3,4,\dots,N_t+1$; $j=1,2,3,\dots,N$; 且令 $\text{Stp}(1)=0$, $\text{Stp}(N_t+2)=F(N)$ 。则跳频信号的跳频周期和起跳时间估计值分别为:

$$\text{Et} = \frac{T_w}{N} \times \frac{1}{(N_t+1)} \sum_{i=1}^{N_t+1} (\text{Stp}(i+1) - \text{Stp}(i)) \quad (12)$$

$$\text{Est} = \frac{1}{N_t} \sum_{i=2}^{N_t+1} \left(\text{Stp}(i) \times \frac{T_w}{N} - (i-1) \times \text{Et} \right) \quad (13)$$

其中, T_w 表示观测时长, N 表示时频矩阵列数。取相邻跳变时刻之间的所有时间点上跳频信号频率值的均值为该跳的信号频率估计, 即:

$$\text{Ef}(i) = \frac{f_s/2}{K} \times F_{\text{mean}}[\text{Stp}(i)+1, \text{Stp}(i+1)] \quad (14)$$

其中, $F_{\text{mean}}[a,b]$ 表示取数组 F 第 a 个元素至第 b 个元素之间所有取值的平均值, $i=1,2,3,\dots,N_t+1$, f_s 表示采样频率, K 表示时频矩阵的行数。

3.3 算法流程

本文所提出的基于时频矩阵局部对比度的跳频信号参数估计算法的步骤如下。

步骤 1 利用式 (2) 和式 (3) 计算接收信

号的时频谱图, 得到 $\text{SPEC}_s(k, n)$ 。

步骤 2 按照式 (4)~式 (10), 利用 TFMLCM 对预处理后的矩阵进行遍历, 并将跳频信号与背景噪声分离, 得到时频矩阵 $\mathbf{P}$ 。

步骤 3 在纯净的跳频信号时频矩阵 $\mathbf{P}$ 上按列搜寻, 通过数组 F 记录每个时刻点的频率分量。

步骤 4 利用式 (11) 找到频率剧变的时刻点 $\text{Stp}(i)$, 即每一跳的跳变时刻点所在列。

步骤 5 根据跳变时刻点集合 Stp , 通过式 (12)~式 (13) 分别估计出跳频信号的跳频周期 Et 和起跳时间 Est 。

步骤 6 利用式 (14) 估计跳频信号的各个跳变频率。

4 算法仿真与测试

4.1 算法仿真与性能分析

为验证算法的有效性, 定义当跳变时刻点的个数比实际跳频个数少 1 时, 能正确提取出跳频信号。跳频信号提取正确率为:

$$\eta = \frac{C_0}{C} \times 100\% \quad (15)$$

其中, C 表示实验总次数, C_0 表示正确提取出跳频信号的实验次数。

采用归一化均方误差来衡量跳频信号各个参数的估计性能, 式 (16)~式 (18) 分别表示起跳时间、跳频周期和跳变频率的估计误差。

$$\text{err_}\tau = \frac{1}{C_0} \sum_{c=1}^{C_0} \left(\frac{|\text{Est} - \tau|}{\tau} \right)^2 \quad (16)$$

$$\text{err_}T = \frac{1}{C_0} \sum_{c=1}^{C_0} \left(\frac{|\text{Et} - T|}{T} \right)^2 \quad (17)$$

$$\text{err_}f = \frac{1}{C_0 \times (N_t+1)} \sum_{c=1}^{C_0} \sum_{i=1}^{N_t+1} \left(\frac{|\text{Ef}(i) - f_i|}{f_i} \right)^2 \quad (18)$$

其中, τ 、 T 、 f_i 分别表示跳频信号的实际起跳时间、跳频周期和跳变频率。

假设信号的采样率为 100 MHz, 观测时长为 0.4 ms, 跳频信号的频率集为 [13.5, 9.9, 16.2, 9,

10.8, 5.4, 19.8, 12.6, 14.4, 7.2, 27.9, 22.5, 11.7, 28.8, 30.6, 26.1, 18, 15.3, 29.7, 23.4] MHz, 跳频周期为 0.02 ms, 共 20 跳, 同时存在功率与频率随机变化的突发信号。滑动窗口的尺度选择如下: ①单尺度滑动窗尺度为 9×6 ; ②单尺度滑动窗尺度为 9×9 ; ③多尺度滑动窗尺度为 $[9 \times 9, 9 \times 18, 9 \times 27]$ 以及 ④多尺度滑动窗尺度为 $[9 \times 12, 9 \times 24, 9 \times 36]$ 。以下所有实验结果均由 100 次蒙特卡洛仿真结果求平均所得。

