

学校代码：10699  
分 类 号：  
密 级：  
学 号：2015201518

题目 基于深度学习的雷达信  
号处理

作者 张治山

学 科 专 业 数学

指 导 教 师 山

申请学位日期 2016 年 9 月

This Page Intentionally Left Blank!

西北工业大学

# 硕士学位论文

(学位研究生)

题目：基于深度学习的雷达信号处  
理

作 者：张治山

学科专业：数学

指导教师：山

2016 年 9 月

This Page Intentionally Left Blank!

**Title: Radar Signal Process Based on Deep Learning**

**By  
Zhishan Zhang**

**Under the Supervision of Professor  
Shan**

A Dissertation Submitted to  
Northwestern Polytechnical University

In partial fulfillment of the requirement  
For the degree of  
Doctor of Math

Xi'an P. R. China  
September 2016

This Page Intentionally Left Blank!

## 摘要

中文 Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

**关键字：** 中文, 摘要

本文研究得到某某基金 (编号:XXXXXXX) 资助。

This Page Intentionally Left Blank!



## Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea

dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

**Keywords :** English, Abstract

# 目录

摘要 .....	I
Abstract .....	III
目录 .....	VI
1 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 天波超视距雷达地海杂波识别 .....	2
1.3 辐射源类别识别 .....	4
1.4 论文研究内容及结构 .....	5
2 深度卷积神经网络 .....	7
2.1 引言 .....	7
2.2 基本分类 .....	7
2.3 传统人工神经网络结构 .....	8
2.4 深度卷积神经网络 .....	11
2.4.1 卷积 .....	12
2.4.2 局部感受野 .....	12
2.4.3 共享权重和偏置 .....	13
2.4.4 池化 .....	13
2.4.5 网络的训练与学习 .....	13
2.5 深度卷积神经网络在雷达信号处理中的应用 .....	14
2.6 小结 .....	15
3 基于深度学习的天波超视距雷达地海杂波识别 .....	17
3.1 引言 .....	17
3.1.1 地海杂波识别分析 .....	19
3.1.2 我们的方法 .....	20
3.2 地海杂波识别算法 .....	21
3.2.1 特征向量和识别结果 .....	23
3.2.2 算法设置 .....	23
3.2.3 我们的分类算法 .....	25

3.2.4 增量学习 .....	27
3.3 地海杂波分类评估 .....	28
3.3.1 数据集分析 .....	28
3.3.2 算法实现 .....	29
3.3.3 仿真验证 .....	30
3.3.4 特征可视化 .....	33
3.4 小结 .....	35
4 基于深度学习的辐射源未知分类识别 .....	39
4.1 引言 .....	39
4.2 辐射源信号分析 .....	39
4.2.1 模糊函数 .....	40
4.3 Open Set 分类器设计 .....	40
4.3.1 深度卷积神经网络分类器设计 .....	42
4.4 SVM meta-recognition 设计 .....	42
4.5 仿真实验与分析 .....	46
4.5.1 实验环境 .....	46
4.5.2 实验结果分析 .....	47
4.6 小结 .....	47
5 总结 .....	51
5.1 本文的主要贡献 .....	51
5.2 后续的研究进展 .....	51
参考文献 .....	53
附录 .....	61
致谢 .....	63
攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况 .....	65

