

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.008

雷达电子情报信号处理软件

王建涛¹, 岳玉芳², 沈卫超², 宋磊²

(1. 空军研究院, 北京 100085; 2. 北京应用物理与计算数学研究所邓稼先创新研究中心, 北京 100088)

摘要: 为满足侦察系统分选识别和综合处理的需求, 设计一种雷达电子情报信号处理软件及实现方法。对系统的基本组成及设计思路进行介绍, 采用 C/C++ 语言, 设计自动处理为主、人工处理为辅的分选算法, 设计基于置信度的辐射源识别算法, 利用专家系统对雷达的用途、体制、平台进行推理, 形成目标。应用结果表明: 该设计满足侦察系统的情报处理要求, 为新一代电子情报处理软件的雷达环境自适应、任务自适应功能提升提供了有益的帮助。

关键词: 雷达情报处理软件; 电子情报; 信号处理; 信号分选; 辐射源识别

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Radar Electronic Information Signal Processing Software

Wang Jiantao¹, Yue Yufang², Shen Weichao², Song Lei²

(1. Air Force Academy, Beijing 100085, China; 2. Deng Jiaxian Innovation Research Center, Beijing Institute of Applied Physics & Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: A radar information signal processing software and realization method is designed to satisfy the demands of signal sorting, recognizing, and comprehensive processing of reconnaissance system. General components of the software and design idea are discussed. Use C/C++ language to design the sorting algorithm which mainly by auto processing and partly by manual processing. Design emitter recognition algorithm based on confidence, use expert system to infer usage, technology, platform, and achieve target. Application results illustrate that the design satisfied the intelligence processing demands of reconnaissance system. It provides help for improving environment self-adaptation, task self-adaptation abilities for new-generation radar.

Keywords: radar information signal processing software; electronic information; signal processing; signal sorting; emitter recognition

0 引言

电子情报侦察 (electronic intelligence, ELINT) 是现代体系作战的重要环节, 通过截获并处理雷达辐射源的信号, 来获取雷达的功能参数、型号、所属平台和位置等信息。通过获取上述信息, 电子侦察系统为战场态势感知、威胁告警, 以及重点目标的识别、跟踪监视、以至软杀伤和硬摧毁提供必要的情报支持^[1-3]。随着雷达从固定的模拟系统向数字可编程系统的不断发展, 雷达在功能上和性能上获得了极大的扩展和提升, 相应地, 其信号也变得越来越复杂。特别是多功能雷达的出现, 给当前的电子情报信号处理带来了前所未有的挑战。

传统雷达电子战设备缺乏现场数据分析的能力, 对情报侦察数据的分析是通过导出数据后, 在现场以外的实验室或情报分析室, 用 Matlab 软件等纯科学分析工具来完成。文献[4-5]是基于 Matlab 软件的情报分析工具, 文献[6-9]研究了雷达性能评估、信号快速识别、情报处理与数据仿真等问题。

基于 Matlab 的分析由于缺乏及时性, 难以辅助操作人员 and 雷达自动控制软件及时调整雷达工作状态。为此, 文献[10]提出使用 Python 来实现雷达情报的分析功能, 包括从 C/C++ 语言中调用 Python 脚本作为雷达情报分析的设计方法和实现途径。

笔者依据侦察接收系统对分选识别和情报综合处理的要求, 讨论了以自动处理为主、人工处理为辅的电子情报处理软件方案设计与实现。分析工具及算法全部采用 C/C++ 语言, 提供了一种高效的雷达情报分析软件设计与实现方法。

1 雷达情报处理软件简述

1.1 基本功能

雷达电子情报信号处理软件的基本功能, 包括信号分选、辐射源参数估计、辐射源识别、态势和威胁估计等阶段。基本工作流程如图 1 所示。图中“信号分选”和“样式合批”是实现了信号分选和辐射源参数估计的阶段, “识别”是实现了辐射源识

收稿日期: 2019-11-09; 修回日期: 2019-12-13

作者简介: 王建涛(1973—), 男, 河南人, 博士, 研究员, 从事电子对抗研究。E-mail: yue_yufang@iapcm.ac.cn.

