

关联 RANSAC-DST 的 FM 信号瞬时频率估计

杨骐溪 李艳斌

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050051)

摘 要: 针对冲击-高斯混合噪声环境下的 FM 信号瞬时频率估计问题,在方向性 S 变换的基础上,提出了一种基于新型关联随机一致性算法(RANSAC)的瞬时频率估计方法。该算法将原 RANSAC 算法的随机一致搜索策略与 FM 信号的物理特征统一起来,构建关联函数以保证在抑制复杂噪声的同时准确跟踪目标信号的时变轨迹。结合方向性 S 变换的二次平滑特性,算法能够在 -7 dB 混合噪声的干扰下恢复信号的相位信息。仿真实验在 α -高斯混合噪声条件下验证了算法的有效性。

关键词: 瞬时频率估计;关联随机一致性;方向性 S 变换;二次平滑性;混合噪声

中图分类号: TN975 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

RANSAC-DST instantaneous frequency estimation of FM signals

Yang Qixi Li Yanbin

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Aiming at estimating the instantaneous frequency of FM signals in the complex α -Gaussian mixed noise environment, a new method called the relative random sample consensus (RANSAC) was developed on the basis of directional S transform. The new algorithm combined the searching strategy of the original RANSAC algorithm tightly with FM signal's physical characteristics altogether to propose a new function that can ensure the mixed noises be depressed and the instantaneous frequency trajectory be accurately tracked simultaneously. With the quadratic smoothing ability of the directional S transform, this new algorithm managed to recover phase information of the target signals in mixed noise environment of -7 dB the signal to noise ration. Numerous simulations have proved the algorithm's effectiveness in α -Gaussian mixed noise environment.

Keywords: instantaneous frequency estimation; relative random sample consensus; directional S transform; quadratic smoothness; mixed noise

0 引 言

时频分析技术是瞬时频率估计(instantaneous frequency estimation, IFE)的主要工具之一,经过多年的发展,该领域已经从最初的线性时频表示^[1]和双线性时频分布^[2]发展成为类型众多的非平稳信号处理工具^[3-4]。相关算法已在雷达、声呐、地震及脑电波分析等领域获得了广泛的应用。在诸多的时频分析技术中,S 变换(S-transform, ST)由于其特殊的性质获得了一定的关注。该变换的核心特点在于,其变换形式从数学意义上同时符合短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)和小波变换(wavelet transform, WT),因此 ST 同时具有上述两种经典变换的优势。在 ST 随后的研究中,逐渐形成两类不同的研究方向。一类是利用 ST 对跳相的敏感特

性,将其应用于脑电波、地震和故障信号的检测分析^[5]。另一类是利用 ST 的时频分析优势,改进并提高原变换的时频分析性能。文献[6]提出了一系列窗函数改进算法,有效提高了 ST 在变换域的局部表征能力。文献[7]重点分析了 ST 在高斯噪声下的分析性能。近年来,随着机器学习和智能算法的发展,有研究者尝试将该类算法作为预/后处理^[8]来提高 ST 的 IFE 精度。文献[9]尝试结合极限学习机(extreme learning machine, ELM)来提高 ST 的自适应分析性能,并获得了良好的效果。然而受不确定性原理限制,许多算法虽然实现了时域分辨率和频域分辨率的折中,但不能有效提高全局的时频聚集性。本文在分析时变信号物理特性的基础上,通过改进随机一致性(random sample consensus, RANSAC)算法的数据关联特性,提出了一种适合方向性 S 变换(directional S transform,

DST)^[10]的后处理算法。关联 RANSAC 利用新型关联函数,能够在 DST 二次平滑噪声的基础上,进一步消除冲击噪声对 IFE 的影响。相比于原 RANSAC^[3]算法,改进算法能够更好地适用低信噪比的复杂混合噪声环境。

