

# 低信噪比下短波数字信号调制识别算法

郑礼<sup>1,2</sup>, 闫光辉<sup>1</sup>, 严天峰<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省无线电监测及定位行业技术中心, 兰州 730070)

**摘要:** 针对信道存在噪声的干扰, 为了更好地获取短波数字信号, 提出了低信噪比下短波数字信号调制识别算法, 构建需要识别的短波数字信号模型, 采集发射信号, 获得脉冲噪声、高斯噪声、码间串扰信号。利用瞬时数值算出滚降和匹配滤波器的振幅频率响应, 结合相位校正, 抑制噪声影响。小波滤波技术通过优化瞬时信息, 求出瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率绝对值的平均数, 完成短波数字信号调制识别。通过实验, 证明本文算法能有效完成数字信号调制识别, 噪声影响较小, 准确性高。

**关键词:** 低信噪比; 短波数字信号; 信号调制识别; 瞬时频率; 特征参量

**中图分类号:** TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3392-07

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230869

## Modulation recognition algorithm for shortwave digital signals under low signal-to-noise ratio

ZHENG Li<sup>1,2</sup>, YAN Guang-hui<sup>1</sup>, YAN Tian-feng<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Province Radio Monitoring and Positioning Industry Technology Center, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to better obtain shortwave digital signals due to noise interference in the channel, a modulation recognition algorithm for shortwave digital signals under low signal-to-noise ratio is proposed. The short wave digital signal model to be identified is constructed, and the transmitted signals are collected to obtain pulse noise, Gaussian noise, and intersymbol interference signals. The roll off and the amplitude frequency response of the Matched filter are calculated using instantaneous values, and the noise effect is suppressed by combining phase correction. The instantaneous information is optimized by wavelet filtering technology, and the average of instantaneous amplitude, instantaneous phase and Instantaneous phase and frequency absolute value is calculated to complete modulation recognition of short wave digital signal. Through experiments, it has been proven that the proposed algorithm can effectively achieve digital signal

**收稿日期:** 2023-08-16.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(62062049); 中央指导性地方科技发展基金项目(22ZY1QA005); 甘肃省重大科技专项项目(22ZD6GA041); 兰州交通大学青年科学基金项目(2023009).

**作者简介:** 郑礼(1989-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 软件无线电, 智能频频认知与机器学习.

E-mail: zhengli3227@163.com

**通信作者:** 闫光辉(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 数据库理论与系统, 智能信息处理, 数据挖掘, 复杂网络分析.

E-mail: ghyan@mail.lzjtu.cn

modulation recognition with minimal noise impact and high accuracy.

**Key words:** low signal-to-noise ratio; short wave digital signal; signal modulation recognition; instantaneous phase and frequency; characteristic parameters

## 0 引 言

随着科技的提高,通信技术也有长足的进步<sup>[1]</sup>。同时,在新一代通信系统中,其多模式、多场景、多速率的特征正向未来通信系统演进<sup>[2]</sup>,以适应不同的用户需求。在日益复杂的电磁环境中,数字调制方式<sup>[3]</sup>获得了广泛的应用。与此同时,数字信号的调制识别和参数估计<sup>[4]</sup>也逐渐受到人们的重视。

随着现代通信技术的发展,数字信号越来越多地被应用于实际生活中,例如,数字电视、无线通信和计算机网络等。然而,这些信号的调制方式、参数和波形等信息需要被提取和识别,以保证通信质量和信息安全。从民用角度看,用于无线网络监控的频谱资源管理<sup>[5]</sup>等,便于政府部门对未经授权的用户进行监测<sup>[6]</sup>,信号监控与干扰均与信号调制识别有关。从军事角度看,要实现通信信息的拦截<sup>[7]</sup>,首先要明确其调制模式,然后进行分析、解调和干扰<sup>[8]</sup>。因为信号调制识别技术在通信对抗、电子侦察、多模智能无线通信等领域具有重要的应用价值。