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

正文大概 65 页，在参考文献前，目前 45 页

问题用红色标出，重复用蓝色标出

二十世纪中后期以来,随着相关科学技术的迅速发展,人类进行信息获取和处理的广度和深度都有了巨大的扩展和延伸。雷达、红外成像、紫外探测、微光夜视、电视摄像及声探测等各种主、被动传感装置已覆盖了宽广的电磁波段,为全天候、大范围的获取信息提供了前提条件。同时,通信、计算机及数字信息处理技术的发展,实现了信息处理和传递的数字化,为及时有效的传递、交换和处理信息打下了基础。在现代信息获取和处理技术中,自动目标识别 (Automatic Target Recognition, ATR) 是一个十分重要的应用方面。ATR 是指利用各种传感器,从客观世界中获取目标和背景信息,并利用计算机信息处理手段自动分析场景,检测和识别感兴趣的目标及获取目标各种定性、定量性质的科学技术。从信息处理的角度,ATR 大致可以分为以下几个层次 1. 检测:发现感兴趣的待识别目标,但还没有确认; 2. 识别和确认:辨识目标所属类别,确定目标为所属类别中的哪一类型; 4. 理解:进行目标行为意图及场景语义的解释等。以上几个层次描述了从低层到高层的信息处理过程,低层处理是高层处理的基础从应用的角度,ATR 通常需要考虑存在关联性的三个方面 1. 观测对象; 2. 传感器子系统; 3. 信息处理子系统。以上三个方面相互影响、相互制约,传感器系统决定了可以对哪些对象进行观测,信息处理系统的处理过程又要以传感器系统和观测对象为前提条件。在选择传感器时,应充分考虑相关的性能要求以及系统的环境条件。成像传感器是最常见的传感器,可提供丰富且直观的图像信息,常见的成像传感器及其特点如表 1.1 所不。

可以把分类问题抽象成一个机器学习的问题,根据给定的训练数据集学习出一个函数,当新数据到来时,可以根据这个函数预测出结果。具体的机器学习的算法很多,通过回归分析和统计分类来构造条件概率,如人工神经网络,各种决策树等等。每个算法,当训练集满足一定的条件,预测的误差都是可以量化的控制在某一个范围的。

随着信息技术的飞速发展以及这些技术在军事上的广泛应用,信息技术已经普遍渗透到各种武器装备中,现代战争在很大程度上是信息战。信息战的一个重要特征是利用各种探测、感知手段,借助计算机网络、通信技术,对敌人的作战不对情况做到精确的

探测评估，做到“知己知彼，百战不殆”。在信息化战争中，对于空间信息探测、敌方势力的识别、跟踪、定位等功能，主要依靠电子技术来完成 [1, 2, 3, 4]。

远程预警是信息战的一个重要部分，需要完成对地平线以下的大型舰船、飞机、导弹等远距离空中或者海中的高价值运动目标的探测，提供远程监视及对关注的空域或者海域目标的检测与跟踪。由于天波超视距雷达（Over-the-Horizon-Radar, OTHR）利用电磁波在电离层间的反射传输高频能量，具有反隐身、抗干扰等优点，其预警能力远远超出常规体制雷达，目前受到越来越多的国家的关注。

信息战的另一个部分是电子情报侦察系统，其主要用途是获取雷达信号的特征情报和战场情报。信号处理的目的是要详细地了解信号环境中所有雷达信号的特征参数，从中进一步判断这些雷达的用途、平台类别，进而判断其武器系统以及威胁等级，为战略情报分析提供信息。

本文围绕 xxxx。本文对实际数据进行分析，利用深度学习的思想及方法，对天波超视距雷达地海杂波识别以及辐射源的识别进行研究分析，对后续的雷达信号的处理具有一定的理论指导价值和工程借鉴意义。

## 1.2 天波超视距雷达地海杂波识别

这一部分可以稍晚再修改，根据文章内容进行修改

天波超视距雷达主要工作频率为 6-28GHz，其能够通过电离层反射检测和定位地平线以外的移动目标，因此在持续监测中起着重要作用 [5, 6] 然而，电磁信号通过电离层的传播会发生坐标转换，目标处于地面坐标系（即经度和纬度）而天波雷达接收的量测信号则为雷达坐标系下（即斜距和方位角）[7]。这为雷达的目标跟踪提出了新的需求：坐标配准。在这个过程中，我们必须调用两个子过程：为每个测量或目标状态估计选择正确的电离层传播模式以及将测量或目标的状态估计从雷达坐标系转换为地面坐标系。