1 方向性 S 变换

1.1 DST 定义

对于给定的时频分析方法,当信号瞬时频率(instantaneous frequency, IF)轨迹与时间轴平行时,可利用时间平滑窗提高时频聚集性,从而提高估计性能。而对于瞬时频率分量非线性的调频(frequency modulation, FM)信号,其 IF 曲线不与时间轴平行,只有当所选的平滑窗方向与 IF 曲线的切线方向一致时,才能有效增强该曲线上的时频能量,这就要求所选的平滑窗符合自适应方向匹配的要求。基于这一思想,DST 在 ST 中引入方向性参数,从而实现时频域的方向匹配。信号 $x(t)$ 的 DST^[10]定义为:

$$\begin{aligned} DST_x(t, f) &= \max_{0 \leq m \leq L} \{S_x^\theta(t, f, H)\} = \\ &= \max_{0 \leq m \leq L} \left\{ \int_{-H/2}^{H/2} S_x(t + h \cos \theta_m, f + h \sin \theta_m) dh \right\} = \\ &= \max_{0 \leq m \leq L} \left\{ \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma''(f)} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-j(r+h \cos \theta_m - \tau)^2 / 2\sigma''(f)^2} e^{-j2\pi(f+h \sin \theta_m)\tau} d\tau dh \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

$$\sigma''(f) = \frac{1}{|f + h \sin \theta_m|} \quad (2)$$

1.2 基于 DST 的脊线提取

一般地,对于单分量 FM 信号,在得到辐射源的时频表示后,可利用提取时频脊线^[11-12]的方法对信号进行初步的 IF 估计,从而得到瞬时频率候选集合^[12]:

$$\omega(t) = \arg \max_{\omega} |DST(t, \omega)| \quad (3)$$

显然,由于二次平滑特性,DST 能够较好地抑制高斯噪声,但在局部信噪比极低的冲击噪声干扰下,该方法将会失效。

2 关联 RANSAC 算法

2.1 经典 RANSAC 算法

考虑由频率单分量构成的调幅调频信号 $x(t) = A(t)\exp(j\varphi(t))$, $A(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别反映了信号的幅度与相位信息,瞬时频率 $f_{inst} = \frac{d\varphi(t)}{dt}$ 。在方差为 σ^2 的高斯白噪声和 α 平稳噪声环境下,定义信号的时频表示为 $TF_x(t, f) |_{(\sigma^2, \alpha)}$ 。

对于 IF 估计,经典 RANSAC 算法在求解脊线的基础上构建样本空间,并在其子集意义下根据随机一致性原理^[13]将信号相位信息从瞬时频率估计候选集合中提取出来。显然,对于存在 α 平稳噪声的局部信噪比较低的区域,该方法提供的瞬时频率估计值与 IF 真实值偏差严重,具有

很大的局限性。针对复杂噪声影响下的 IF 估计问题,文献[3]在表明原 RANSAC 算法能够在低信噪比条件下抑制高斯白噪声,但在冲击类噪声干扰下算法失效严重并对 α 平稳噪声较为敏感。

基于此,本文提出的关联 RANSAC 算法,首先利用 DST 的先期抑噪能力提高脊线的估计精度,而后在脊线上利用关联随机一致性进行精确 IF 估计。经过 DST 对高斯噪声的平滑后,关联 RANSAC 算法可以保证在 α 噪声残留区域内的 IF 估计精度。

2.2 关联随机一致性

在复杂噪声环境下,当高斯白噪声和 α 平稳噪声能量较大时,从时频表示中提取的脊线已经不能准确地构建样本空间,而此时原算法^[3]中的目标函数 $J(m)$ 鲁棒性大幅降低,不能给出相对精确的估计结果。针对这一问题,改进的 RANSAC 瞬时频率估计方法重点利用关联随机一致性的概念重构了原算法中的目标函数并记为关联函数 $H(m)$ 。