杨洪娟等<sup>[9]</sup>提出了高阶累积量和星座图聚类特性调制识别算法。基于4阶、6阶累积量的属性特性,构造3个特征参量,实现多进制相移键控与偏多值正交振幅调制模式的辨识;利用改进星座图减法聚类方法,对残存调制模式划分,通过对各参量组合,构造决策树分类器,完成信号调制识别。许华等<sup>[10]</sup>提出了对抗域适应迁移调制识别算法。利用类判别器和域判别器的对抗学习,实现对类别差异和领域不变的特征提取。通过非监督的方法,划分目标域信号,从而提高分布差异数据集在真实环境下的自适应性,完成信号调制识别。

但上述文献存在低信噪比环境中调制识别效果不佳、准确性低等问题,因此,本文提出了低信噪比下短波数字信号调制识别算法研究。建立待识别短波数字信号模型,获得拦截的信号特征,处理短波数字信号,得到振幅频率响应特性,通过小

波滤波技术获得瞬时特征参量,判断出信号类型,实现短波数字信号调制识别。

## 2 待识别短波数字信号模型

短波数字的传播<sup>[11]</sup>,主要依赖于电离层的反射,由于电离层的层状结构,会使相同的信号沿多条路径到达同一个接收端,造成多途传输;同时,电离层是非均匀、时变的媒质<sup>[12]</sup>,使传输参数具有时变、无规律的特点。假定在一条线路上发射的信号是 $s(t)$ ,在短波信道上发射后,信号表达式为:

$$r(t) = \left[ \sum_n a_n(t) e^{-j\theta_n(t)} s_l(t - \tau_n(t)) \right] e^{-j2\pi f_c t} + n_N(t) + n_I(t) \quad (1)$$

式中: $s_l(t)$ 为传输信号的低通格式<sup>[13]</sup>;  $\theta_n(t) = 2\pi f_c \tau_n(t)$ ,  $f_c$ 为载频;  $a_n(t)$ 为路径 $n$ 的衰减系数<sup>[14]</sup>;  $\tau_n(t)$ 为各路径传输延迟,二者均随着介质结构的改变而改变;  $n_N(t)$ 为复合高斯白噪声;  $n_I(t)$ 为受人为干扰或大气干扰产生的噪音,其特征是概率分布函数<sup>[15]</sup>的尾迹比高斯分布厚,脉冲幅度远远超过信号与背景噪声。

从式(1)可以看出,在通过短波信道传送之后,接收的信号包含脉冲噪声、高斯噪声、码间串扰。

## 2 短波数字信号处理

数字调制信号的特征参量主要包含3个瞬时数值:瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率,且极易受噪声干扰,其中瞬时相位的提取尤为困难。在低信噪比条件下,由于受到噪声抖动误差的干扰,难以精确地获取瞬时相位,瞬时频率的计算更加困难,从而难以获得基于这3个瞬时数据的识别特征参量。为此,选择了既符合奈奎斯特准则,又能近似于理想滤波器的升余弦滤波器<sup>[16]</sup>,有效地抑制噪声的干扰。在此基础上,通过对相位进行校正,可以获得更精确的瞬时数值相位。

升余弦滚落滤波器振幅频率响应表达式为:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_b} \\ \frac{T_b}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi[2T_b|f|-1+\alpha]}{2\alpha}\right) \right], & \frac{1-\alpha}{2T_b} < |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_b} \\ 0, & |f| > \frac{1+\alpha}{2T_b} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $T_b$ 为脉冲宽度； $\alpha$ 为其数值为0-1的滚降系数<sup>[17]</sup>。

滚降滤波器的振幅频率特性包括3个部分，即中间平坦的顶部部分，两边滚降的曲线部分，当响应 $f = \frac{(1+\alpha)T_b}{2}$ 时，其振幅频率特性为0，此时进入阻带。

最佳幅度频响特征应为中心是 $\frac{1}{2T_b}$ 的双对称频谱信号<sup>[18]</sup>，该数值的取值范围是 $\left[\frac{(1-\alpha)}{2T_b}, \frac{(1+\alpha)}{2T_b}\right]$ ，

