

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.05

多特征参数聚类分析的特定辐射源识别方法研究

彭进先¹, 桑苗苗², 耿丹¹, 周伦¹, 高澜¹, 曹迎禧¹

(1. 中国人民解放军63611部队, 新疆库尔勒841000; 2. 中国人民解放军63618部队, 新疆库尔勒841000)

摘要: 为实现复杂环境中的电磁信号识别, 提出多特征参数聚类分析的特定辐射源识别方法。通过分析与辐射源相关的10种特征参数, 建立特定辐射源特征数组, 构建聚类表达式, 利用辐射源电磁信号参数的类间分离性和类内聚集性, 实现对特定辐射源的归类识别。理论分析和实验表明: 专家打分法的多参数计算结果更离散, 有利于识别特定辐射源。研究成果为推动电磁信号探测分辨领域发展提供了有力支撑, 具有技术借鉴价值。

关键词: 特定辐射源识别; 聚类分析; 特征参数; 特征数组

中图分类号: TB97; TN98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)06-0045-09

Research on specific emitter identification method based on multi-feature parameter cluster analysis

PENG Jinxian¹, SANG Miaomiao², GENG Dan¹, ZHOU Lun¹, GAO Lan¹, CAO Yingxi¹

(1. Unit 63611 of PLA, Korla 841000, China; 2. Unit 63618 of PLA, Korla 841000, China)

Abstract: To achieve electromagnetic signal recognition in complex environments, a specific emitter identification (SEI) method based on multi-feature parameter cluster analysis is proposed. By analyzing ten feature parameters related to emitter, establishing a specific emitter feature array, constructing a clustering equation, and using the separation between classes and intra-class clustering of electromagnetic signal parameters, the identification of specific emitter can be enabled. Theoretical analysis and experiments show that the multi-parameter calculation results of the expert scoring method are more discrete, which is a benefit to the identification of specific emitter. The research results provide strong support for promoting the development of electromagnetic signal detection and resolution technologies, and have technical reference value.

Key words: SEI; cluster analysis; feature parameters; feature array

0 引言

特定辐射源识别主要通过对辐射源电磁信号的相关特征参数分析测量实现。传统的辐射源电

磁识别方法通过测量电磁信号的脉宽、脉幅、到达时间、到达角、载频等特征参数(一般称为脉冲描述字, Pulse Descriptive Words, PDW)实现对电磁信号的分选识别。实践表明: 这种方法很难适应如今复杂战场电磁环境^[1-3]。随着电子测量技术的发展, 基于电磁信号脉内特征分析测量、辐射源

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-08-16

基金项目: 国家试验技术研究项目(2019Y004)

引用格式: 彭进先, 桑苗苗, 耿丹, 等. 多特征参数聚类分析的特定辐射源识别方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 45-53.

Citation: PENG J X, SANG M M, GENG D, et al. Research on specific emitter identification method based on multi-feature parameter cluster analysis[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 45-53.



指纹特征分析等方法先后被国内外学者提出和实践,从而进一步促进了复杂电磁环境下的电磁信号识别技术的发展^[4-6]。但这两种方法对人员的电子信息素养及测量设备的要求较高,目前还没有在靶场、发射场等场所和作战、训练、试验等环境中应用。

因此,基于训练场的客观条件,本文从所截获辐射源电磁信号的多个特征参数中,分析出表征辐射源个体特征的信息,运用类内聚集性、类间分离性的聚类分析识别算法实现区分电磁信号属性的目的。

1 辐射源的特征参数

电磁信号的特征参数携带了辐射源个体特征信息,这些特征信息主要体现在辐射源硬件对信号的无意调制上^[5]。信号的无意调制主要是由辐射源发射机的频率源振荡器、发射管、调制器 and 高压电源等器件或电路产生的不希望出现的各种寄生调制造成的,例如:由辐射源的频率源带来的频率基准特征;由信号调制电路生成的脉冲信号的前、后沿上升时间、过冲、脉冲宽度偏差、脉冲幅度波动等特征;由天馈部分带来的天线方向图特征差异;由伺服控制带来的扫描特征差异等^[6-9]。这些无意调制特征是每一部辐射源所特有的信号属性,具有唯一性、稳定性、独立性、可测性^[10]。测量辐射源硬件对信号无意调制的相关特征参数,根据这些参数对辐射源进行识别,主要包括:

1) 信号载波频率 f

在电磁信号分选和识别领域, f 是一项很重要的参数,大部分体制的电磁信号会基于载波频率调制,甚至通过不断变化载波频率达到隐藏目的。

2) 信号宽度 P_w

P_w 是信号在时域维持最大值所持续的周期,该参数在电磁信号分选识别中具有重要价值,是人工调制所选择的重要参数,在识别过程中往往要考虑脉宽的变化规律。

3) 信号幅度 P_A

P_A 不具备明显的单独特征,在多个信号之间通常相等,在不同电磁信号之间也会出现相似或相等的情况。

4) 信号重复周期 P_{Rl}

P_{Rl} 是指同一辐射源相邻信号之间的时间间隔序列,即 $P_{Rl} = T_{O_{A,i}} - T_{O_{A,i-1}}$,在电磁信号处理领域是一个极为重要的参数,并且在电磁信号参数中变化方式较复杂。若要测量 P_{Rl} ,必须得知每个信号的到达时间,而 P_{Rl} 的精度受 T_{O_A} 测量精度和误差的影响,甚至会受噪声和干扰脉冲的影响。目前,有参差 P_{Rl} 、抖动 P_{Rl} 、参差抖动 P_{Rl} ,甚至还有无规律 P_{Rl} 信号,这些新的信号产生技术给信号识别带来了巨大挑战。

5) 信号带宽 B_w

B_w 是信号频谱的宽度,信号最高频率分量与最低频率分量之差。在测量系统参数时, B_w 受测量仪器和信号传输效应的影响,测量误差较大,在信号分选识别中辅助辐射源进行信号识别。

6) 过冲

过冲是振铃的一部分,信号电平发生跳变后,第一个峰值或谷值会超过预定的标准值,表现为一个尖端脉冲,主要由辐射源和测量仪器共同决定。过冲常用百分比表示,如图1所示。设标准值为 p ,则过冲 ξ 为

$$\xi = d_{\text{overshoot}} / p \quad (1)$$

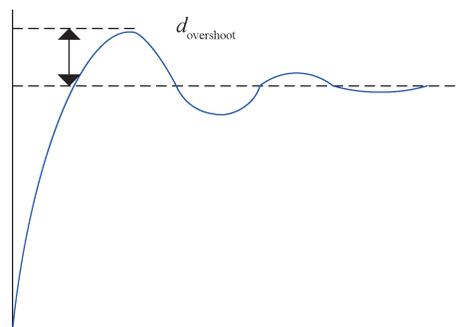


图1 过冲示意图

Fig.1 Schematic diagram of overshoot

7) 上升时间

上升时间是信号从稳态值的10%上升到稳态值的90%所需的时间,由式(2)确定。

$$t_r = \sqrt{t_{r1}^2 + t_{r2}^2} \quad (2)$$

式中: t_{r1} 为辐射源信号的上升时间, t_{r2} 为测量仪器的上升时间。

由式(2)可知,上升时间可以作为特定辐射源信号识别的重要参数。

8) 下降时间

下降时间是信号从稳态值的90%下降到稳态值的10%所需的时间,计算方法与上升时间类似。下降时间亦可作为辐射源信号识别的重要参数。

9) 频率波动

频率波动是信号的中心频率偏移量,与辐射源频率振荡源相关,是特定辐射源信号识别的重要参数,是辐射源频率的重要二次特征参数。

10) 信号宽度相对偏差

信号宽度相对偏差是信号宽度的延伸量,统计信号宽度与标准值(平均值)的相对偏差,用百分比来表示,该参数与辐射源硬件电路密切相关。属于辐射源的二次特征参数。

信号载波频率 f 、宽度 P_w 、幅度 P_A 、重复周期 P_{RI} 、带宽 B_w 等也称为辐射源的脉冲描数字,是经典的辐射源识别参数^[1]。

2 识别算法理论分析与实验

识别聚类分析算法是一种基于数据对象之间相似性的无监督学习方法,将数据分成若干类,被划分在同一类内的数据间相似度很高,分属不同类的数据间差异度较大。基于聚类分析的识别算法提取信号中具有强类内聚集性和类间分离性的特征,尽可能地把单部辐射源所发射的信号划归成一类。

2.1 理论分析

首先,建立辐射源信号特征参数与辐射源的内在关联特性,将辐射源关联性强的特征参数提取出来,建立为该辐射源的特征数组,这是聚类分析识别算法的基础;其次,构建特定辐射源电磁信号聚类识别表达式,运用聚类分析的识别算法提取电磁信号中具有强类内聚集性和类间分离性的特性,通过专家系统为辐射源特征数组赋值,强化辐射源电磁信号的“类内聚集、类间分离”特性,研究构建聚类识别表达式并确定自动识别阈值。

2.1.1 建立辐射源特征数组

综合考虑辐射源脉冲描数字、辐射源电磁信号的指纹特性及实验不断迭代,提取对于信号识别具有较强辨识意义的10个特征参数,分别是频率(MHz)、过冲(%),方位($^{\circ}$)、带宽(MHz)、幅