考虑信号 $x(t) = s(t) + n_c(t)$, 在复杂噪声 $n_c(t)$ 环境中,关联函数定义为:

$$H(m) = \frac{C(m)}{J(m)} \quad (4)$$

其中:

$$C(m) = \frac{1}{n} \sum_n |\omega[(n+1)\Delta t] - [\hat{\omega}^{(m)}(n\Delta t)]| \quad (5)$$

$$J(m) = \left| \sum_n x(n\Delta t) e^{-jn\Delta t \cdot \hat{\omega}^{(m)}(n\Delta t)} \right| \quad (6)$$

式中: Δt 为离散时间单位; $\hat{\omega}^{(m)}(n\Delta t)$ 为第 m 个随机数子集^[3]下利用 RANSAC 得到的瞬频估计。由连续非平稳信号物理特性限制^[14],信号瞬时频率短小时内不会出现突变,故 $C(m)$ 在一定程度上衡量了 IF 估计值与真实值之间的关联程度。

在原算法 $J(m)$ 搜寻局部最大值以保证 IF 估计准确率的前提下, $C(m)$ 的值越小表明 IF 估计越准确,即取 $f_{inst}(t) = \hat{\omega}^{(\arg \min_{\omega} H(m))}(t)$ 为关联 RANSAC 算法的最终瞬时频率估计值。

对于包含 α 平稳噪声的低信噪比区域,原 RANSAC 算法从失真程度严重的脊线上获取瞬频估计信息的能力大幅下降;而改进的算法在利用 DST 对脊线进行预处理的基础上结合关联函数 $H(m)$,从而保证对于信号真实瞬频信息的刻画。

3 仿真实验

为验证上述分析的正确性以及算法性能,实验 1 选取立方相位调制信号:

$$s(t) = \cos(124\pi t^3/3 - 38\pi t) \quad (7)$$

噪声环境为高斯白噪声和 α 平稳噪声的线性叠加,即:

$$x(t) = s(t) + n(t) + \alpha(t) \quad (8)$$

平稳噪声分布参数 $\alpha = 0.6$, 信号持续时间为 $t = [0,$

2] s, 采样频率 $f_s = 512$ Hz, 方向角度量化值为 25, 平滑窗长 $H = 30$ 个采样点, 信噪比范围为 $[-10, 5]$ dB. 立方相位调制信号的 IF 估计如图 1 所示。

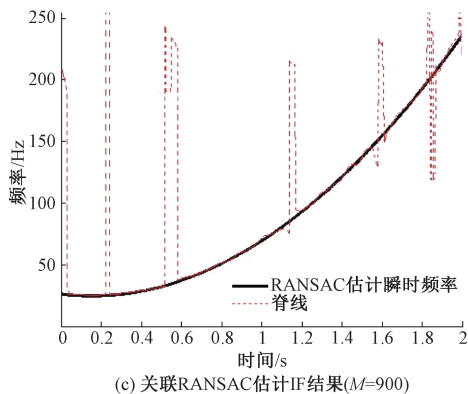
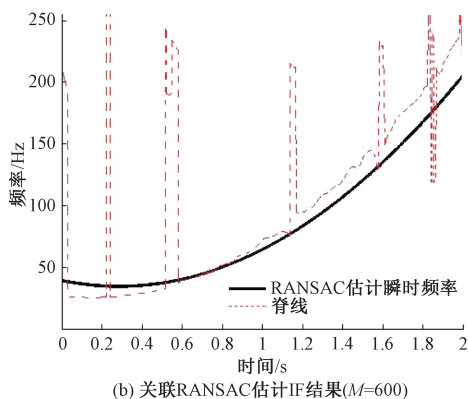
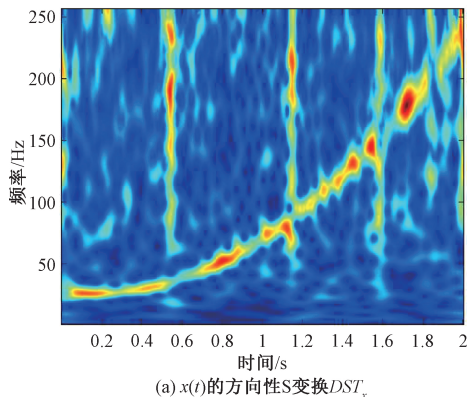


