

doi: 10.7690/bgzd.2022.05.004

一种基于时频分析的多跳频信号盲源分离算法

侯 范, 姚志成, 杨 剑, 王海洋, 王自维
(火箭军工程大学导弹工程学院, 西安 710025)

摘要: 针对多个无人机遥控信号的分离问题, 提出一种基于时频分析进行数据处理的多跳频 (frequency hopping, FH) 信号盲源分离 (blind source separation, BSS) 算法。利用不同跳周期的跳频信号驻留时间的差异性, 改进时频脊线的提取; 利用小波变换检测改进后时频脊线的突变点, 求脊线最大驻留时间即为跳频信号中的最小跳周期; 分离出不同跳周期的跳频信号, 并基于时频能量值的不同, 对不同信号幅度的跳频信号进行盲源分离。结果表明: 与同类算法相比, 该算法在不依赖多通道数据的采集及混合矩阵估计等情况下, 可实现单通道情况下多跳频信号的盲源分离, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 跳频信号; 盲源分离; 时频分析; 小波变化; 时频脊线

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

A Blind Source Separation Algorithm for Multi-frequency Hopping Signals Based on Time-frequency Analysis

Hou Fan, Yao Zhicheng, Yang Jian, Wang Haiyang, Wang Ziwei
(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the separation problem of multiple UAV remote control signals, a blind source separation algorithm of multiple frequency hopping signals based on time-frequency analysis is proposed. The difference of the dwell time of FH signals with different hopping periods is used to improve the extraction of the time-frequency ridge. The wavelet transform is used to detect the mutation point of the improved time-frequency ridge, and the maximum dwell time of the ridge is the minimum hopping period of FH signals. The frequency hopping signals with different hopping periods are separated, and the frequency hopping signals with different signal amplitudes are subjected to blind source separation based on different time-frequency energy values. The results show that compared with the similar algorithms, the proposed algorithm can realize the blind source separation of multi-frequency hopping signals in the case of single channel without relying on multi-channel data acquisition and mixing matrix estimation, and has certain engineering application value.

Keywords: frequency hopping signal; blind source separation; time-frequency analysis; wavelet transform; time-frequency ridge

0 引言

随着无人机技术的飞速发展, 其为社会带来便利的同时也带来了诸多安全隐患。无人机“黑飞”问题已经引起社会的广泛关注, 而无人机的探测与参数估计是实现干扰反制的前提。跳频 (FH) 通信因具有较强的抗多径、抗干扰、抗截获、易组网能力被现代军事和民用通信系统广泛应用^[1-3]。诸多学者就如何有效地检测出无人机遥控链路所使用的跳频信号并进行参数估计展开研究^[4-6], 但上述算法均只适用于单跳频信号, 无法对多跳频信号实现有效的分离检测。

盲源分离 (BSS) 是指在源信号的先验信息和信道参数均未知的情况下, 仅利用传感器接收到的观测信号来恢复出源信号的过程^[7]。近年来, 跳频信

号的分离是研究热点。文献[8]通过引入快速独立成分分析 (fast independent component analysis, FastICA) 算法, 实现对多跳频信号的盲源分离; 文献[9-10]利用子空间投影法分离出跳频信号; 文献[11]通过时频分析求得时频比, 进一步得到对应的混合矩阵从而完成跳频信号盲分离。以上文献都依赖于对混合矩阵的估计, 当混合矩阵估计精度较低时, 会使分离出的信号产生较大的偏差; 同时, 上述算法均需要多个接收通道信号来进行信号处理, 给工程实现带来了诸多不便。笔者在文献[4]的基础上进行改进, 基于其所提算法实现噪声的滤除, 进一步根据各跳频信号驻留时间的不同, 利用小波变换找出所有信号频率的跳变时刻, 进而实现单通道情况下跳频信号的盲源分离。

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62071481)