度(dBm)、重复周期(μs)、上升时间(μs)、下降时间(μs)、脉宽(μs)、频率波动(kHz)。信号识别可以将采集信号的特征参数与已知信号进行比对,从而确定电磁信号的辐射源属性^[6-7]。

建立电磁信号特征参数的特征数组: [频率 过冲 方位 带宽 幅度 重复周期 上升时间 下降时间 脉宽 频率波动],则某已知辐射源电磁信号S可表示为

$$S = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5 \ s_6 \ s_7 \ s_8 \ s_9 \ s_{10}]$$

其中, $s_1 \sim s_{10}$ 分别对应已知辐射源电磁信号S的频率、过冲、方位、带宽、幅度、重复周期、上升时间、下降时间、脉宽、频率波动10个特征参数。监测到某未知辐射源X表示为

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10}]$$

其中, $x_1 \sim x_{10}$ 分别对应某未知辐射源信号的频率、过冲、方位、带宽、幅度、重复周期、上升时间、下降时间、脉宽、频率波动等10个参数。

2.1.2 构建辐射源聚类识别表达式

为识别未知信号X是否属于S,利用数学方法,判断X与其真值S之间的关系。可采用改进后的均方根误差(R_{MSE})对偏离程度进行描述。

R_{MSE} 用于衡量观测值与真值之间的关系,是误差平方和的平均数开平方,均方根误差越小,越接近真值,关系式如式(3)所示。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - s_i)^2} \quad (3)$$

式中: N 为参与计算的参数数量, x_i 和 s_i 分别为X和S的第 i 个参数。

由于电磁信号不同类别特征参数的数量级差距较大,为防止数量级大的特征参数对判断结果产生强干扰,需要对其误差先进行归一化后再求平方和、求平均、开方。等权值辐射源识别计算公式为

$$R_{MSE, nor} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - s_i}{s_i} \right)^2} \quad (4)$$

考虑到不同的特征参数对辐射源识别准确度的贡献不同,对式(4)进行改进,调整不同特征参数在计算中所占的比重,得到专家打分法的辐射源识别表达式

$$R_{MSE, wei} = \sqrt{\sum_{i=1}^N w_i \left(\frac{x_i - s_i}{s_i} \right)^2} \quad (5)$$

式中: w_i 为不同特征参数所占比重,其权值由专家

根据经验或先验知识打分法确定, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。

假定信号的各项特征参数允许最大波动范围均为15%, 则分别根据式(4)和式(5)计算得出, 等权值法的 $R_{MSE, nor}$ 和专家打分法 $R_{MSE, wei}$ 的上限均为0.15。

利用等权值法式(4)或专家打分法式(5), 计算未知信号相对于已知信号的 $R_{MSE, nor}$ 或 $R_{MSE, wei}$, 其值越小则说明与已知信号越接近, 越具有相似性。最大值由已知信号各特征参数允许的最大波动范

围确定, 若 $R_{MSE, nor}$ 或 $R_{MSE, wei}$ 超出该值, 则检测信号不属于该已知辐射源信号, 最终实现对未知辐射源的识别。

2.2 仿真实验

2.2.1 确立已知信号特征参数

已知辐射源的线性调频信号: 频率13 000、方式三角波、范围20、步进5、重复周期200、脉宽40、脉内参数为正斜率线性调频10 MHz, 如表1所示。图2为已知信号的时域特性, 图3为频域特性。

表1 已知某辐射源的信号特征参数

Tab.1 Feature parameters of a known emitter signal

频率 / MHz	过冲 / %	方位 / (°)	带宽 / MHz	幅度 / dBm	脉冲重复周期 / μs	上升时间 / μs	下降时间 / μs	脉宽 / μs	频率波动 / kHz
13 000	6.265	150	9.945	-11.729	199	4.197	5.855	40.640	94.036