实验 1 跳频信号提取效果分析。选取滑动窗 ①~④, 利用 TFMLCM 分别提取跳频信号, 提取正确率与信噪比的关系与文献[9-10]通过形态学滤波实现跳频信号与背景干扰的分离, 其信号提取正确率对比, 如图 4 所示。由图 4 可见: 在信噪比低于 -8 dB 时, TFMLCM 的信号提取正确率高于 80%, 而 LCM 法低于 30%, 基于形态滤波算法失效, 故本文的 TFMLCM 比两种对比算法在低信噪比下具有更好的提取效果; 基于多尺度滑动窗 ③、④的提取正确率分别在 -5 dB 和 -7 dB 信噪比时达到 100%, 受窗尺度影响小; 而基于单滑动窗 ①、②的信号提取正确率分别在 -4 dB 和 0 dB 信噪比时达到 100%, 且受窗尺度影响大; 形态滤波法在信噪比接近 3 dB 时, 信号提取准确率才达到收敛, 本文基于 ③、④窗的 TFMLCM 分别提高信噪比达 8 dB、10 dB。

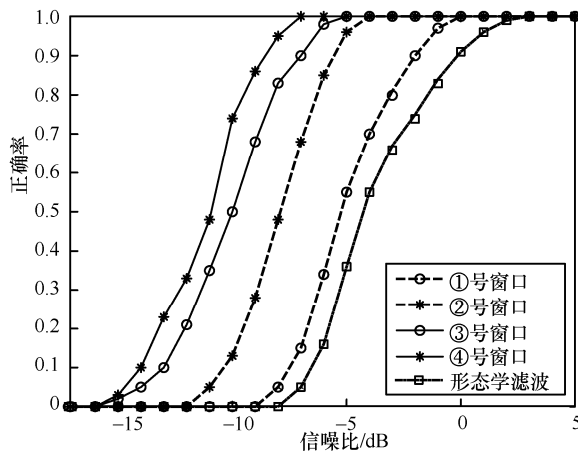


图 4 不同滑动窗下的信号提取结果

实验 2 本文所提 TFMLCM (选④号窗口)、LCM (选②号窗口) 以及形态学滤波算法对跳频频率、起跳时间和跳频周期的均方误差分别如图 5~图 7 所示。由图可见, 本文 TFMLCM 的跳频频率估计性能优于两种对比算法。在形态学滤波法进行信号提取的过程中, 由于二分阈值以及滤波结构元素选取的影响, 形态学滤波法的起跳时间估计性能比基于局部对比度的两种算法降低一个数量级。本文 TFMLCM 的跳频周期估计精确度达到 10^{-4} , 性能远胜于两种对比算法。