作者简介: 侯 范 (1994—), 男, 河南人, 硕士, 从事跳频信号检测与参数估计应用研究。E-mail: houfan271@163.com。

在每一次的频率跳变时刻会产生阶梯性跳跃，且最长脊线为最小跳周期信号。小波变换^[11-12]具有类似于“放大镜”的作用，能够对信号细节部分进行一定程度的放大；因此，选择合适的小波函数能够对信号中的一些奇异点进行检测。小波函数很多，针对不同的信号特征可选用不同的小波函数，由于每一跳频周期近似为方波，而 Haar 小波对这类跳变具有很好的检测能力，可在局部检测出跳变的时刻点；因此，可利用 Haar 小波检测出跳变时刻，进而精确估计出信号的跳频周期等参数。小波变换为：

$$W(a, \tau) = (1/\sqrt{a}) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*((t-\tau)/a) d\tau. \quad (7)$$

式中： a 为尺度参数（通常取 $a=1$ ）； $*$ 为共轭； τ 为位移； $\psi(t)$ 为 Haar 小波的母函数，其表达式为：

$$\psi\left(\frac{t}{a}\right) = \begin{cases} 1/\sqrt{a} & -a/2 \leq t < 0 \\ -1/\sqrt{a} & 0 \leq t < a/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}. \quad (8)$$

由分析计算可知，在同一时频脊线内， $|W(a, \tau)|$ 恒为 0，而在不同的时频脊线内， $|W(a, \tau)|$ 的值不为 0，当处在频率之和发生跳变的位置时，取得最大值。随着 τ 在整个区间的滑动， $|W(a, \tau)|$ 会在 0 与峰值之间不断变化。 $|W(a, \tau)|$ 的变化反映了跳频信号频率之和的变化。对图 3 中的时频脊线进行小波变换后的结果如图 4 所示。

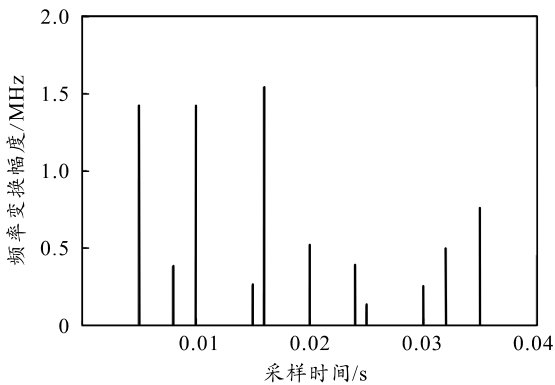


图 4 小波变换结果

2.3 跳频信号盲源分离

由图 4 可知，各谱峰时刻就是跳频频率之和发生跳变的时刻，其时间间隔就是该多跳频信号频率每次共存时长。当采集的数据时间足够长，则会在一定时间范围内同时存在所有跳频信号的完整一跳，此时最长时频脊线驻留时间即可表示为最小跳周期信号，利用图 4 中各相邻谱峰差值进行表示：

$$\Delta T_i = t(i) - t(i-1). \quad (9)$$

其中： $t(i)$ 为第 i 个峰值出现的时间； ΔT_i 为第 i 段脊线驻留时间。

取各段脊线驻留时间最大值记为 T ，则有：

$$T = \max(\Delta T_i). \quad (10)$$

由式(4)可知，时频矩阵截断处理去噪之后只留下信号部分，对存在信号的驻留时间进行判别，当时间接近 T 时，记为信号 S_1 ，其他信号记为 S_2 ，如式(11)、(12)所示：

$$\left. \begin{aligned} S_1(t, f) &= X(t, f), \quad 0.98T \leq X(t, f) \leq 1.02T \\ S_1(t, f) &= 0, \quad \text{else} \end{aligned} \right\}; \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} S_2(t, f) &= X(t, f), \quad X(t, f) > 1.02T \\ S_2(t, f) &= 0, \quad \text{else} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

其中： $S_1(t, f)$ 、 $S_2(t, f)$ 为分离出的跳频信号； $X(t, f)$ 为存在信号时其驻留时间； $0.98T$ 和 $1.02T$ 为对短时傅里叶变换以及截断处理造成的时间误差的补偿。