图 1 立方相位调制信号的 IF 估计 ($SNR = -7$ dB)

从图 1(a) 和 (b) 可以看出, DST 有效抑制了高斯白噪声从而降低了时频域脊线估计误差, 使关联 RANSAC 方法在混合噪声环境下对 IF 真值的估计精度提高。当迭代集合数 $M=600$ 时, 算法从已去除高斯白噪声但尚存 α 平稳噪声影响的时频域脊线中给出了校正的 IF 估计轨迹。随着迭代集合数的增加, α 噪声影响逐渐被抑制, 由图 1(c) 可知, 当 $M=900$ 时, IF 估计精度进一步提升, 基本还原了信号真实的时频轨迹。

对于单分量信号, 实验探究表明算法在中等迭代集合

数 ($300 \leq M \leq 800$) 下能够满足较低计算复杂度下的 IF 估计误差要求。关联 RANSAC 算法的估计均方误差随信噪比变化趋势如图 2 所示。

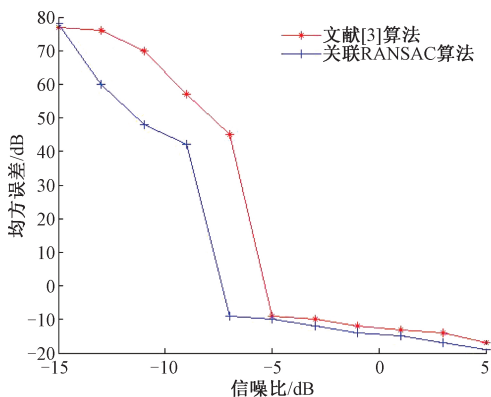
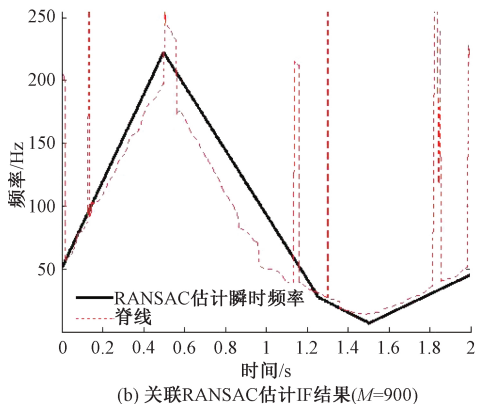
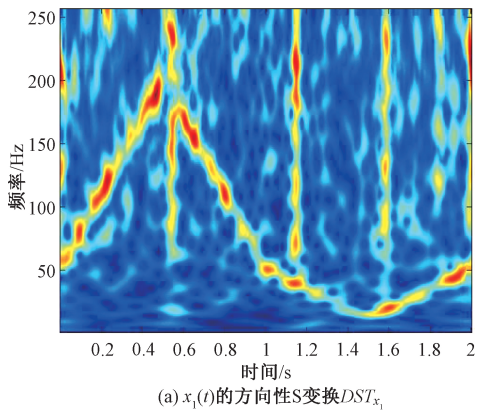


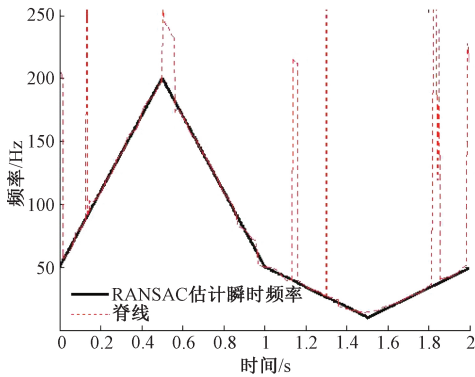
图 2 立方相位调制信号 IF 估计均方误差 ($M=600$)