通常来说，天波雷达的坐标配准依赖其部署的电离层探测子系统，该系统可以提供可能的电离层传播模式以及每个模式对应的参数，利用电离层的每层高度 [8]。天波雷达利用这些电离层信息实现坐标配准。然而，利用该方法用两个因素会影响定位的性能：第一个是探测子系统的部署区域有限，例如该系统无法部署于远海或者敌对区域。对于这些不可用区域，传统的方法是利用基于统计的电离层模型的可用区域的结果进行插值求得，但电离层的建模十分复杂且不同区域可能具有较大的变化，这种方式会造成用于坐标配准的电离层参数误差较大，进而影响坐标配准和目标跟踪定位。第二个是电离层探测子系统独立于主雷达工作导致其提供的坐标配准参数与主雷达存在不一致性（电离层探测系统识别的传播模式可能不同于天波所接收的量测的传播模式）的问题。因此，

为了提高电离层传播模式的识别正确率和电离层参数的准确度,进而提高坐标配准的准确性,我们急需一种替代方法。

改善坐标配准的一种方法是使用信标 [9]。天波雷达接收信标发送的信号,并在雷达坐标系中输出其位置上的测量值。通过将测量与由 GPS 提供的地面坐标系中的信标的已知位置进行比较,可以实时地进行坐标的校正。然而,信标的使用仅限于可用的区域。此外,需要对信标进行维护。

事实上,我们可以利用远海区域的岛屿等陆地作为无源信标来求取电离层的相关参数。使用海岸线的坐标配准的想法首先出现在文 [8] 中,然而该文并没有给出具体的思路以及实际数据的验证,只是提出了这种思路。巴纳姆等人 [10] 提出了一种基于地海杂波识别的坐标配准方法,主要依靠构造杂波模型。然而,由于电离层状况的复杂性,地海杂波杂乱的特征不稳定,例如海杂波的主要特征布拉格峰可能会偏移甚至失去一个峰值。

Cuccoli[11, 12, 13, 14] 提出了一种针对天波超视距雷达信号实时坐标问题的方法。其方法是基于对雷达覆盖区域内的地海交界位移的先验知识,即利用监视区域的地理形态结构,利用其构建二进制掩模,将其用作接收的雷达回波的地理参考。概述了基于收到的雷达回波和二进制杂波签名之间的互相关最大化的地理参考算法,以便指出接收到的信噪比和差分海陆反射散射的最小要求系数。Cuccoli[14] 等人提出利用监控区域的地貌结构研究范围坐标配准问题。包括海岸线的地理信息由地海杂波的二进制识别结果表示,根据等电离层反射高度进一步转换为参考信号。通过最大化接收的雷达回波和表面掩模签名之间的互相关来确定正确的等效电离层反射高度。然而,他们假设天波雷达传输单脉冲信号,并提供数值模拟结果。

Cacciamano[15] 等人提出了利用跟踪回波的斜距、多普勒和方位角来实现天波超视距雷达中的目标检测的方法。坐标配准是通过将斜距坐标转换为传输中使用的地面坐标来定位目标的过程。他们对传统的利用 3D 射线跟踪算法进行坐标配准的方法进行了改进。传统算法主要根据特定传输频率和仰角的地面距离,采用的射线跟踪方法获取高度,纬度和经度的 3D 电子密度模型变量。然而,射线跟踪输出通常受到三维电离层模型数值近似误差和用于积分光线跟踪算法的微分方程的离散化步骤影响。因此,原始坐标配准图受到误差的影响,导致目标定位精度的降低。因此,他们利用雷达进行地海转换来降低坐标配准误差。他们的方法基于对由雷达天线波束照射的区域内相对于海陆转变的实际组延迟的先验知识。他们的方法利用了监视区域的地貌结构,然后通过使用实际的组延迟饱和海陆转换来评估由 3D 射线跟踪软件引入的误差。之后,使用估计的误差来校正从射线跟踪输出直接获得的粗略坐标配准图。他们也在水平分层的电离层的