在跳频信号的盲源分离过程中，不考虑信号的调制方式，当信号幅度、跳周期一致时，默认其为同一跳频信号。故假设所分离出的跳频信号 $S_2(t, f)$ 中依然包含 2 个跳周期相同但信号幅度不同的跳频信号时，基于时频矩阵的能量值进行信号分离。时频变换具有能量聚集性，信号幅度的不同即表征为时频矩阵中能量值的不同，为了使分离结果更为准确，对每一频率整个时间段的时频能量值进行叠加，起到对差异的放大作用。表达式为：

$$N_i = \text{sum}(S_2(t, f_i)). \quad (13)$$

其中： $S_2(t, f_i)$ 为第 i 个频率在其每一时刻 t 的时频能量值； N_i 为第 i 个频率在其跳周期内的能量值之和。

对 $S_2(t, f)$ 进行信号分离，如式(14)、(15)所示：

$$\left. \begin{aligned} S_3(t, f) &= S_2(t, f), \quad N_i > \sum_i^k N_i / k \\ S_3(t, f) &= 0, \quad \text{else} \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} S_4(t, f) &= S_2(t, f), \quad N_i < \sum_i^k N_i / k \\ S_4(t, f) &= 0, \quad \text{else} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

其中： $S_3(t, f)$ 为信号幅度较大的跳频信号； $S_4(t, f)$ 为信号幅度较小的信号； k 为存在的频率个数。

2.4 算法流程

通过上述理论分析，初步认为笔者所提算法可实现不同跳周期以及跳周期相同跳频信号的盲源分离，算法流程如下：

- 1) 采集一段足够长时间的数据，依据文献[5]所提算法进行截断处理；
- 2) 依据式(6)提取改进时频脊线；
- 3) 对提取的时频脊线进行小波变换，并按式(9)求取各段脊线驻留时间；
- 4) 根据式(11)、(12)对不同跳周期信号进行盲源分离；
- 5) 根据式(14)、(15)对相同跳周期信号进行盲源分离。

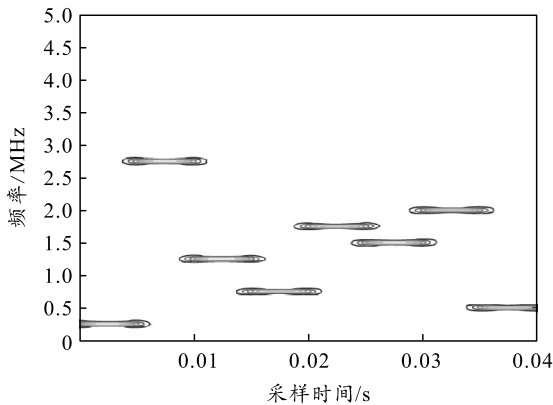
3 仿真实验与分析

为验证本文中算法的有效性，设定短时傅里叶变换采用长度为 512 的 hamming 窗，采样频率为 10 MHz。存在 3 个跳频信号，调制方式均为 BPSK 且相互独立，频率集、跳周期和信号幅度如表 1 所示。

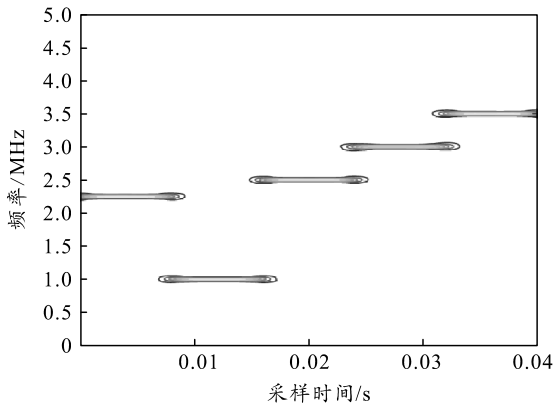
表 1 跳频信号参数

源信号	跳频频率集/MHz	跳频周/ms	信号幅度
S_1	[0.25, 2.75, 1.25, 0.75, 1.75, 1.50, 2.00, 0.50]	5	2
S_2	[2.25, 1.00, 2.50, 3.00, 3.50]	8	2
S_3	[3.25, 3.75, 4.00, 4.25, 4.75]	8	1

