

雷达侦察设备建模中的目标识别算法

张高峰, 陈志刚

(中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326)

摘要: 目标识别算法研究是雷达侦察设备研制及建模与仿真的重要研究内容。从作战方案仿真推演的建模需求出发, 分析雷达侦察设备模型的总体运行流程。提出基于雷达情报数据库的目标识别算法和基于雷达特征参数的目标识别算法。在基于雷达情报数据库的目标识别算法中, 综合分析雷达信号的射频、重频和脉宽隶属度, 建立了雷达信号隶属度模型; 在基于雷达特征参数的目标识别算法中, 提出雷达类型与威胁等级的对应关系, 综合考虑雷达信号的重频、方位、脉宽和射频及其变化情况对雷达威胁程度的影响, 建立雷达侦察目标威胁评估模型, 提出雷达威胁度到威胁等级的对应方法。在海战场作战方案仿真推演中的实际应用证明了目标识别算法的有效性和正确性。

关键词: 雷达侦察设备; 建模; 目标识别; 隶属度; 威胁等级

中图分类号: E94; TN959.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2019.04.010

Target Recognition Algorithm in Radar Reconnaissance Equipment Modeling

ZHANG Gao-feng, CHEN Zhi-gang

(the Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

Abstract: The research of target recognition algorithm is an important content of radar reconnaissance equipment development, modeling and simulation. Based on the modeling requirements of the combat plan simulation deduction, the overall operation flow of the radar reconnaissance equipment model is analyzed. The target recognition algorithms based on radar intelligence database and radar characteristic parameters are proposed. In the target recognition algorithm based on radar intelligence database, the membership degree model of radar signal is established by synthetically analyzing the membership degree of radio frequency, repetition frequency and pulse width of radar signal. In the target recognition algorithm based on radar characteristic parameters, the corresponding relationship between radar type and threat level is proposed. Considering the effects of radar signal repetition frequency, azimuth, pulse width and radio frequency and their changes on the radar threat degree, a radar reconnaissance target threat assessment model is established, and the corresponding method of radar threat degree to threat level is proposed. The effectiveness and correctness of the target recognition algorithm are proved by the practical application in the combat plan simulation deduction of the naval battle field.

Key words: radar reconnaissance equipment; modeling; target recognition; membership degree; threat level

随着信息技术的不断发展, 雷达已经成为预警探测和火力控制等作战行动的重要传感器, 雷达及雷达对抗的技术水平是一支军队战斗力高低的重要衡量指标, 雷达对抗在现代战争中的地位日益突出^[1-2]。在海战场环境下, 水面舰艇为防止被雷达锁定而受到导弹攻击, 将对敌方机载搜索雷达和导弹末制导雷达实施电子干扰作为防空反导作战的一项重要作战任务^[3]。有效的电子干扰建立在准确的雷达信号侦收和识别基础上, 需要雷达侦察设备从密集、交叠、宽频谱的海战场电磁信号中准确识别出威胁目标, 并引导电子干扰^[4]。如何快速获取雷达信息, 并对威胁信号及时识别判断, 对于取得战场优势是十分重要的。

本文重点研究在海战场作战方案仿真推演应用背景下, 舰载雷达侦察设备建模中的雷达识别算法。首先分析了雷达侦察设备的建模需求, 介绍了雷达侦察设备模型的总体运行流程, 然后对基于雷达情报数据库的目标识别和基于雷达特征参数的目标识别两种雷达侦察目标识别算法进行了详细描述。

1 仿真推演中的雷达侦察设备建模需求

在海战场作战方案仿真推演中, 雷达侦察设备模型主要用于电子对抗作战运用推演环节。设置不同的作战条件, 在敌我双方电子武器装备型号和性能确定的前提下, 利用仿真模型准确模拟敌我双方电子武器的技术性能、作战流程和对敌效果, 在仿真对抗的过程中不断优化电子对抗方案, 不断强化指挥员对作战指挥过程的熟悉程度, 使得电子对抗方案更趋合理, 也使得指挥员在实际作战指挥过程中能做到心中有数、从容应对, 是作战方案仿真推演在电子对抗作战运用推