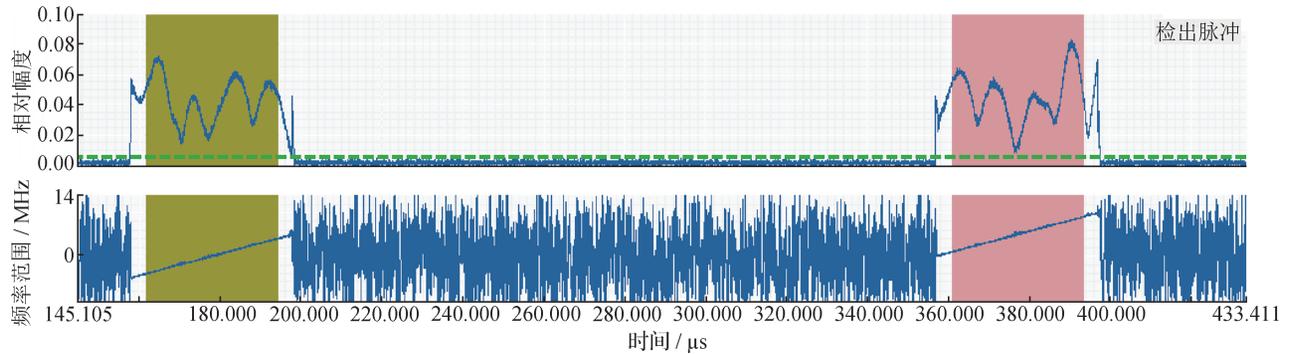


图2 已知信号的时域特性

Fig.2 Time-domain features of the known signal

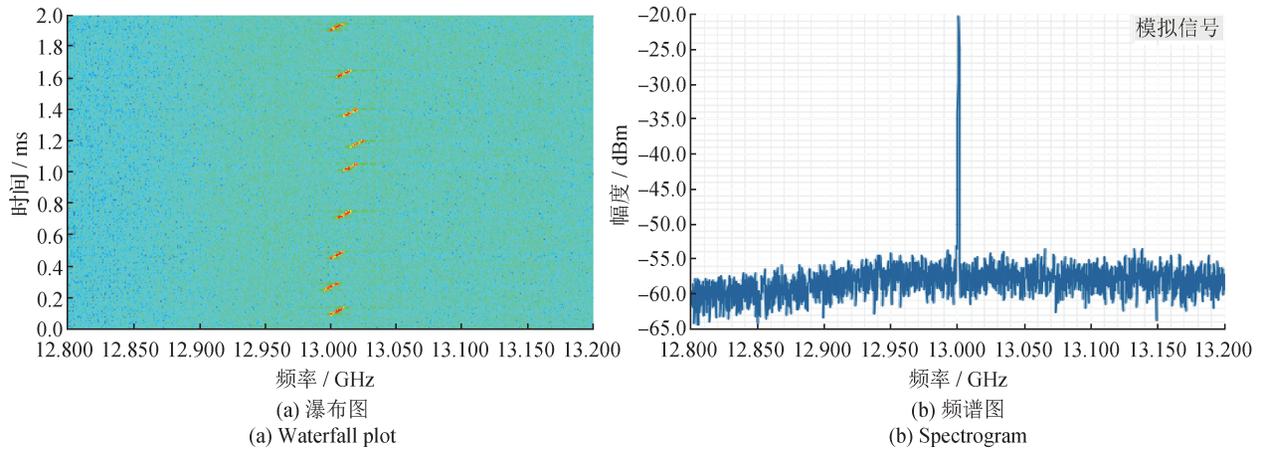


图3 已知信号的时间频率特性

Fig.3 Time-frequency features of the known signal

已知辐射源的特征数组为

$$S = [13\ 000\ 6.265\ 150\ 9.945\ -11.729\ 199$$

4.197 5.855 40.640 94.036]

设置5组未知辐射源信号

$X1 = [9\ 500\ 10.2\ 180\ 10.0\ -49.25\ 189\ 8.2\ 13.9\ 70.0\ 982.3]$
 $X2 = [9\ 025\ 4.504\ 150\ 0.122\ -6.125\ 200\ 1.443\ 1.538\ 44.8\ 17.499]$
 $X3 = [13\ 040\ 7\ 160\ 9.945\ -11.729\ 230\ 5\ 6.6\ 38.000\ 90]$
 $X4 = [12\ 950\ 18.124\ 150\ 0.691\ -32.471\ 309.66\ 6.161\ 2.238\ 40\ 27.989]$
 $X5 = [13\ 500\ 3.212\ 120\ 20.244\ -4.585\ 166.24\ 0.197\ 1.589\ 41.74\ 3\ 139]$

2.2.2 实验结果分析

1) 单个特征参数

若只考虑信号频率一个特征参数，则5组未知信号相对于已知信号计算结果R如表2所示，用直方图表示计算结果，如图4所示。

表2 一个特征参数的仿真计算结果

Tab.2 Simulation result of a feature parameter

方法	R1	R2	R3	R4	R5
等权值	0.269 2	0.305 8	0.003 1	0.003 8	0.038 5
专家打分	0.269 2	0.305 8	0.003 1	0.003 8	0.038 5

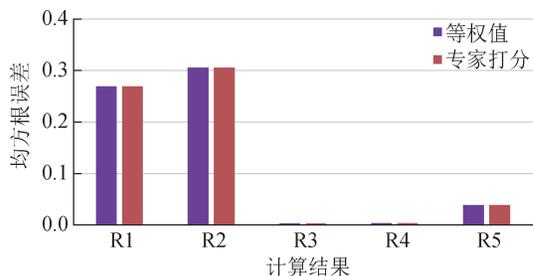


图4 单个特征参数的仿真计算结果

Fig.4 Simulation result of a single feature parameter

由表2和图4看出，只考虑一个特征参数的情况下，两种方法的计算结果相同。根据未知辐射源信号X1、X2、X3、X4、X5的计算结果，与已知辐射源S同类的可能性为 $X3 > X4 > X5 > X1 > X2$ ，这与各自的频率偏差相符，可以看出，只使用一个特征参数信号识别精度很低。