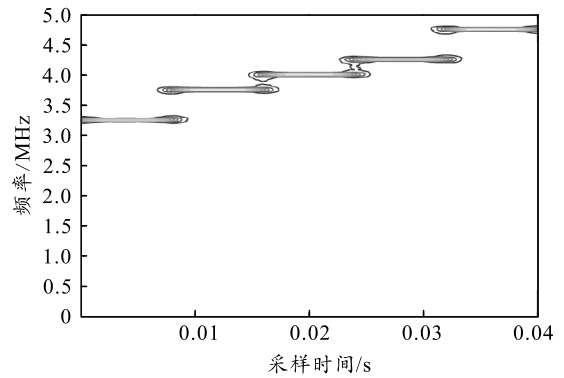
跳频源信号和混合信号的 STFT 时频如图 5 所示。



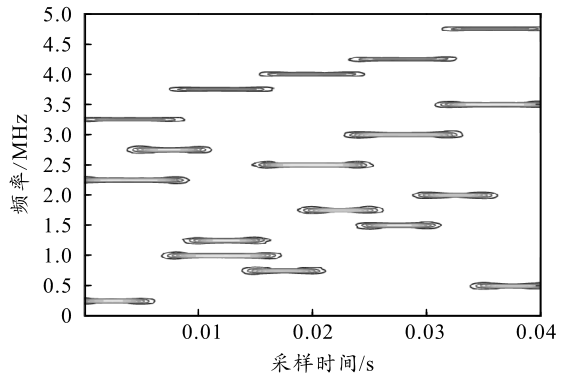
(a) 源信号 S_1



(b) 源信号 S_2



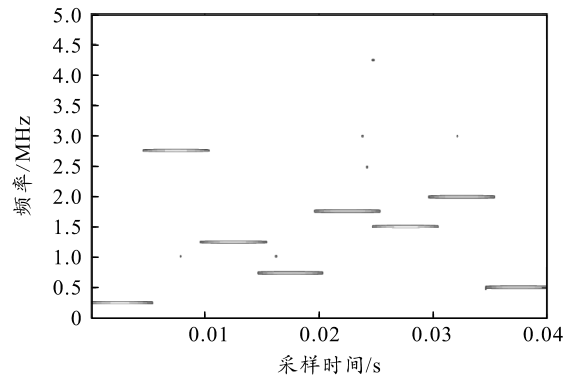
(c) 源信号 S_3



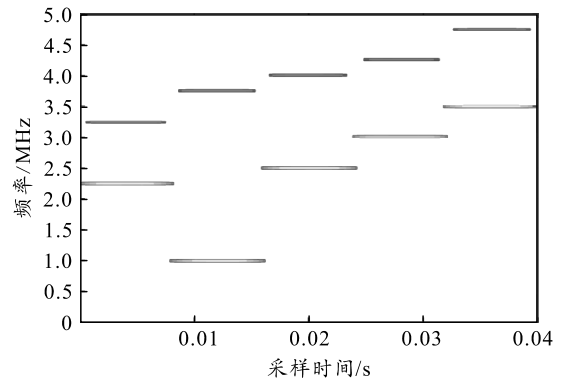
(d) 混合信号 x

图 5 源信号与混合信号时频

按式(11)、(12)对不同跳周期信号进行盲源分离，分离结果如图 6 所示。



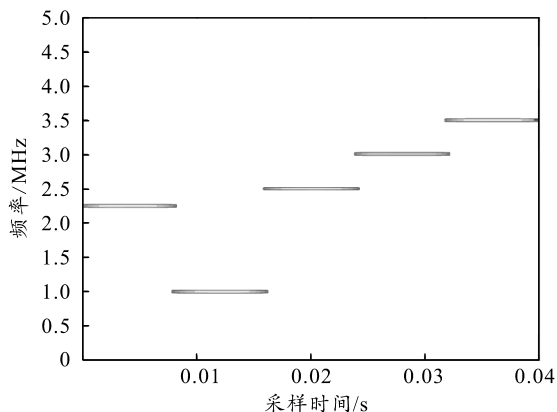
(a) 分离信号 S_1



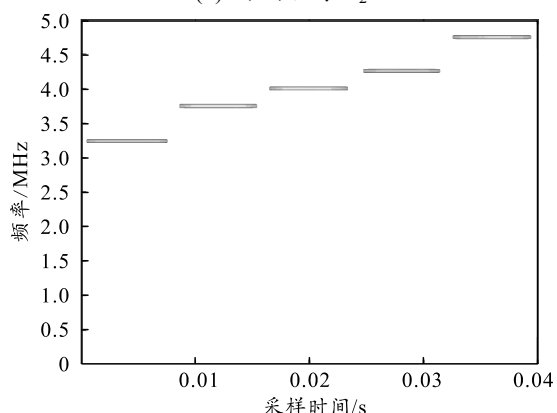
(b) 分离信号 S

图 6 混合信号分离

按式(14)、(15)对分离出的 S 信号继续进行盲源分离, 分离结果如图 7 所示。



(a) 分离信号 S_2



(b) 分离信号 S_3

图 7 S 信号分离

由图 6、7 可以看出, 笔者所提算法可以首先实现不同跳周期跳频信号的分离, 当分离信号中包含跳频信号跳周期相同、信号幅度不同时, 依然可进一步进行信号分离。因此, 该算法可在单通道情况下实现跳频信号的盲源分离, 避免了其他算法中混合矩阵的求解以及带来的分离误差。

4 结论

针对多跳频信号的盲源分离, 笔者在文献[4]算法的基础上, 利用不同跳周期的跳频信号驻留时间的差异性, 改进时频脊线的提取, 并利用小波变换检测改进后时频脊线的突变点, 求出脊线最大驻留时间即为跳频信号中的最小跳周期。首先分离出不同跳周期的跳频信号, 并基于时频能量值的不同,

对不同信号幅度的跳频信号进行盲源分离。笔者所提算法无需完成混合矩阵的估计, 即可实现单通道情况下多跳频信号的盲源分离, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李红光, 郭英, 齐子森, 等. 复杂电磁环境下多跳频信号盲检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 13-19.
- [2] GOROSTIZA E F D, BERZOSA J, MABE J, et al. A method for dynamically selecting the best frequency hopping technique in industrial wireless sensor network applications[J]. Sensors, 2018, 18(2): 657-691.