收稿日期: 2019-01-08

修回日期: 2019-02-15

作者简介: 张高峰(1980—), 男, 山西寿阳人, 高级工程师, 研究方向为系统建模与仿真、分布式交互仿真。
陈志刚(1986—), 男, 硕士, 工程师。

演环节的主要目的^[5-6]。

根据上述对雷达侦察设备模型应用环境的分析,结合实际装备的功能、工作方式、显控需求和环境影响因素,可得出如下具体模拟需求:

1) 需要模拟雷达侦察设备的主要战术功能和工作过程,包括对雷达信号的截获、识别、威胁判断、告警和干扰引导。

2) 需要模拟指定型号雷达侦察设备的技术指标,如信号侦收频段、灵敏度、动态范围、测频测向精度、告警反应时间等。

3) 需要能够显示雷达信号接收、识别和告警等情况,能够控制设备工作状态,能够响应导调控制指令。

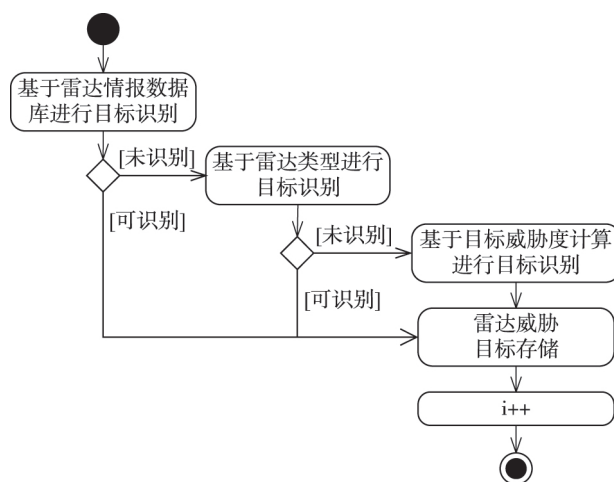
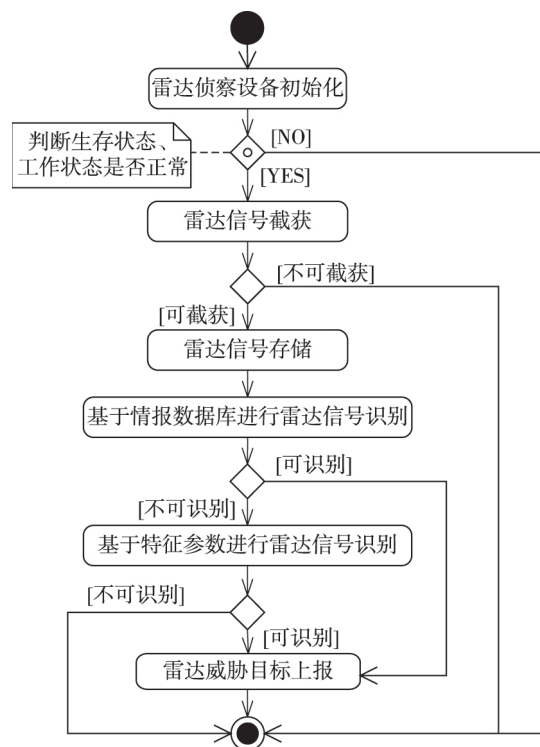
4) 需要体现自然环境对设备工作过程的影响,如:大气传输衰减和地球曲率对雷达信号侦收的影响,海情对设备工作稳定性的影响等。

通过上述需求分析,基于相似性原理和适当简化的考虑,应将雷达侦察设备模型的粒度定位在功能机理级^[7],着重对雷达侦察设备的战术功能和主要工作流程进行模拟。在雷达侦察目标识别模拟方面,以能够从复杂的雷达信号环境中及时准确识别出威胁雷达为目标,研究相应的目标识别算法并实现为软件模块,并按照具体功能模块来组织模型结构,而不对雷达侦察设备实装的测频测向接收机、信号处理机、情报处理机等信号识别相关单元进行逐一精细模拟。不同型号雷达侦察设备的战术功能和 workflows 大致相同,因此对于不同型号雷达侦察设备的模拟,可通过为通用算法模型装订不同性能参数的方式来实现。