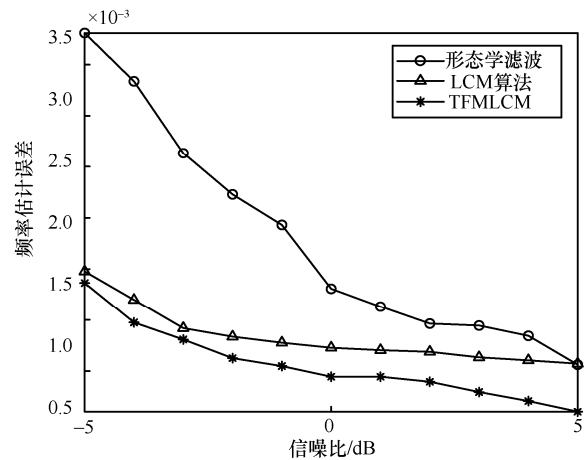


图 5 跳频频率估计误差

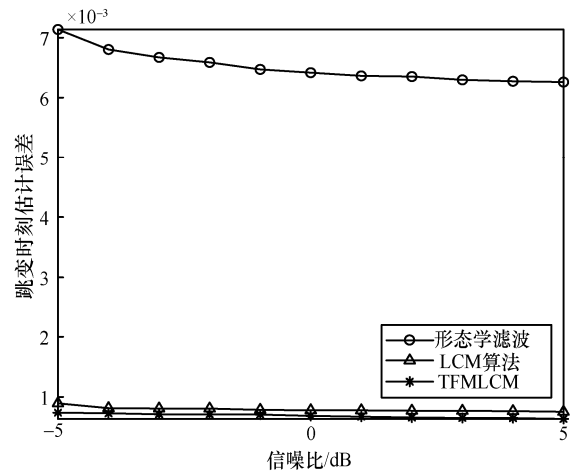


图 6 起跳时刻估计误差

4.2 算法性能测试

基于 DSP+FPGA 芯片的平台搭建了跳频信号参数估计算法测试系统, 在 CCS7.2 集成开发环境

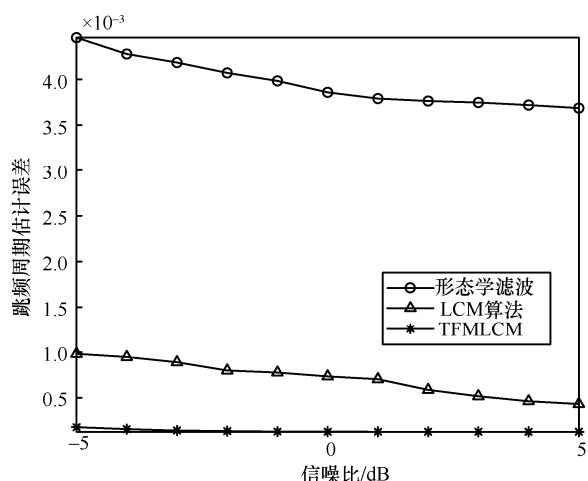


图7 跳频周期估计误差

编程实现参数估计算法并进行了调试,通过SEED-XDS200仿真器将工程文件下载至芯片内,进行实时测试,验证算法的正确性和实用性。

4.2.1 测试系统组成

基于TMS320C6678DSP和Kintex-7 XC7K410T FPGA芯片的硬件系统设计的跳频信号参数估计算法性能测试系统组成如图8所示。整个性能测试系统由信号源、射频前端、数据处理模块以及显示模块组成。数据处理模块作为参数估计算法测试系统的核心部分主要包括用于接收基带数据的FPGA、执行参数估计算法的DSP以及提供高速缓存区域的DDR3。首先,信号源采用SMBV100A信号发生器,发射跳频信号,在射频前端利用AD9361将接收到的模拟信号下变频至零中频信号,并得到正交的I、Q两路信号,对两路信号分别进行采样并传输给数据处理模块;然后,FPGA将接收到的零中频数据通过SRIO传输

到DSP外接的DDR3中,DSP在初始化SRIO后与DDR3进行数据交互;同时,为使数据得到高效处理,在DDR3中设计Ping-Pong结构的缓存共享内存,进行轮流读写,当零中频数据在Ping-Pong区域中的任一区域存满后会通过GPIO中断通知DSP,DSP将从另一内存区域读取数据进行后续的跳频信号参数估计,提高了数据吞吐量与系统通信速度。在DSP平台上编程实现上文的跳频信号参数估计算法;最后,DSP通过UART与上位机进行通信,将跳频信号参数估计结果显示在液晶屏幕的接收内容显示框。

4.2.2 算法实测结果及分析

将信号发生器SMBV100A的发射功率设为-10 dBm,射频中心频率为1 150 MHz;射频收发接收器AD9361的通带带宽为50 MHz,采样率设置为100 MHz。跳频信号的跳变频率集为[28.8, 30.6, 26.1, 13.5, 9.9, 16.2, 20.7, 18.9, 24.3, 27, 9, 10.8, 5.4, 19.8, 12.6, 14.4, 7.2, 27.9, 22.5, 11.7, 18, 15.3, 29.7, 23.4, 4.5] MHz,跳变周期为0.02 ms。

单纯的载波信号和跳频信号在A/D转换后,经FPGA传至DSP,在CCS7.2上编程计算其1 024点的傅里叶变换,得到的功率谱分别如图9(a)和图9(b)所示。可以看出信号在传输过程没有出现失真现象,验证了信号收发和功率谱计算功能的正确性。