别阶段，“属性推理”实现了态势感知功能。

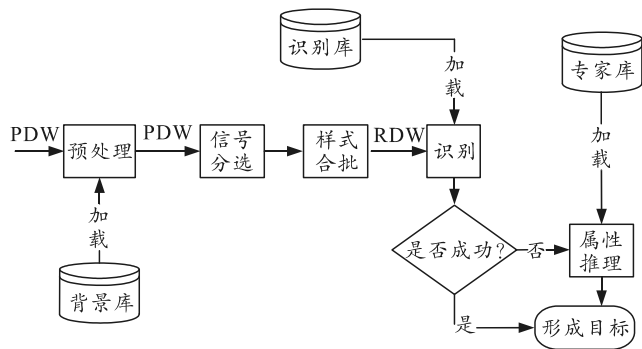


图 1 基本功能

1.2 开发环境与多核负载平衡

传统的雷达情报分析工具依赖 Matlab 软件，使用受到版权和应用领域的限制，且算法难以应用到配置较低的嵌入式系统，执行效率较低。文中的情报分析工具采用新型的情报分析算法，全部以 C/C++ 语言实现，通过新型算法设计，既脱离了 Matlab 或者 Python 软件的限制，方便安装和使用，又提供了可用于嵌入式系统高效运行的途径。数据库采用 Oracle 10g，用于存储下发情报数据库、用户自定义数据库、用户权限等数据。信号处理软件采用分布式运行。

为支持 Linux、Windows 多操作系统，本软件采用 QT 开发。客户端为用户登录、任务创建、情报处理、情报生成的交互界面。服务器用于系统情报处理后台计算，目前可以支持 10 余台计算机并行抓取计算任务，能够根据各个任务不同复杂度自动分配计算机运行核号，达到多任务并行时各个计算核之间负载依据计算量而自动均衡，从而确保总的信号处理时间最短，计算性能最优。

2 信号分选与辐射源识别

2.1 自动处理为主、人工处理为辅的信号分选

对采集记录的雷达全脉冲 (pulse describe words, PDW) 数据进行分块，首先对每一块进行背景信号、不关注频段、异常 PDW 值滤除等数据预处理，再按单次处理能力对数据进行分段，对每一段数据通过 DOA、RF、PW 区域划分，稀释脉冲数据进行信号预分选，之后进行主分选计算，接着执行信号变化特征参数辨识和样式的初步合并，然后对所有块的分选样式执行辐射源合批。以上步骤由软件根据任务自动完成，将合批后的分选样式显示并保存。自动完成合批后，软件也支持用户的人工

合批、拆批等操作。

信号主分选采用以重复间隔 (pri) 为主、多参数匹配的分选方法，特别是基于载频 (rf) / 脉冲宽度 (pw) 两参数为辅助分选参数。这种时域的多参数分选法，与单参数相比，信号密集时，其性能相对较好。主要采用模板匹配法实现：首先根据分选相关参数的变化类型建立数学模型，预设于关联比较器中，然后对每个接收脉冲的参数进行关联比较、分类、存储，最终实现雷达的信号分选^[11]。

2.2 辐射源识别

在合批基础上，对辐射源样式自动执行识别处理。辐射源识别处理是将测量和分析得到的辐射源描述字与辐射源库中已有的辐射源描述字进行比较，若它与其中某个的所有参数完全吻合 (在允许的容差范围内)，对应辐射源以较高的置信度被识别出来，若它们仅有部分参数吻合，则识别为该辐射源的置信度较低。

笔者设计了基于置信度的辐射源识别算法，用于已知目标的辐射源识别。主要特征参数：载频 (rf)、重复间隔 (pri)、脉冲宽度 (pw)、脉内 (mop)。参数 (rf, pri, pw) 的输入包括变化参数类型、典型值、典型样本、区间 (即最大、最小值)。设 f_1 为待测样式参数单一典型值数据， f_2 为识别库中单一参数典型值数据。若待测试样式参数为区间，表示为 $[f_{11}, f_{12}]$ ；若库中参数为区间，表示为 $[f_{21}, f_{22}]$ 。

2.2.1 利用识别库中参数的典型值计算置信度

标量与标量之间的匹配置信度：

$$F(f_1, f_2) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(f_1 - f_2 + \Delta f)^2}{2\sigma^2}\right] & (f_1 < f_2 - \Delta f) \\ 1 & (f_2 - \Delta f \leq f_1 \leq f_2 + \Delta f) \\ \exp\left[-\frac{(f_1 - f_2 - \Delta f)^2}{2\sigma^2}\right] & (f_1 \geq f_2 + \Delta f) \end{cases} \quad (1)$$

标量与多个典型值之间的匹配：若标量包含在典型值序列中 (在容差的范围内)，则置信度为 1；否，则在序列中选择一个与标量相近的值，按照式 (1) 进行匹配。待测样本与识别库参数均为多个典型值之间的匹配：首先计算识别库中典型值的容差范围，其次计算待测样本在该容差范围内典型值的个数，记为 a ，其余个数的记为 b 。若 $a - b > 0$ ，置信度为 $(a - b) / (\text{库中典型值个数})$ ；否，则置信度为 0。

2.2.2 利用识别库中参数的区间计算置信度
 标量与区间之间的匹配：

$$F(f_1, f_2) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(f_1 - f_{21} + \Delta f)^2}{2\sigma^2}\right] & (f_1 < f_{21} - \Delta f) \\ 1 & (f_{21} - \Delta f \leq f_1 \leq f_{22} + \Delta f) \\ \exp\left[-\frac{(f_1 - f_{22} - \Delta f)^2}{2\sigma^2}\right] & (f_1 \geq f_{22} + \Delta f) \end{cases} \quad (2)$$