2) 多个特征参数

根据经验，信号频率、过冲、方位在信号识别中所占的比重较大，若只考虑信号频率、过冲、方位三个特征参数，权值系数 $W = [0.5\ 0.35\ 0.15]$ ，则5组未知信号相对于已知信号计算结果R如表3所示，用直方图表示计算结果，如图5所示。

由表3和图5可以看出，考虑频率、过冲、方位三个特征参数时，信号X1、X2、X4、X5的计算结果均大于0.15，不可能与S同类，信号X3的计算结果最小，可能与S同类。

表3 三个特征参数的仿真计算结果

Tab.3 Simulation results of three feature parameters

方法	R1	R2	R3	R4	R5
等权值	0.411 1	0.239 8	0.077 9	1.092 9	0.304 9
专家打分	0.424 6	0.272 8	0.074 1	1.119 9	0.299 8

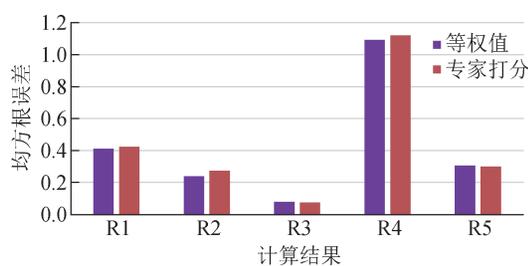


图5 三个特征参数的仿真计算结果

Fig.5 Simulation results of three feature parameters

3) 十个特征参数

考虑所有特征参数，根据经验将权重系数取值为 $W = [0.5\ 0.08\ 0.07\ 0.05\ 0.05\ 0.05\ 0.05\ 0.05\ 0.05\ 0.05]$ ，则计算结果R如表4所示，用直方图表示计算结果，如图6所示。

由表4和图6可以看出，只有信号X3可能与S同类。相对于三个特征参数，多特征参数的计算结果更离散，更能够体现不同信号的差异性(类间

表4 十个特征参数的仿真计算结果

Tab.4 Simulation results of ten feature parameters

方法	R1	R2	R3	R4	R5
等权值	3.213 9	0.549 9	0.100 7	0.947 6	10.255 3
专家打分	2.282 5	0.442 3	0.074 7	0.746 0	7.252 2

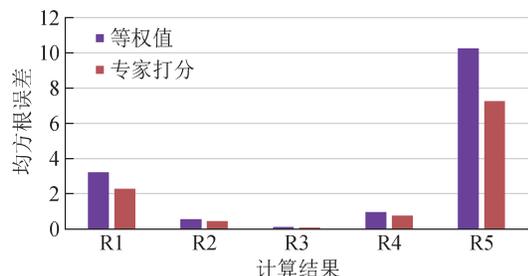


图6 十个特征参数的仿真计算结果

Fig.6 Simulation results of ten feature parameters

分离性), 有利于同类信号的聚类(类内聚集性); 相对于等权值法, 专家打分法计算的结果更小, 更能科学地体现各特征参数在信号识别中所占比重差异。因此, 为了更加精准高效识别辐射源, 应采用多特征参数专家打分的方法识别判定。

3 系统实现

战场电磁环境非常复杂, 电磁信号主要来源包括: ①民用辐射源, 如电视广播发射台、无线电台站、地方气象雷达等; ②训练场区已有无线电设备, 如测控雷达、气象雷达、卫星通信、无

线宽带等; ③训练环境模拟系统和对抗模拟系统, 如用于电磁环境构设的雷达信号环境模拟系统和通信信号环境模拟系统, 用于红蓝对抗训练的通信/导航对抗模拟系统等。基于文中的理论方法, 构建电磁信号识别原型系统, 采集辐射源电磁信号的特征参数, 建立特征数组, 运用识别算法对辐射源进行识别判定。

3.1 系统构建

3.1.1 系统硬件

根据研究需要, 按图7所示的原理框图构建电磁信号监测识别系统。

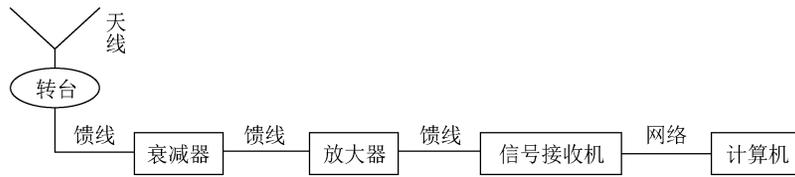


图7 电磁信号监测识别系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of electromagnetic signal detection and identification system