为进一步验证关联 RANSAC 算法性能, 实验 2 选取分段类胃电图 (electrogastragram, EGG) 信号簇^[15] $s_1(t)$:

$$s_1(t) = \begin{cases} \cos(300\pi t^2 + 100\pi t), & t \in [0.0, 0.5] \text{ s} \\ \cos(-300\pi t^2 + 700\pi t), & t \in [0.5, 1] \text{ s} \\ \cos(-80\pi t^2 + 180\pi t), & t \in [1, 1.5] \text{ s} \\ \cos(80\pi t^2 - 60\pi t), & t \in [1.5, 2] \text{ s} \end{cases} \quad (9)$$

在混合噪声环境下, $x_1(t) = s_1(t) + n(t) + \alpha(t)$, 信噪比范围为 $[-10, 5]$ dB, 实验结果如图 3 所示。





(c) 关联RANSAC估计IF结果($M=1\ 500$)

图 3 EGG 信号的 IF 估计($\text{SNR}=-7\text{ dB}$)

从图 3(b)、(c)可以看出,对于 EGG 类分段多分量信号,关联 RANSAC 算法能够实现在 α -平稳噪声以及高斯白噪声的共同影响下对信号瞬频轨迹的准确估计,但估计精度随集合数 M 减小而降低。图 4 所示反映出原 RANSAC 算法与改进算法在 $[-15, 5]\text{dB}$ 的信噪比范围内关于 IF 估计均方误差的差异性,这表明多分量信号的时频域脊线的复杂性要求原算法在低信噪比环境下的有效迭代集合数应保持在较高水平^[3,16] ($2\ 000 \leq M \leq 3\ 000$),而关联 RANSAC 算法将指标降低至同期效果下的 $900 \leq M \leq 1\ 500$,从而在一定程度上减小了计算复杂度。

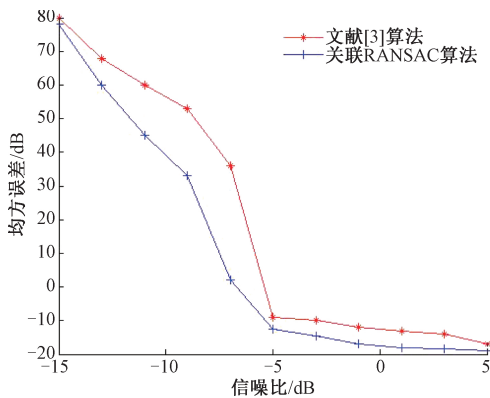


图 4 EGG 信号 IF 估计均方误差($M=900$)

整体而言,在初始随机一致性条件相同的情况下,改进的关联 RANSAC 算法的估计性能较原 RANSAC 算法有显著提升。这主要得益于时频域脊线提取前的 DST 处理, DST 对原信号在时频域内进行了针对性的高斯白噪声抑制,使信号时频表示得到平滑,降低了高斯- α 平稳混和噪声的复杂性。在此基础上,关联 RANSAC 算法根据随机一致性原理在时频域脊线上对符合相关性要求的信号瞬时频率分量进行估计,忽略不具相关性的 α 噪声影响,从而给出信号的真实 IF 拟合轨迹。实际上,对于关联 RANSAC 算法在混合噪声环境下的 IF 估计性能,图 5 所示反映了整体均方估计误差随信噪比变化的相互关系。