待测样本为多个典型值时，若典型值序列中存在一个值包含于区间中，则置信度为 1；若典型值序列中不存在包含于区间中的值，则置信度为 0。

2.3 利用专家系统的辐射源属性推理

基于专家规则、模糊置信度，利用专家系统对雷达的用途、体制、平台进行推理，形成目标。

1) 首先由载频、脉宽、脉冲重复间隔及其变化类型，以及脉幅推理出雷达用途，并估算出目标距离；

2) 再由用途和载频、脉宽、脉冲重复间隔典型值推理其体制及可信度；

3) 最后由用途和体制推理其所属平台。

3 软件实现

在信号分选自动处理结果基础上，软件也支持用户通过人机操作界面对合批的结果进行手动拆批、合批等人工处理。最终将人工信号分选、合批确认的所有样式结果用于下一步的辐射源识别。图 2—图 8 为执行电子情报处理的主要界面。图 2 为某批次数据情报处理结果概览，是 3 层图表结构，第

1 层为辐射源列表，第 2 层为每个辐射源对应的样式列表，第 3 层为每条样式对应的全脉冲数据列表。

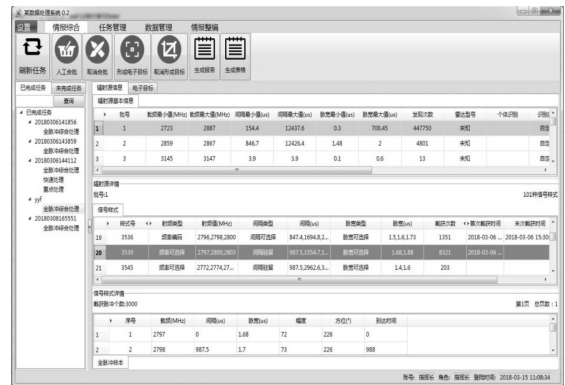


图 2 某批次数据情报处理结果概览

图 3 为分选结果的样式可视化概览，在下方样式表中选择某条样式后，可以在上方样式表中对这个样式的脉冲进行可视化分析。图 4 为对某样式进行脉冲缩小、放大、选点后分析 PDW 和重复间隔 PRI(pulse repetition interval)值，便于用户分析该样式的脉冲序列情况。