2 雷达侦察设备模型运行流程

根据雷达侦察设备的主要战术功能和模拟需求,雷达侦察设备模型的总体运行流程如图 1 所示。

图 1 描述了雷达侦察设备模型在一个仿真周期内对单个雷达信号的处理流程。雷达侦察设备模型完成作战想定参数、性能参数和内部变量初始化后,提取搭载平台位置信息,并实时接收雷达信号信息并存储。在判定设备状态正常后,进入雷达信号截获计算流程,主要是依据雷达侦察设备的性能参数、雷达信号参数和相对位置关系,从频域、能域和空域三个维度综合判定某雷达信号是否能够被侦察机截获^[8-9],并对截获后的雷达威胁目标建批。判定某雷达信号可被截获后,进入雷达信号识别计算流程,首先通过情报数据库匹配方式得出雷达的用途、搭载平台类型、威胁等级和推荐干扰样式等识别信息,如果数据库匹配没有成功,则基于雷达的特征参数进行目标识别,如图 2 所示。



其中,基于雷达特征参数的目标识别又分为基于雷达类型的目标识别和基于目标威胁度计算的目标识别。

3 基于雷达情报数据库的目标识别算法

基于数据库的识别是指用接收到的雷达信号与雷达情报数据库中的情报数据进行参数匹配,如果雷达信号在雷达情报数据库有匹配数据记录,则从该条数据记录中读取雷达识别信息^[10]。雷达情报数据库内容示例见表 1。

表 1 雷达情报数据库内容示例

序号	参数名称	单位	字节数
1	射频	吉赫兹(GHz)	2
2	脉冲重复间隔	0.1 微秒(0.1 μs)	2
3	脉宽	0.01 微秒(0.01 μs)	4
4	扫描周期	毫秒(ms)	2
5	国家(地区)	枚举数据	1
6	用途	枚举数据	1
7	平台类型	枚举数据	1
8	敌我属性	枚举数据	1
9	威胁等级	枚举数据	1
10	推荐干扰样式	枚举数据	1

表 1 中 ,第 1-4 项参数属于雷达信号匹配参数 ,第 5-10 项参数属于雷达信号识别结果参数 ,识别结果参数均为枚举数据类型 ,以威胁等级为例 ,其识别结果分为 4 级 ,分别为高威胁、中威胁、低威胁和无威胁 ,雷达威胁等级与雷达的使用目的和所执行的任务相关。

通过计算雷达信号与数据库表中信号隶属度的方式来进行信号匹配 ,需要分别针对信号射频值、重频值和脉宽值进行隶属度计算。

射频隶属度 U_f 为

$$U_f = CF/R_f \tag{1}$$

重频隶属度 U_p 为

$$U_p = PRI/(10^3/0.1R_p) \tag{2}$$

脉宽隶属度 U_w 为

$$U_w = PW/0.01R_w \tag{3}$$

式(1)-(3)中 , CF 、 PRI 、 PW 分别为雷达侦察设备侦收到的雷达信号的射频值(单位: GHz)、重频值(单位: kHz)和脉宽值(单位: μs) , R_f 、 R_p 、 R_w 分别为数据库中存储的某部雷达信号的射频值(单位: GHz)、脉冲重复间隔值(单位: 0.1 μs)和脉宽值(单位: 0.01 μs) 。当 U_f 、 U_p 、 U_w 中任一值大于 1 时 ,取其倒数。

雷达信号的总隶属度 U 为

$$U = \delta_1 \cdot U_f + \delta_2 \cdot U_p + \delta_3 \cdot U_w \tag{4}$$

式(4)中 , δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为射频、重频、脉宽隶属的权重系数 $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$ 。

在计算总隶属度 U 时 ,采用专家评判方法得到 3 个隶属度的权重向量为

$$(\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3)^T = (0.4 \ 0.4 \ 0.2)^T \tag{5}$$