因此，滤波器的振幅频率响应表达式为：

$$H_0(f) = \begin{cases} H\left(\frac{f-1}{T_b}\right), & 0 \leq f < \frac{1}{T_b} \\ H\left(\frac{f+1}{T_b}\right), & -\frac{1}{T_b} < f < 0 \end{cases} \quad (3)$$

因此，通过滤波器的振幅频率响应获得信号经过冲击响应处理的方程表达式为：

$$h_p(i) = \frac{\sin\left(\frac{\pi i}{T_b}\right)}{\frac{\pi i}{T_b}} \left[ 2\cos\left(\frac{\pi i}{T_b}\right) + \frac{T_b^2}{4i^2\alpha^2 - 1} \cos\left(\frac{\pi i\alpha}{T_b}\right) \right] \quad (4)$$

式中： $i$ 为信号采样个数。

### 3 低信噪比下短波数字信号调制识别

综合考虑了算法的复杂度和可识别性，采用小波滤波技术对瞬时信息优化，得到了以下5个瞬时特征参量，并对其进行调制信号识别。

(1)零中心标准化瞬时振幅绝对值的平均数 $M_1$ 表达式为：

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_n |C| \quad (5)$$

式中： $C = (cc/mean(cc)) - 1$ ， $c = abs(c')$ ， $mean()$ 函数的作用是计算平均值， $abs()$ 函数的作用是计算模<sup>[19]</sup>， $c$ 为实信号， $c'$ 为 $c$ 的解析信号， $cc$ 为

数字信号的瞬时幅度， $C$ 为零中心标准化瞬时幅度。

利用特征参量 $M_1$ 对ASK、FSK、PSK信号进行了粗略的鉴别。从时域分析中可以看出，ASK信号的包络线不是固定的，也就是说，其瞬时振幅不是常数，所以特征参量 $M_1$ 不等于零；FSK信号具有不变的包络线，其瞬时振幅是常数，从而特征参量 $M_1$ 等于零；PSK信号，由于其振幅仅在相位突变的瞬时发生改变，因此特征参量 $M_1$ 很小，所以只要选取适当的阈值 $t(m_1)$ ，就能大致分辨出ASK、FSK、PSK信号。这一特征参量由于减少了通过FFT来确定谱密度<sup>[20]</sup>的运算量，因此，与对应的传统参数零中心归一化的瞬时振幅谱密度极大值 $r_{max}$ 比较，大大降低了计算量。

(2)递归零中心标准化瞬时振幅绝对值的平均数 $M_2$ 表达式为：

$$M_2 = \frac{1}{n} \sum_n |C'| \quad (6)$$

式中： $C' = (abs(C)/mean(abs(C))) - 1$ ； $C'$ 描述的是信号零点中心标准化的瞬时振幅。

利用这一特征参量对2ASK、4ASK信号进行了区分。从这两个信号的时域特征可以看出，其相应的瞬时振幅分别是2和4，也就是说，2ASK信号的特征参量 $M_2$ 比4ASK信号相应特征参量 $M_2$ 要小得多。所以，只要设定一个适当的阈值 $t(m_2)$ ，2ASK和4ASK信号就能被识别，这个参数的计算量也很小。

(3)零中心标准化瞬间频度绝对值的平均值 $M_g$ 表达式为：

$$M_g = \frac{1}{n} \sum_n |C_g| \quad (7)$$

式中： $C_g = (abs(c_g)/mean(abs(c_g))) - 1$ ， $c_g = DIF(c')$ ，函数 $DIF()$ 的作用是提取频率； $C_g$ 为零中心标准化瞬时频率。