简化假设下，验证了所提出的修正方法。

天波超视距雷达可以通过反射来自电离层的高频（HF）信号来检测和跟踪 1000 到 3000 公里范围内的飞机或地面目标。坐标配准是将天波雷达目标从雷达坐标系转换到地理坐标系的过程。坐标配准通常通过实时电离层模型（real-time ionospheric model）进行射线跟踪。从已知参考点（known reference points）产生可识别的雷达回报的机会散射体也可能被用于坐标配准。为了补充传统的被动参考源，Fabrizio[16] 研究了使用非合作辐射源发射器作为活动的参考源来提高天波雷达坐标配准精度。其使用澳大利亚 Jindalee 天波超视距雷达的实验数据，提出并分析了利用高频广播接受到的辐射源信号作为坐标配准的有效已知参考点源的方法。

天波超视距雷达利用电离层传播来检测和跟踪远距离目标。为了在传播模式不确定、杂波和噪声环境中实现最佳性能，Holdsworth[17] 提出了一种利用地表回波的反向散射强度，提高目标定位精度的坐标配准方法。

### 1.3 辐射源类别识别

随着科学技术的进步，现代战场形势瞬息万变，信息对抗在现代军事中的作用越来越重要。纵观整个 20 世纪所爆发的两次世界大战和数次局部战争、21 世纪初的美阿、美伊之战以及最近闹得沸沸扬扬的韩国的萨德事件，无一不昭示着现代战争已成为电子战的“天下”，电子战技术也在历次实战演练中逐渐成熟。电子战也称电子对抗，包括电子侦察、电子攻击和电子防护三个方面。电子侦察主要指从敌方雷达及其武器系统获取有用信息，通过雷达辐射源个体识别，可以对战场环境中敌我双方雷达辐射源的分布情况实施侦察，提供更加全面的、精确的电磁斗争与武器的态势，进行有效的战场指挥与决策，雷达辐射源个体识别已成为当前电子战特别是电子侦察领域的研究热点和难点[18]。然而由于辐射源的特征未知、信号波形日趋复杂、战时电磁环境恶劣，给辐射源的精确识别带来了越来越严峻的挑战。

在雷达辐射源信号特征挖掘方面，已有很多学者作了大量研究工作，在上世纪 70 年代国外相关研究人员就开始了该部分的研究 [19]，该部分研究可以分为两个阶段：

第一阶段为辐射源基本参数特征研究。对于原始信号特征直接求取其载波频率、脉冲宽度、脉冲幅度、到达角度和到达时间等信息 [20]，利用其中一个或多个作为特征向量。这种情况主要是应用于电磁环境相对单一、辐射源类别较少、信号形式单一、雷达参数固定的早期。

第二阶段自 20 世纪 90 年代以来，西方的军事强国开始研究雷达辐射信号的脉内特征，相继提出了多种分析雷达信号脉内特征的方法。有代表性的工作有：时域波



形分析法 [21]、谱相关法 [22, 23]、基于专家知识信号处理法 [24, 25, 26]、时频综合法 [27, 28, 29, 30]、小波分析法 [31]、信息理论准则与聚类技术综合法 [32]、脉内瞬时频率特征 [33] 与累积法 [34]、信号的分型特征等 [35, 36, 37]。

国内对雷达辐射源个体识别技术的研究始于上世纪 80 年代初, 虽然起步较晚, 但受到了军方的高度重视, 在“九五”、“十五”和“十一五”国防预研中给予了大力资助。在脉内特征挖掘方面, 毕大平提出易于工程实现的脉内瞬时频率提取技术 [38]; 张葛祥提出了雷达辐射源信号的小波包特征 [39]、相像系数特征 [40]、熵特征 [41]、粗集理论 [42]、信息维数 [43] 和分形盒维数 [44, 45]; 朱明提出了基于原子分解的特征 [46]、基于 Chirplet 原子的特征、时频原子特征 [47]; 普运伟提出了瞬时频率派生特征 [48]、模糊函数主脊切面特征 [49]; 陈稻伟提出了符号化脉内特征 [50]、围线积分双谱特征 [51] 等; 余志斌提出的局域波分解 [52]、小波脊频级联特征 [53, 54]。