假设数据库中有 N 条记录 ,则可得到 N 个隶属度 ,取 N 个隶属度的最大值为 U ,如果 U 大于设定阈值 ,则信号匹配成功^[11]。

4 基于雷达特征参数的目标识别算法

当雷达情报数据库中没有与目标雷达信号相匹配

的记录时 ,只能基于雷达的特征参数进行目标识别 ,基于特征参数的目标识别主要用于得出目标雷达的威胁等级^[12] ,其识别结果没有基于数据库的识别结果全面。

4.1 基于雷达类型的威胁等级判定

在已知雷达类型或者通过雷达信号参数能够判别出雷达类型的情况下 ,可以依据雷达威胁等级与雷达类型的相关性 ,得出雷达的威胁等级^[13] ,雷达类型与威胁等级的对应关系见表 2。

表 2 雷达类型与威胁等级的对应关系

序号	雷达类型	威胁等级	序号	雷达类型	威胁等级
1	不明	中	11	未制导	高
2	预警	低	12	火控	高
3	远程警戒	低	13	敌我识别	中
4	对空警戒	低	14	多功能	中
5	对海警戒	低	15	导航	无
6	低空补盲	低	16	超视距	中
7	引导	中	17	鱼类攻击	高
8	目标指示	中	18	潜艇雷达	高
9	导弹跟踪	高	19	航空管制	无
10	导弹制导	高	20	民用	无

4.2 基于威胁度模型的威胁等级判定

在不能判别目标雷达的用途和类型的情况下 ,选取与雷达威胁程度密切相关的几个雷达信号参数 ,通过威胁评估模型计算得出针对不同参数的量化的威胁度 ,确定各参数的权重系数后 ,可得到雷达侦察目标的总威胁度 ,从而对应得出雷达的威胁等级。威胁评估计算所涉及的雷达信号参数包括: 重频 O_1 (单位: kHz)、方位 O_2 (单位: °)、脉宽 O_3 (单位: μs)、射频 O_4 (单位: GHz)。

雷达侦察目标总威胁度 $\mu(O)$ 为

$$\mu(O) = \omega_1 \mu(O_1) + \omega_2 \mu(O_2) + \omega_3 \mu(O_3) + \omega_4 \mu(O_4) \tag{6}$$

式(6)中 , $\mu(O_1)$ 、 $\mu(O_2)$ 、 $\mu(O_3)$ 、 $\mu(O_4)$ 分别为重频 O_1 、方位 O_2 、脉宽 O_3 、射频 O_4 的威胁度 , ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 分别为 4 个威胁度的权重系数。其中

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1 \tag{7}$$

4.2.1 重频威胁评估

雷达信号的脉冲重复频率(简称重频)小于 0.1 kHz 时 ,可认为该部雷达的威胁很小 ,甚至对于这类雷达的威胁可以不予考虑。但是当雷达信号的重频大于 0.1 kHz 时 ,这类雷达的威胁程度会随着重频的不断增大而快速提高^[14]。因此 ,确定重频威胁度 $\mu(O_1)$ 的计算式为

$$\mu(O_1) = \begin{cases} 0 & (0 < O_1 \leq 0.1) \\ 1 - e^{-(O_1 - 0.1)^2} & (O_1 > 0.1) \end{cases} \quad (8)$$

4.2.2 方位威胁评估

雷达方位指从正北方向顺时针计量至雷达位置点与雷达侦察设备位置点连线在水平面投影的角度,取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ)$ 。目标方位的改变速度与雷达威胁程度相关,将方位改变速度分为三种:方位恒定、方位缓变和方位快变。方位恒定时,可推断敌方雷达已实现对目标的稳定跟踪,此类雷达的威胁程度最高;方位快变时,可推断是快速移动的飞机平台搭载的雷达正在进行目标搜索,此类雷达的威胁程度较高;方位缓变时,可推断是慢速移动的舰艇平台搭载的雷达正在进行目标搜索,此类雷达的威胁程度较低^[15]。因此,确定方位威胁度 $\mu(O_2)$ 的计算式为

$$\mu(O_2) = \begin{cases} 1 & (\text{方位恒定}) \\ 0.8 & (\text{方位快变}) \\ 0.5 & (\text{方位缓变}) \end{cases} \quad (9)$$