- [3] TU X, XU X, ZOU Z, et al. Fractional Fourier domain hopped communication method based on chirp modulation for underwater acoustic channels[J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2017, 28(3): 449-456.
- [4] 侯范, 姚志成, 杨剑, 等. 一种基于 K-means 聚类的跳频信号快速检测方法 [J/OL]. 电讯技术: 1-9[2021-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1267.tn.20210513.1119.002.html>.
- [5] 曾禹, 李鸥. 一种新的跳频信号检测模型[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 832-837.
- [6] 李硕, 李天昀. 短波信道下的跳频信号检测[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 623-629.
- [7] 付卫红, 周新彪, 农斌. 单通道盲源分离的研究现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(5): 1-11.
- [8] 王建雄, 张立民, 张媛. 基于独立成分分析的跳频信号盲分离[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(10): 64-66, 165.
- [9] 王少波, 郭英, 睦萍, 等. 欠定条件下同步组网跳频信号盲源分离方法[J]. 计算机工程, 2020, 46(10): 166-172, 181.
- [10] 于欣永, 郭英, 张坤峰, 等. 基于盲源分离的多跳频信号网台分选算法[J]. 信号处理, 2017, 33(8): 1082-1089.
- [11] 李端玲, 成蒗委, 于功敬, 等. 融合小波包和神经网络的脑电信号处理方法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(3): 94-99.
- [12] 熊鹏, 刘学朋, 杜海曼, 等. 基于平稳和连续小波变换融合算法的心电信号 P、T 波检测[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1441-1447.