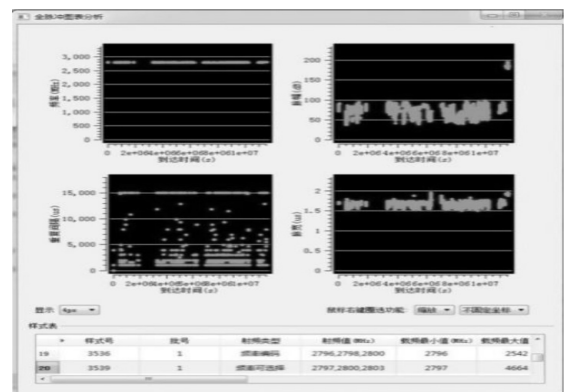


图 3 分选结果的样式可视化概览

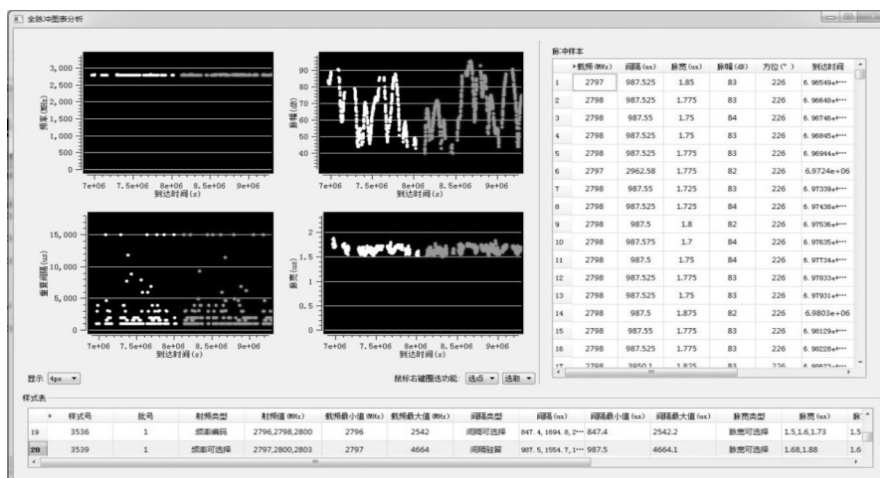


图 4 分选结果的样式可视化交互分析

根据经验，结合脉冲分析结果，用户可以在辐射源列表中选择某些辐射源进行人工合批，也可以

对关注的各个辐射源预形成目标。如图 5 所示，这些操作通过多项选择和鼠标右键菜单实现。

批号	跟踪最小值(MHz)	跟踪最大值(MHz)	间隔最小值(us)	间隔最大值(us)	跟踪最小值(us)	跟踪最大值(us)	发现次数	雷达型号
7	2601	2601	154.4	437.6	0.25	0.25	31	未知
8	3063	3067	334.003	668.012	0.3	0.425	40	未知
9	5420	5423	94.3	107.317	0.25	0.25	13	未知
10	6787	6802	530.325	562.075	0.1	12.825		未知
11	9036	9036	1111.34	1111.34	1.1	1.1		未知
12	2723	2887	93.5708	102.025	0.3	700.45		未知

图 5 人工合批和形成目标的操作

如图 6 所示,根据不同的操作,已经判断为“预形成电子目标”,会出现在“电子目标”的 Table 标签页面中,通过右键菜单,执行“保存到成果库”等操作。对每一条目标的记录,可以在下方“电子目标详情”中显示推理的结果。

The screenshot shows a software window titled '辐射源推理结果' (Radar Source Inference Results). It features a table of radar sources and a detailed view of a selected target. The table lists parameters such as tracking range, interval, and discovery count. The detailed view shows various attributes like equipment type, platform name, and technical characteristics.

图 6 辐射源推理结果

对于“人工合批”和“形成电子目标”的各种辐射源,在“辐射源信息”页面的第 1 层辐射源列表中,会通过不同背景颜色进行标记。如图 7 所示,深色背景的为“已形成电子目标”的辐射源,背景加框的为“人工合批”的辐射源。特别地,如图 8 所示,对“人工合批”的辐射源点击鼠标右键,支持“取消人工合批”操作,从而实现在情报处理过程中,自动分选与人工分选的结合,方便通过自动分选提高效率,而通过人工合批减少结果增批率。

批号	跟踪最小值(MHz)	跟踪最大值(MHz)	间隔最小值(us)	间隔最大值(us)	跟踪最小值(us)	跟踪最大值(us)	发现次数	雷达型号
13	3650	4235	111.34	194.3	0.25	1.1	33	未知
6	5284	5800	170.88	512.67	2.4	2.65	2189	未知
12	3063	3067	166.86	333.81	0.25	0.25	14	未知

图 7 辐射源标记

批号	跟踪最小值(MHz)	跟踪最大值(MHz)	间隔最小值(us)	间隔最大值(us)	跟踪最小值(us)	跟踪最大值(us)	发现次数	雷达型号
13	3650	4235	111.34	194.3	0.25	1.1	33	未知
6	4825	5500	170.88	512.67	2.4	2.65	2189	未知
12	5502	5502	66.86	83.81	0.875	1.375	14	未知

图 8 取消人工合批操作

4 结束语

雷达电子情报信号处理软件的基本功能,包括信号分选、辐射源参数估计、辐射源识别、态势和威胁估计等阶段。笔者详述了为适应侦察接收系统对分选识别和综合情报处理的要求,电子情报处理软件的设计与实现方案。该设计方案以自动处理为主、人工处理为辅,能适应复杂、交错环境下的雷达信号处理,为提高新一代电子情报处理软件的雷达环境自适应、任务自适应功能提供了有益的帮助。

参考文献:

- [1] WILEY G. ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals[M]. MA, Norwood, USA: Artech House, 2006.
- [2] 周一宇, 安玮, 郭福成, 等. 电子对抗原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 1-10.
- [3] 何明浩. 雷达对抗信息处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 1-20.
- [4] LEE R-Y R, YOUSUF A. Radar performance analysis system:a software package of learning simulations for electronic laboratories[J]. Journal of Applied Science and Engineering Technology, 2007, 4(10): 9-13.
- [5] MAHAFZA B R. Radar systems analysis and design using MATLAB[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013: 20-50.
- [6] 陈辉, 刘永鹏, 雷霆. 基于阵地优化的雷达性能评估系统设计[J]. 舰船电子对抗, 2014, 37(5): 83-88.
- [7] 罗朝义, 张强, 周一鹏, 等. 机载电子对抗情报分析中雷达信号快速识别方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 469-473.
- [8] 张鸿, 宋新超. 基于 PDW 的雷达情报处理及算法训练系统设计[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(4): 49-52.
- [9] 赵严冰. 雷达对抗侦察仿真训练中的信号产生方法研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 31-34.
- [10] 周慧德, 李帅. 基于 Python 的雷达情报分析软件设计[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(3): 179-183.
- [11] 赵忠文, 于尧, 郭皇皇, 等. 基于 AHP 和雷达图的效能评估方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(10): 1-4