4.2.3 脉宽威胁评估

雷达的威胁程度随着雷达信号脉宽的不断降低而逐渐变大,脉宽越趋于 0,威胁越大;当雷达信号的脉宽不断增大时,威胁逐渐变小。因此,确定脉宽威胁度 $\mu(O_3)$ 的计算式为

$$\mu(O_3) = \frac{1}{1 + O_3^2} \quad (10)$$

4.2.4 射频威胁评估

雷达的威胁程度随着雷达信号射频的不断增大而逐渐提高,可将雷达信号射频值由小至大划分为 4 个区间,每个区间对应一个威胁度^[16]。因此,确定射频威胁度 $\mu(O_4)$ 的计算式为

$$\mu(O_4) = \begin{cases} 1 & (O_4 > 15) \\ 0.8 & (10 < O_4 \leq 15) \\ 0.6 & (3 < O_4 \leq 10) \\ 0.3 & (0 < O_4 \leq 3) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中,射频 O_4 的单位为吉赫兹(GHz)。

4.2.5 威胁等级判定

针对某目标雷达,将雷达侦察设备侦收到的和经过累积分析得出的参数代入式(8)、(9)、(10)、(11)中,可计算出重频 O_1 、方位 O_2 、脉宽 O_3 、射频 O_4 的威胁度,将 4 个威胁度值代入式(6)中,可得到雷达侦察目标的总威胁度。

在计算总威胁度时,采用专家评判方法和对数回归方法^[14-16]得到 4 个威胁度的权重向量为

$$(\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4)^T = (0.48 \ 0.24 \ 0.17 \ 0.11)^T \quad (12)$$

计算得出雷达侦察目标的总威胁度以后,可以根

据雷达的总威胁度和威胁等级的对应关系得到雷达的威胁等级^[17]。在总威胁度向威胁等级对应时,首先采用典型雷达的特征参数计算出不同威胁度的分级阈值,然后将威胁度从 0 至 1 划分为不同区间,各区间均对应一个威胁等级。总威胁度到威胁等级的对应算法为

$$\mu(O) = \begin{cases} (0.812, 1) & \text{高威胁} \\ (0.653, 0.812] & \text{中威胁} \\ (0.385, 0.653] & \text{低威胁} \\ [0, 0.385] & \text{无威胁} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,0.812 是根据导弹制导雷达参数计算得到的,0.653 是根据多功能雷达参数计算得到的,0.385 是根据目标指示雷达参数计算得到的。

4.2.6 实例分析

假设在仿真推演过程中的某时刻,雷达侦察设备侦收截获到 3 部雷达信号 i ($i=1, 2, 3$),各雷达信号的参数见表 3。

表 3 某仿真时刻截获到的雷达信号参数情况

雷达 i	重频 / kHz	方位变化	脉宽 / μs	射频 / GHz
1	6	恒定	0.25	16
2	0.12	快变	0.5	6
3	0.05	缓变	1.4	2

将表 3 中的各雷达信号参数代入式(8)、(9)、(10)、(11)中,可得到各雷达的重频 O_1 、方位 O_2 、脉宽 O_3 、射频 O_4 的威胁度 μ_{i1} 、 μ_{i2} 、 μ_{i3} 和 μ_{i4} ,见表 4。

表 4 雷达信号各参数威胁度计算结果

雷达 i	重频 μ_{i1}	方位 μ_{i2}	脉宽 μ_{i3}	射频 μ_{i4}
1	0.9999	1	0.9412	1
2	0.0004	0.8	0.8	0.6
3	0	0.5	0.3378	0.3