利用这一特征参量对2FSK、4FSK信号进行区别。与2PSK相比，4FSK信号具有至少两个瞬



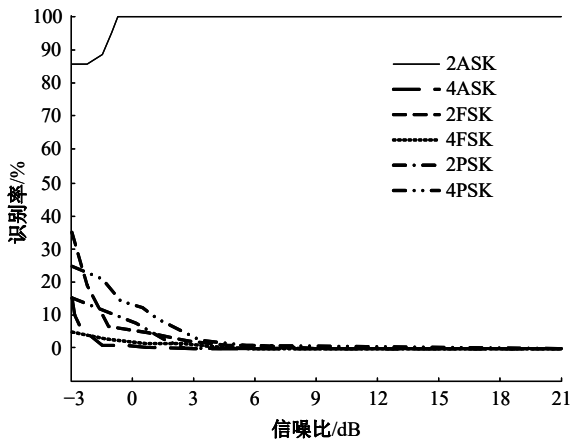


图2 2ASK信号调制识别

Fig. 2 2ASK signal modulation recognition

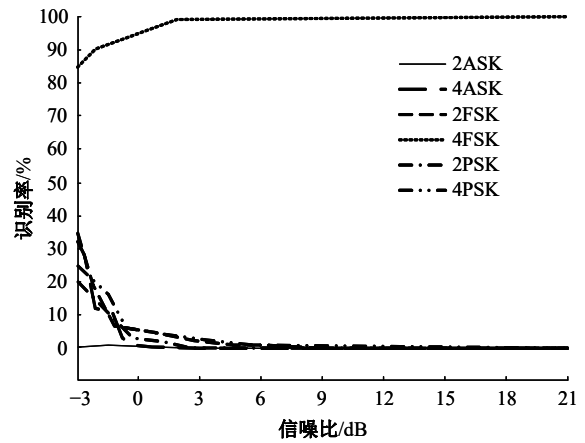


图5 4FSK信号调制识别

Fig. 5 4ASK signal modulation recognition

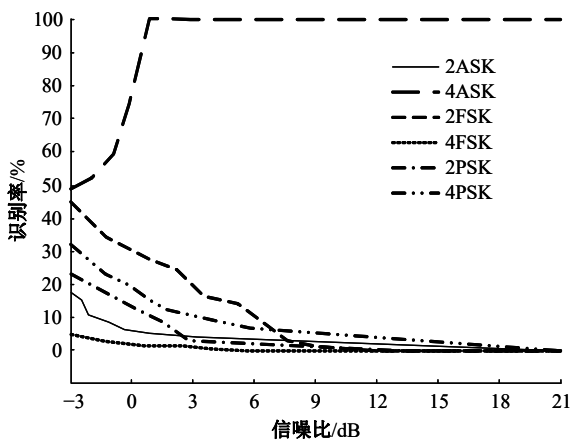


图3 4ASK信号调制识别

Fig. 3 4ASK signal modulation recognition

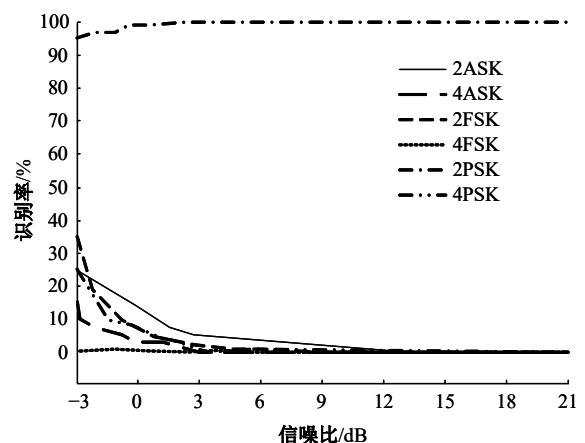


图6 2PSK信号调制识别

Fig. 6 2PSK signal modulation recognition

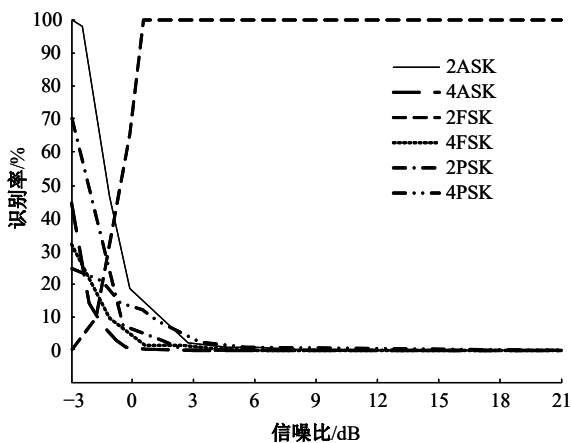