将发射功率设置为-25~20 dBm,每间隔5 dBm进行100次参数估计。不同发射功率跳频周期和跳变频率的估计误差如图10所示。在低发射功率

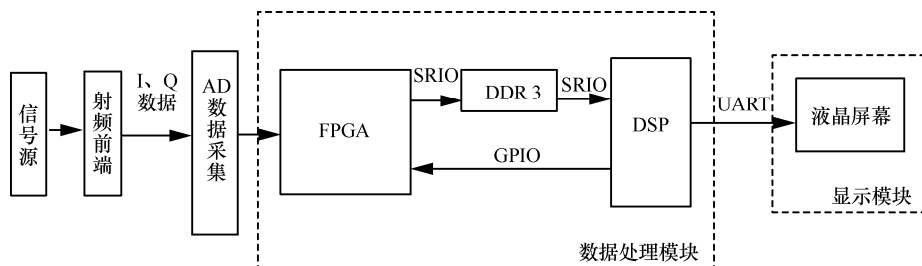


图8 测试系统组成

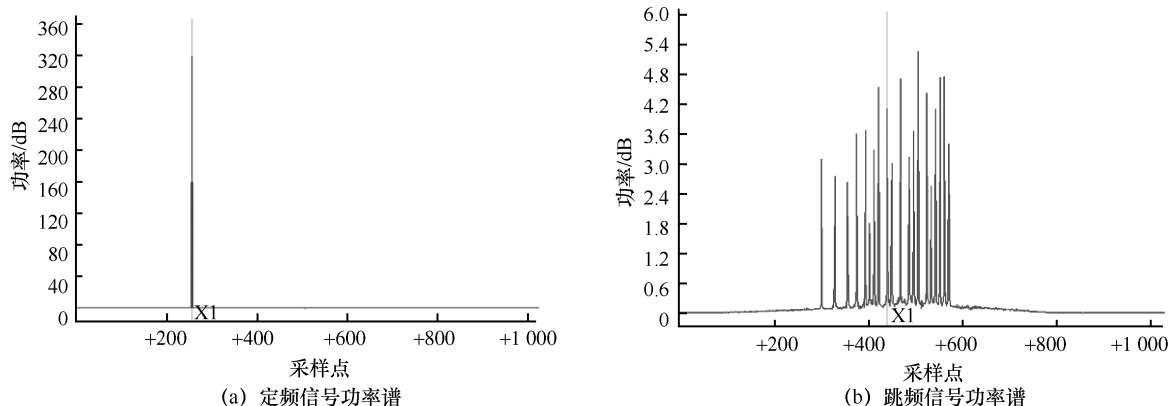


图9 信号功率谱

时, 仍然能以较小估计误差估计出两种参数, 估计误差均随发射功率的增大而减小, 且跳变频率的估计误差能达到 10^{-5} 的数量级。由于发射端源源不断地传输信号, 实际跳频信号的起跳时间无法预知, 故无法统计跳变时刻的估计误差, 但从式(12)和式(14)可知跳频周期与跳变频率的估计依赖于跳变时刻点的估计, 图10所示的这两种参数的良好估计性能侧面证明了本文算法也能够准确地估计实际信号的各个跳变时刻点。

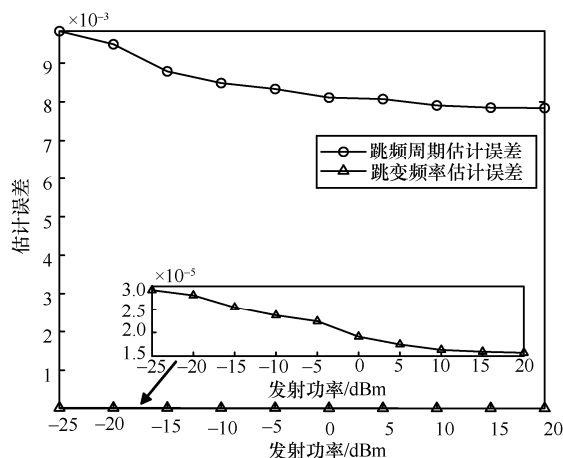


图10 不同发射功率下的参数估计误差

5 结束语

本文提出了一种基于时频矩阵局部对比度的跳频信号参数估计算法。该方法利用多尺度局部对比度算法计算时频图上各点的能量对比特征,

降低了由某些能量较高的噪声点以及随机的突发干扰导致的虚警概率, 具有较强的鲁棒性。仿真结果表明, 本文算法对跳频信号各参数的估计性能优于其他同类算法, 实际信号参数估计的测试结果表明该算法具有实用性。在后续研究中可利用多核 DSP 芯片八核并行结构的特点, 设计多核数据处理流程框架实现该算法, 以进一步提高算法实时性。

参考文献:

- [1] TORRIERI D J. Mobile frequency-hopping CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(8): 1318-1327.
- [2] 闫云斌, 全厚德, 崔佩璋. 跳频通信中阻塞干扰样式的自动识别[J]. 电信科学, 2013, 29(1): 103-108.
YAN Y B, QUAN H D, CUI P Z. Automatic recognition of barrage interference in frequency-hopping communication[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(1): 103-108.
- [3] LEI Z W, YANG P, ZHENG L H. Detection and frequency estimation of frequency hopping spread spectrum signals based on channelized modulated wideband converters[J]. Electronics, 2018, 7(9): 170.
- [4] KIM N K, OH S J. Comparison of methods for parameter estimation of frequency hopping signals[C]//2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 567-569.
- [5] 郭英, 东润泽, 张坤峰, 等. 基于稀疏贝叶斯学习的多跳频信号 DOA 估计方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 516-522.