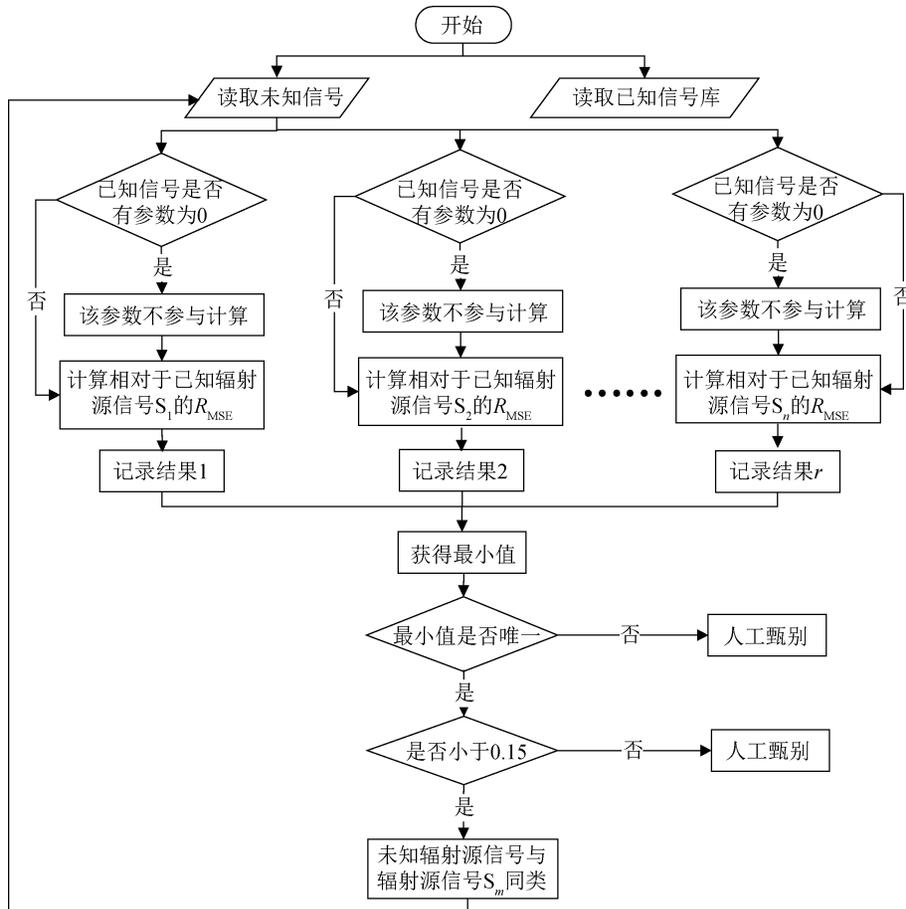


图8 辐射源电磁信号识别流程图

Fig.8 Flow chart of emitter electromagnetic signal identification

3.1.2 系统软件

特定辐射源电磁信号识别算法基于 MATLAB 软件开发编写, 算法流程如图 8 所示。

3.2 电磁信号识别判定

3.2.1 建立已知辐射源的特征库

根据先验知识及监测结果, 将训练场区的已知辐射源电磁信号特征数组存入数据库, 或者通

过信号监测识别系统测量、采集已知辐射源电磁信号特征, 并将特征参数存入数据库。在原型系统工作中, 监测发现新信号却难以识别时, 通过人工判定并更新数据库。建立的已知辐射源特征数组存入已知辐射源特征库, 如表 5 所示。