另一方面, 雷达辐射源识别是一个典型的分类问题, 其主要思路为在得到辐射源信号的特征表示之后, 借助有效的分类算法来实现特征空间到决策空间的转换, 从而确定信号的所属类别。大量的分类算法被成功运用于雷达辐射源识别中, 如模板匹配 [55, 56]、神经网络 [57, 58, 59, 60]、支持向量机 [61] 等。一般被应用于该领域的有三种分类方法, 一种是判别型分类器, 其需要在学习过程中最优化某种目标函数; 另一种为生成模型分类器, 其主要是基于先验概率和类别条件概率密度进行估计, 如线性判别分类器 [62]、K 最近邻 [63] 等; 第三种是决策树分类算法, 通过人类专家的先验知识进行分类, 如 ID3、C4.5 算法 [64, 65]。

辐射源的快速、准确和鲁棒的自动目标识别在现代军事中的作用十分重要, 自动目标识别算法需要可以准确区分出已知目标和未知目标, 同时可以正确的对于已知目标进行分类。我们需要在未收集大量数据的前提下, 可以迅速的识别出新的目标。与传统的利用已知类别的样本进行训练测试的机器学习算法不同, 我们这个问题是在 Open Set 的情况下, 将需要考虑将输入识别为未知的情况。第四章利用深度卷积神经网络与支持向量机进行结合, 以雷达信号的模糊函数作为训练样本, 构建了一个可以对未知分类进行识别的分类器。我们利用实际数据进行验证, 证明我们的分类器具有很强的准确性。

## 1.4 论文研究内容及结构

本文主要研究内容是基于深度学习的雷达信号处理技术, 研究重点为深度学习方法在天波雷达地海杂波识别和辐射源分类中的应用。针对于复杂环境下天波雷达地海杂波的不确定性以及在含有未知分类的情况下的辐射源识别两个主要方面进行研究, 本文各章安排如下:

第一章为绪论，主要介绍了天波超视距雷达地海杂波识别的意义以及发展，辐射源类别识别的国内外研究现状。

第二章为深度卷积神经网络。该章主要是基本的深度学习理论的相关介绍。

第三章为基于深度学习的地海杂波识别。根据天波超视距雷达的频谱信息，利用一维卷积神经网络作为分类器区分出获取的杂波类型。在实际数据的验证中，即使是在电离层环境很差的情形下，该算法仍然具有很高的精确度。并且将识别结果与实际的地图轮廓进行了匹配，仍然具有很高的匹配率。

第四章为基于深度学习的辐射源未知分类识别。针对于复杂电磁环境下辐射源识别困难的问题，设计了一个深度卷积神经网络，利用模糊函数作为特征实现了对于已知类别的辐射源的识别，同时设计了一个 Meta-Recognition，对于识别结果做了进一步的处理，实现了未知分类的辨别。利用实际的雷达数据进行验证，该算法具有很高的识别准确率和分辨正确率。

第五章对全文进行总结，并对后续的研究方向进行了探讨。

## 2 深度卷积神经网络

### 2.1 引言

人工神经网络 [66] 是一种通过模仿大脑神经元行为进行信息处理的数学模型,但由于其无法承受大规模的参数和训练样本并且具有泛化能力差等问题。Kunihiko Fukushima[67] 于 1982 年首次提出了卷积神经网络模型, Lecun 等人对神经网络传统算法在训练上面面临的计算复杂度高问题进行了改进,提出了基于梯度下降的优化算法 [68] 和 BP 算法 [69]。2003 年, Simard 对卷积神经网络进行了简化 [70]。Hinton 在 2006 年的两篇文章 [71, 72] 可以作为深度学习 (Deep Learning, DL) 正式提出的里程碑, 其在工业界以及学术界掀起了巨大的浪潮, 被应用于语音识别 [73]、图像识别 [74] 和自然语音处理 [75] 等各种方面。目前, 其内涵已经超出了传统的多层神经网络, 甚至机器学习的范畴, 逐渐朝着人工智能的方向快速发展 [76]。