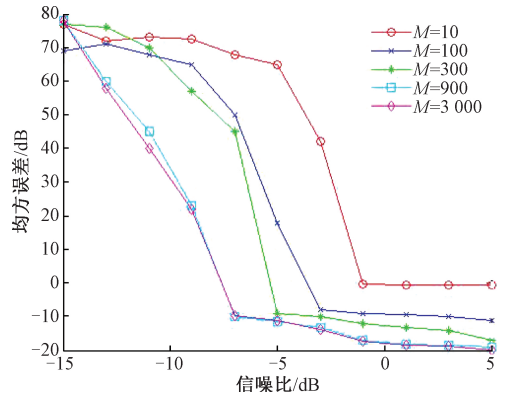


图 5 线性调频信号的关联 RANSAC-IF 估计均方误差

4 结 论

本文提出了一种改进的 RANSAC 算法,用以对混合噪声环境下的 FM 信号进行精确 IF 估计。针对原 RANSAC 瞬频估计算法的不足之处,改进算法将随机一致性与信号本身瞬频变化规律结合起来,进一步提高了算法的估计准确性。在 DST 对混合噪声进行了先期抑制后,关联 RANSAC 算法对能量较集中的冲击噪声表现出很好的稳健性,且能够从受噪声影响较严重的信号相位信息中准确恢复 IF 真实值。由均方误差估计曲线可以判断,在相同的信噪比指标下,关联 RANSAC 算法性能较原算法有了显著提升。在此基础上,未来预期对算法在不同应用场景下的鲁棒性进行进一步探究与优化。

参考文献

- [1] TSUI S Y, WANG L A. Generalized Gabor-S transform for fringe pattern analysis [C]. IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2016:1097-1105.
- [2] OROVIC I, STANKOVIC S, THAYAPARAN T, et al. Multiwindow S-method for instantaneous frequency estimation and its application in radar signal analysis[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(4): 363-370.
- [3] IGOR D. A WD-RANSAC instantaneous frequency estimator[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(5): 757-761.
- [4] ZHENG E, LIU Z, MA L. Study on harmonic detection method based on FFT and wavelet transform[C]. 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), 2010 (3), DOI: 10.1109/ICSPS.2010.5555720.
- [5] ASHRAFIAN A, ROSTAMI M, GHAREHPETIAN G B. Characterization of internal disturbances and external faults in transformers using an S-transform-based algorithm [J]. Turkish Journal of Electrical

- Engineering & Computer Sciences, 2014, 21(2): 330-349.
- [6] MISHRA M, ROUT P K, SAHU R, et al. Study the performance of S-transform based extreme learning Machine for islanding detection in distributed generation[C]. National Power Systems Conference (NPSC)2016,1109:1-6.
- [7] PINNEGAR C R, MANSINHA L. Time-local spectral analysis for non-stationary time series: The S-transform for noisy signals[J]. Fluctuation and Noise Letters, 2003, 3(3): L357-L364.
- [8] HUANG Z, ZHANG J, ZHAO T, et al. Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(2):817-825.
- [9] ZIDELMAL Z, AMIROU A, OULD-ABDESLAM D, et al. QRS detection using S-transform and Shannon energy[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2014, 116(1): 1-9.
- [10] BISWAL B, DASH P K, BISWAL M. Time frequency analysis and FPGA implementation of modified S-transform for denoising[J]. International Journal of Signal Processing Image Processing & Pattern Recognition, 2011, 4(2): 119-135.
- [11] 朱明哲,姬红兵,董青峰.广义 S 变换及其在复杂辐射源信号分析中的应用[J].电子与信息学报,2013, 35(10):2432-2437.
- [12] 朱明哲,姬红兵,林琳,等.基于方向性 S 变换的多分量 FM 信号瞬时频率估计[J].系统工程与电子技术, 2013,35(1):29-33.
- [13] DJUROVIC I. QML-RANSAC IF estimator for overlapping multicomponent signals in the TF plane[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018 (99):1-1.
- [14] 李雨薇,王文利,孟令达,等.时间频率信号的完好性监测方法研究[J].电子测量技术,2017,40(11):138-141.
- [15] 丁伟,秦书嘉,缪磊,等.小波变换和小波提升在胃电信号处理中的应用[J].生物医学工程学杂志,2012, 29(4):745-749.
- [16] CHUM O, MATAS J, KITTLER J. Locally optimized RANSAC[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2781:236-243.

作者简介

杨骐溪,硕士研究生,主要研究方向为统计信号处理、机器学习。

E-mail:13333340695@163.com