图4 2FSK信号调制识别

Fig. 4 2FSK signal modulation recognition

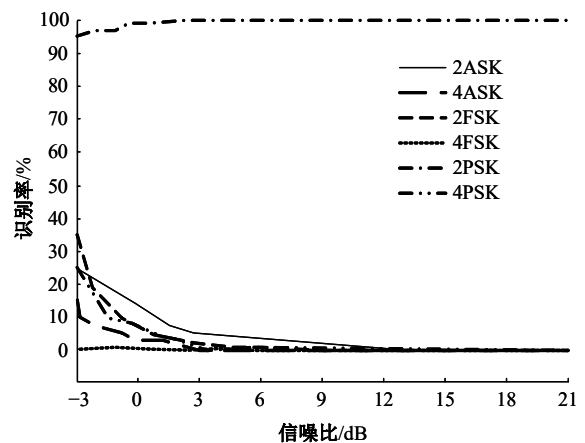


图7 4PSK信号调制识别

Fig. 7 4PSK signal modulation recognition

才为100%，但也能精准识别，而不属于此种类型的信号则识别率会逐渐趋近于零。由此说明本文算法能够剔除噪声的干扰，准确地识别当前短波数字信号调制类型，性能较佳。

## 5 结束语

数字信号调制识别技术可以对数字信号调制模式自动辨识，在多系统通信连通性和软件无线电领域有很大的应用价值。随着计算机技术、高

速数字信号处理技术等快速发展,已有技术支撑的数字信号调制与识别技术,人们对其在无线电中的价值也有了更深层次的认识。因此,提出了低信噪比下短波数字信号调制识别算法研究。构建被识别的短波数字信号模型,获取其截获的信号特征,并对信号进行处理,获取其振频响应特性,利用小波滤波提取瞬时特征参数,对信号分类,从而完成短波数字信号调制识别。