对于连续波信号, 脉冲重复周期为 $0 \mu\text{s}$, 在计算时, 忽略此项。

表 5 已知辐射源特征库

Tab.5 Feature library of the known emitter

信号类别	符号	频率 / MHz	过冲 / %	方位 / ($^{\circ}$)	带宽 / MHz	幅度 / dBm	脉冲重复周期 / μs	上升时间 / μs	下降时间 / μs	脉宽 / μs	频率波动 / kHz
对讲机信号	S1	408.639	10.02	90	0.012 5	-72.2	0	2.35	5.62	30	0.21
华为通信系统	S2	575.84	12.5	230	20	-70.2	0	5.63	6.55	60.2	2 365
移动通信信号	S3	942	5.1	272	24	-90.2	0	8.62	10.2	40.3	3 201
某干扰系统	S4	1 596.8	8.2	100	1	-90.3	166.24	7.62	8.24	41.74	99.6
遥测信号 1	S5	2 206.93	2.5	92	2	-79.2	0	1.6	3.2	50	150
遥测信号 2	S6	2 242.82	2.6	92	2	-84.3	0	1.7	4.3	50	158
无人机遥控上行	S7	2 435.08	5.8	100	0.1	-110.3	0	15.3	18.9	20	2.5
无人机数传下行 1	S8	5 735.42	5.2	120	10	-110.2	0	8.6	12.3	60.3	1 502
无人机数传下行 2	S9	5 809.84	5.4	120	20	-101.5	0	5.6	9.6	60.2	1 982
某雷达模拟源 1	S10	9 500	10.2	180	10	-49.25	189	8.2	13.9	70.0	982.3
某 Ku 频段干扰系统 1 信号 1	S11	13 000	4.504	150	0.122	-6.125	200	1.443	1.538	44.8	17.499
某 Ku 频段干扰系统 2 信号 2	S12	13 000	6.265	150	9.945	-11.729	199	4.197	5.855	40.640	94.036
某 Ku 频段干扰系统 3 信号 3	S13	13 000	18.124	150	0.691	-32.471	309.66	6.161	2.238	40	27.989
某雷达模拟源 2	S14	13 000	3.212	120	20.244	-4.585	166.24	0.197	1.589	41.74	3 139

3.2.2 数值计算和识别结果分析

在某次任务中, 共采集了 155 组电磁信号特征参数, 编号为 X1 ~ X155, 按照相应的格式, 存储为 155 组。

将采集的辐射源电磁信号特征参数与已知辐射源信号逐一运算比对识别, 计算 $R_{\text{MSE,wei}}$ 。其中 146 个电磁信号的 $R_{\text{MSE,wei}} \leq 0.15$, 即达成与已知信号的比对识别。经人工核验, 识别结果正确。初步识别率达 94%。

通过观察发现, $0.15 < R_{\text{MSE,wei}} < 0.3$ 为疑似信号, 需要人工核验; $R_{\text{MSE,wei}} \geq 0.3$, 为库外辐射源信号。辐射源识别结果统计如图 9 所示。

疑似和库外共有 9 个电磁信号的计算结果 $R_{\text{MSE,wei}} > 0.15$, 需要人工识别判定。相关情况列于

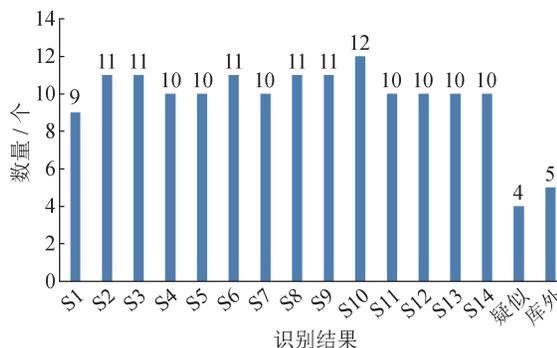


图 9 辐射源初步识别结果统计
Fig.9 Statistical result of preliminary identification of emitter

表 6。情况分析如下:

1) 通信信号识别错误率高于雷达信号, 因为通信信号为连续波信号, 计算时忽略了脉冲重复周期这项特征参数, 不利于同类信号的聚类性。

表6 人工识别判定
Tab.6 Manual identification

序号	信号	频率 / MHz	过冲 / %	方位 / (°)	带宽 / MHz	幅度 / dBm	脉冲重复周期 / μs	上升时间 / μs	下降时间 / μs	脉宽 / μs	频率波动 / kHz	计算结果 R	人工核验
1	X4	2 439.430	6.870	106	0.088	-111.13	2.950	15.250	18.710	15.760	5.601	0.287 9	正确
	S7	2 435.08	5.8	100	0.1	-110.3	0	15.3	18.9	20	2.5		
2	X27	2 241.760	3.410	83	2.455	-77.030	1.820	2.501	4.430	48.071	153.820	0.150 4	正确
	S6	2 242.82	2.6	92	2	-84.3	0	1.7	4.3	50	158		
3	X42	2 435.771	5.801	100	0.459	-103.860	0.130	14.201	18.970	16.310	4.220	0.571 3	错误,与 S7一类
	S8	5 735.42	5.2	120	10	-110.2	0	8.6	12.3	60.3	1 502		
4	X67	1 599.41	9.16	102	1.72	-89.48	163.79	8.06	7.56	52.36	102.91	0.175 7	正确
	S4	1 596.8	8.2	100	1	-90.3	166.24	7.62	8.24	41.74	99.6		
5	X83	12 467.810	4.290	151	0.862	-0.301	199.790	2.010	1.450	45.961	15.901	0.381 1	正确,库外信号
	S13	13 000	18.124	150	0.691	-32.471	309.66	6.161	2.238	40	27.989		
6	X99	409.140	10.150	90	0.028	-68.24	19.930	3.320	6.82	20.321	1.031	0.448 3	错误,与 S1一类
	S2	575.84	12.5	230	20	-70.2	0	5.63	6.55	60.2	2365		
7	X105	489.841	10.841	87	0.281	-72.330	565.831	1.701	6.731	33.980	0.571	0.414 9	正确,库外信号
	S2	575.84	12.5	230	20	-70.2	0	5.63	6.55	60.2	2365		
8	X126	412.211	9.951	87	0.318	-75.120	46.760	1.501	5.721	28.661	0.241	0.459 2	正确,库外信号
	S2	575.84	12.5	230	20	-70.2	0	5.63	6.55	60.2	2365		
9	X149	2 439.431	6.871	106	0.088	-111.131	2.950	15.251	18.710	15.760	5.601	0.288 0	正确
	S7	2 435.08	5.8	100	0.1	-110.3	0	15.3	18.9	20	2.5		