- GUO Y, DONG R Z, ZHANG K F, et al. Direction of arrival estimation for multiple frequency hopping signals based on sparse bayesian learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 516-522.
- [6] KO C B, LEE J H. Performance analysis of interferometer direction of arrival estimation under frequency mismatch of array manifold: DOA of frequency hopping signal[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2331.
- [7] 东润泽, 郭英, 张坤峰, 等. 基于原子范数的多跳频信号时频参数估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(11): 2581-2585.
- DONG R Z, GUO Y, ZHANG K F, et al. Time frequency parameter estimation of multiple frequency-hopping signals based on atomic norm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(11): 2581-2585.
- [8] 付卫红, 张云飞, 韦娟, 等. 基于滑窗和原子字典的压缩域跳频信号参数估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(11): 2600-2606.
- FU W H, ZHANG Y F, WEI J, et al. Parameter estimation algorithm for frequency-hopping signal in compressed domain based on sliding window and atomic dictionary[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2600-2606.
- [9] FU W H, LI X H, LIU N A, et al. Parameter blind estimation of frequency-hopping signal based on time-frequency diagram modification[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(3): 3979-3992.
- [10] ZHAO Z J, YAO Y, SHANG J N. Frequency hopping signals analysis based on image processing[C]//2008 International Conference on Neural Networks and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2008: 560-564.
- [11] 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.
- FENG T, YUAN C W. Blind parameter estimation of frequency-hopping signals based on the time-frequency distribution maxima[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(12): 2921-2925.
- [12] 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.
- ZHANG S K, YAO Z C, HE M, et al. Blind estimation algorithm for frequency hopping parameters of improved time-frequency ridge[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(12): 2885-2890.
- [13] 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.
- [14] 郭艺, 张尔扬, 沈荣骏. 跳频信号时-频域分析与参数盲估计方法[J]. *信号处理*, 2007, 23(2): 210-213.
- GUO Y, ZHANG E Y, SHEN R J. The time-frequency analysis and blind parameter estimation of frequency hopping signals[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(2): 210-213.
- [15] 付卫红, 胡展. 一种混合网台跳频参数盲估计算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2019, 42(4): 57-63.
- FU W H, HU Z. Blind parameter estimation of hybrid networking frequency-hopping[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2019, 42(4): 57-63.
- [16] HE Y, SU Y, CHEN Y, et al. Double window spectrogram difference method: a blind estimation of frequency-hopping signal for battlefield communication environment[C]//2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 439-443.
- [17] 吕晨杰, 王斌, 王开勋. 采用图像处理的跳频信号参数盲估计[J]. *电讯技术*, 2015, 55(8): 842-847.
- LYU C J, WANG B, WANG K X. Blind parameter estimation of frequency hopping signals by image processing[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(8): 842-847.
- [18] 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, 54(8): 1071-1076.
- XI Y Y, LI Z G, WANG M. Parameters estimation of DS/FH signal based on image processing and time-frequency analysis[J]. *Telecommunication Engineering*, 2014, 54(8): 1071-1076.
- [19] 王欣怡, 南心蒙, 李柯达, 等. OPTA 细化算法在跳频信号参数估计中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(6): 116-119.
- WANG X Y, NAN X M, LI K D, et al. Application of OPTA algorithm in parameter estimation of frequency-hopping signals[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(6): 116-119.
- [20] 王曼颖, 龚晓峰, 雒瑞森, 等. 基于自适应形态学的跳频信号参数联合盲估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(5): 1398-1405.
- WANG M Y, GONG X F, LUO R S, et al. Joint blind parameter estimation of frequency hopping signal based on adaptive morphology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(5): 1398-1405.
- [21] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574-581.
- [22] ZHANG K, YANG K, LI S Y, et al. A difference-based local contrast method for infrared small target detection under complex background[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 105503-105513.

[作者简介]



刘佳敏（1997—），女，杭州电子科技大学硕士生，主要研究方向为软件无线电。



尚俊娜（1979—），女，博士，杭州电子科技大学副教授，主要研究方向为通信信号处理、无线传感器网络研究、卫星导航定位。



赵知劲（1959—），女，博士，杭州电子科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为通信信号处理、认知无线电、自适应信号处理等。



叶学义（1973—），男，杭州电子科技大学副教授，主要研究方向为图像处理、模式识别、信息隐藏。