利用式(6)和式(12)可得到雷达侦察目标 i ($i=1, 2, 3$) 的总威胁度 μ_i ,见表 5。

表 5 各雷达侦察目标总威胁度

雷达侦察目标 i	1	2	3
总威胁度 μ_i	0.9900	0.3942	0.2104

根据式(13)和表 5 可得到雷达侦察目标 i ($i=1, 2, 3$) 的威胁等级,见表 6。

表 6 各雷达侦察目标威胁等级

雷达侦察目标 i	1	2	3
威胁等级	高威胁	低威胁	无威胁

如表6所示,对3个雷达侦察目标的威胁等级判定结果为:目标1的威胁等级为高威胁,目标2的威胁等级为低威胁,目标3的威胁等级为无威胁。

5 结束语

目标识别算法研究是雷达侦察设备研制及建模与仿真的重要研究内容^[18-20],本文从仿真推演的建模需求出发,提出了基于雷达情报数据库的目标识别算法和基于雷达特征参数的目标识别算法。在基于雷达情报数据库的目标识别算法中,综合分析雷达信号的射频、重频和脉宽隶属度,建立了雷达信号隶属度模型;在基于雷达特征参数的目标识别算法中,提出了雷达类型与威胁等级的对应关系,综合考虑雷达信号的重频、方位、脉宽和射频及其变化情况对雷达威胁程度的影响,建立了雷达侦察目标威胁评估模型,提出了雷达威胁度到威胁等级的对应方法。

本文提出的雷达侦察目标识别算法已经应用于海战场作战方案仿真推演的雷达侦察设备建模中,在推演任务保障过程中,雷达侦察设备模型能够在复杂的雷达信号环境中及时准确地完成目标识别,合理引导对目标雷达进行电子干扰,证明本文提出的目标识别算法能够满足复杂电磁环境下的目标识别需求,能够适用于已有数据支持的情报目标和无经验数据支持的新目标的识别。该目标识别算法对于雷达侦察实际装备的研制具有借鉴意义,对于其他仿真系统的建设具有推广应用价值。

参考文献:

- [1] 胡辉,刘尚富. 雷达对抗仿真信号环境实现方法研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(12): 93-95, 112.
- [2] 吕栋斌. 雷达识别技术发展趋势探讨[J]. 信息系统工程, 2018, 31(7): 116.
- [3] 王柏杉. 舰载雷达对抗系统反导作战效能[J]. 系统仿真技术, 2017, 13(1): 34-37.
- [4] 王琦琦. 电子对抗仿真建模与评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [5] 安红. 仿真技术在雷达电子战系统中的应用研究[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 1-5+18.
- [6] 杨光,胡习霜. 海军兵棋演习系统研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(4): 96-101.
- [7] 秦媛媛. 作战实体的行为建模设计与实现[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(2): 156-159, 165.
- [8] 靳磊磊. 超宽带雷达截获中的信号检测与数据存储实现研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [9] 周婉馨. 面向雷达侦察和通信侦察的动态对抗仿真[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [10] 戴礼灿. 面向作战的侦察情报数据仿真系统设计[J]. 电讯技术, 2017, 60(7): 806-812.
- [11] 段成. 信号数据库的匹配滤波技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [12] 陈东锋,唐海燕,焦景山. 智能化雷达辐射源识别方法研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(3): 143-146.
- [13] 张鹏程,王杰贵,旷平昌,等. 重点雷达辐射源快速筛选识别算法分析[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(11): 31-35.
- [14] 骆永军,赵岩泉. 多属性决策的辐射源威胁等级判定方法[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(S1): 86-88.
- [15] 王嘉文,郑辉. 一种基于改进 AHP 法雷达威胁等级判定新方法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 569-572, 582.
- [16] 姜宁,胡维礼,孙翱. 辐射源威胁等级判定的模糊多属性方法[J]. 兵工学报, 2004, 26(1): 56-59.
- [17] 王杰,彭海,曹卫星. 一种自适应雷达侦察信号处理方法[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(6): 8-11.
- [18] 张冠武,罗丁利,李鹏. 战场侦察雷达目标识别方法研究[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(2): 31-35.
- [19] 高敬,黄高明,甘泉,等. 基于证据理论的雷达与通信侦察目标识别算法[J]. 航天电子对抗, 2018, 28(2): 62-64.
- [20] 许阳,朱霞. 一种自适应雷达辐射源目标识别方法[J]. 中国航海, 2012, 35(4): 1-3, 12.

(责任编辑: 胡前进)