#### 参考文献:

- [1] 白维维, 梁丽香. 物联网下多径信道数字信号调制检测研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 346-349.  
Bai Wei-wei, Liang Li-xiang. Research on modulation detection of multipath channels under internet of things [J]. Computer Simulation, 2018, 35(5):346-349.
- [2] Chen W, Jiang Y, Zhang L, et al. A new modulation recognition method based on wavelet transform and high-order cumulants[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1738: 012025.
- [3] 李泊含, 刘芸江, 李艳福. 基于多尺度金字塔池化的调制识别算法[J]. 光电与控制, 2022, 29(12): 18-24.  
Li Bo-han, Liu Yun-jiang, Li Yan-fu. A modulation recognition algorithm based on multi-scale pyramid pooling[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(12): 18-24.
- [4] Mi X, Chen X, Liu Q, et al. Radar signals modulation recognition based on bispectrum feature processing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1971(1): 012099.
- [5] Chen K, Zhu L, Chen S, et al. Deep residual learning in modulation recognition of radar signals using higher-order spectral distribution[J]. Measurement, 2021, 185: 109945.
- [6] 戴江安, 栾声扬, 赵明龙, 等. 脉冲噪声下基于平滑循环相关熵谱的调制识别方法[J]. 通信学报, 2021, 42(12): 121-133.  
Dai Jiang-an, Luan Sheng-yang, Zhao Ming-long, et al. Pol-CCES based modulation recognition method under impulsive noise[J]. Journal on Communications, 2021, 42(12): 121-133.
- [7] Peng L, Fang S, Fan Y, et al. A method of noise reduction for radio communication signal based on RAGAN[J]. Sensors, 2023, 23(1): 23010475.
- [8] 宋子豪, 程伟, 彭岑昕, 等. 基于CWD和残差收缩网络的调制方式识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3371-3379.  
Song Zi-hao, Cheng Wei, Peng Cen-xin, et al. Modulation recognition method based on CWD and residual shrinkage network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3371-3379.
- [9] 杨洪娟, 时统志, 李博, 等. 基于联合特征参数的卫星单-混信号调制识别研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3499-3506.  
Yang Hong-juan, Shi Tong-zhi, Li Bo, et al. Research on satellite single-mixed signal modulation recognition based on joint feature parameters[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(10): 3499-3506.
- [10] 许华, 苟泽中, 蒋磊, 等. 适用于样本分布差异的迁移学习调制识别算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(4): 127-132.  
Xu Hua, Gou Ze-zhong, Jiang Lei, et al. Transfer learning modulation recognition algorithm for differences in sample distribution[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2021, 49(4): 127-132.
- [11] An Z L, Zhang T Q, Ma B Z, et al. A two-stage high-order modulation recognition based on projected accumulated constellation vector in non-cooperative B5G OSTBC-OFDM systems[J]. Signal Processing: The Official Publication of the European Association for Signal Processing (EURASIP), 2022, 200: 108673.
- [12] 高敬鹏, 毛新蕊, 吴若无, 等. 混合滤波器优化的雷达信号调制识别算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(10): 1522-1531.  
Gao Jing-peng, Mao Xin-rui, Wu Ruo-wu, et al. Modulation recognition of radar signals based on hybrid filter optimization[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(10): 1522-1531.
- [13] Chen J, Han B, Ma X, et al. Underwater target recognition based on multi-decision lofar spectrum enhancement: a deep-learning approach[J]. Future Internet, 2021, 13(10): 13100625.
- [14] 王洋, 冯永新, 宋碧雪, 等. DP-DRCnet卷积神经网络信号调制识别算法[J]. 兵工学报, 2023, 44(2): 545-555.  
Wang Yang, Feng Yong-xin, Song Bi-xue, et al. A modulation recognition algorithm of DP-DRCnet convolutional neural network[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(2): 545-555.
- [15] Gao J, Wang X, Wu R, et al. A new modulation recognition method based on flying fish swarm algorithm [J]. IEEE Access, 2021, 9: 76689-76706.
- [16] 张笑宇, 冯永新, 钱博. 一种分数域数字信号调制

- 方式识别方法[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(1): 13-17.
- Zhang Xiao-yu, Feng Yong-xin, Qian Bo. A modulation recognition method for digital signals in fractional domain[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(1): 13-17.
- [17] 董章华, 赵士杰, 赖莉. 一种基于Swin Transformer神经网络的低截获概率雷达信号调制类型的识别方法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2023, 60(2): 42-48.
- Dong Zhang-hua, Zhao Shi-jie, Lai Li. A radar signal modulation type recognition method based on Swin Transformer neural network[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2023, 60(2): 42-48.
- [18] 任庭瑞, 于笑楠, 佟首峰, 等. 基于数字信号处理的高灵敏度水下光通信收发机设计与评估[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 107-116.
- Ren Ting-ruì, Yu Xiao-nan, Tong Shou-feng, et al. Design and evaluation of high-sensitivity underwater optical communication transceiver based on digital signal processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 107-116.
- [19] Chen K, Zhang J, Chen S, et al. Automatic modulation classification of radar signals utilizing X-net[J]. Digital Signal Processing, 2022, 123: 103396.
- [20] 吴力华, 杨露菁, 袁园. 基于EEMD降噪和模糊函数奇异值向量的雷达辐射源信号识别算法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(2): 121-126.
- Wu Li-hua, Yang Lu-jing, Yuan Yuan. An identification algorithm for radar emitter signals based on EEMD denoise and ambiguity function singular value vectors[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(2): 121-126.