2) 未知信号 X4、X27、X67、X149 计算值 $R_{\text{MSE,wei}}$ 偏大, 主要因为电磁波传播多径效应和测量仪器本身误差, 导致个别参数测量误差较大, 尤其是数值较小的参数项, 受影响较大。

3) 未知信号 X42、X99 的计算结果与实际不相符。经人工核验, X42 与已知信号 S7 (无人机遥控上行) 为一类, 其 $R_{\text{MSE,wei}}$ 值为 0.818 7, 主要受带宽测量值偏大的影响; X99 与已知信号 S1 (对讲机信号) 为一类, 其 $R_{\text{MSE,wei}}$ 值为 0.925 9, 主要受频率波动测量值偏大的影响。

4) 未知信号 X83、X105、X126 判断为库外信号。经人工核验, X83、X105、X126 不与任何已知信号为一类, 属于库外辐射源信号。

将试验结果与人工核验结果比对, 修正后的识别正确率达 98.7%。

通过以上分析, 基于多信号特征参数聚类分析的特定辐射源识别方法能够应用于战场辐射源

电磁信号识别, 具有较高的识别率。

4 结论

近年, 运用电磁辐射源、干扰源、场区无线中继等装备构设训练环境、开展红蓝对抗, 使得战场电磁环境越来越复杂, 对训练场区辐射源识别和红蓝白电磁信号属性判定带来了挑战。文中提出的基于电磁信号多特征参数聚类分析的辐射源识别方法, 通过对未知辐射源电磁信号的属性判定, 实现对训练场区特定辐射源的归类识别。原型系统应用表明, 该方法具有性价比高、实用性强等特点, 军事效益显著。

参考文献

- [1] 吴惟诚, 潘继飞, 杨丽. 雷达信号分选技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2016(12): 71-76.
WU W C, PAN J F, YANG L. A review of research on radar signal sorting technology [J]. Flying Missiles, 2016

- (12): 71-76. (in Chinese)
- [2] 汪连栋, 申绪洞, 韩慧. 复杂电磁环境概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
WANG L D, SHEN X J, HAN H. Introduction to complex electromagnetic environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 黄卓越. 大规模雷达信号数据识别系统设计与实现[D]. 电子科技大学, 2018.
HUANG Z Y. Design and implementation of large-scale radar signal data recognition system [D]. University of Electronic Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [4] 蔡菁, 史博, 王辰辰. 信号调理器对动态测试的影响[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 83-88.
CAI J, SHI B, WANG C C. Influence of signal conditioner to dynamic measurement[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(3): 83-88. (in Chinese)
- [5] 韩韬. 脉冲信号辐射源个体识别技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
HAN T. Research on the techniques of specific emitter identification for pulse signals [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 任黎丽. 辐射源指纹识别与细微特征提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
REN L L. Research on emitter fingerprint identification and fine feature extraction [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [7] 陶海平. 通信信号调制制式的识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
TAO H P. The research of modulation identification of communication signals [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [8] 梁志国. 数据采集系统非典型采样故障的特征识别与定量表征[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 17-22.
LIANG Z G. Feature recognition and quantitative characterization of a typical sampling faults in data acquisition systems [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(6): 17-22. (in Chinese)
- [9] 蔡晨光, 樊尚春, 邢维巍. 一种谐振式传感器频率特性测试平台[J]. 计测技术, 2007(1): 11-13.
CAI C G, FAN S C, XING W W. Frequency characteristics measuring platform of resonant sensors [J]. Metrology & Measurement Technology, 2007(1): 11-13. (in Chinese)
- [10] 姚亚峰, 黄载禄. 通信信号调制识别技术[J]. 通信技术, 2003(6): 41-43.
YAO Y F, HUANG Z L. Communication signal modulation and recognition technology [J]. Communication Technology, 2003(6): 41-43. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 彭进先 (1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电磁环境构设。