深度神经网络模型是一种非常强大的深度学习模型, 他同时可以处理有监督和无监督学习任务。并且随着科技的发展, 数据量越来越大, 计算机并行能力也有了很大的提高。并且 Ciren 在 2011 年对神经网络进行改造使其可以通过 GPU 进行训练计算 [77], 并且专门针对于深度学习的芯片不断问世, 例如谷歌公司的 TPU[78], 大大提高了深度学习的应用场景。针对于海量数据, 简单的线性模型由于无法充分利用计算能力, 不再适用, 可以预见在将来会有越来越多的工作应用到深度学习。

### 2.2 基本分类

传统上可以把深度学习分为卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN)、递归神经网络 (Recurrent Neural Networks, RNN)、长短时记忆网络 (Long short-term memory, LSTM)、深度信念网络 (Deep Belief NetWorks, DBN)、自动编码器 (AutoEncoder)、稀疏编码 (Sparse Coding)、限制波尔兹曼机 (Restricted Boltzmann Machine, RBM) 等。

其中卷积神经网络是最流行的一种深度学习模型, 通过使用卷积层极大地减少了中间层的参数数目, 使学习效率更高并较少过拟合, 同时卷积操作独有的局部感受野 (local receptive fields)、共享权重 (shared weights) 和池化 (pooling) 三种特性也是处理序列元素分类识别的很重要的一点, 权重共享策略减少了需要训练的参数, 相同的权

重可以让卷积核不受信号位置的影响来检测信号的特性，使得训练出来的模型泛化能力更强；池化运算可以降低网络的空间分辨率，从而消除信号的微小偏移和扭曲。

递归神经网络是一种包含循环的，允许信息持久化的神经网络模型。传统的前馈神经网络中，单独的输入完全确定了余下层的神经元的激活值。而对于递归神经网络，隐藏层和输出层的神经元的激活值不仅由当前的网络输入决定，而且包含了前面的输入的影响。长短时记忆网络是一种特殊的递归神经网络，主要用于解决递归神经网络前期模型难以训练的问题。其通过刻意设计的单元结构，在递归神经网络的基础上添加了元胞状态（cell state）用来保存长期的状态，然后通过门函数来控制此长期状态。

深度信念网络是一个概率生成模型，是由多个限制玻尔兹曼机组成，这些网络被“限制”为一个可见层和一个隐藏层，层间存在连接，但是层内的单元间不存在连接。隐藏单元被训练来捕捉在可见层表现出来的高阶数据的相关性。

通过对于以上几种最常用的深度学习方法的介绍，我们可以发现卷积神经网络是最适合处理本文这种静态类型的数据，循环或者说是不同时刻的输入对于地海杂波类型的识别并没有提高，故递归神经网络和长短时记忆网络显然不适合本问题。另一方面，深度信念网络的生成模型并不关心不同类别之间的最优分类面的位置，故其用于分类问题时，分类精度没有判别模型高。且其学习的是数据的联合分布，相比其他算法具有更高的复杂性。

## 2.3 传统人工神经网络结构

### 深度学习在图像识别中的研究及应用——李卫

人工神经网络是一种模拟大脑神经系统的算法，其可以从海量的训练样本中学习到一个权重函数，用来进行模式识别、分类等。神经网络主要是利用将许多个单一神经元（也称作感知器）联结在一起，一个神经元的输出就可以是另一个神经元的输入，形成一个有向无环的网络结构。首先介绍一个神经元的结构，如图 2-1。其神经元具有多个输入  $x_1, x_2, \dots$ ，这些输入可以取 0 和 1 中的任意值。神经元对于每一个输入有权重  $w_1, w_2, \dots$  和一个总的偏置  $b_0$ ，其输出为一个  $\sigma(w \cdot x + b)$ ，这里的  $\sigma$  为该神经元的激活函数，定义为：

$$\sigma(z) \equiv \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2-1)$$

，此处的激活函数称作 S 型激活函数，常使用的还有 *ReLU* 等激活函数。

多个神经元分层互联可以形成神经网络。图 2-2 是一个简单的神经网络，其中圆圈表示神经网络的输入，标上 +1 的圆圈被称为偏置节点，也就是截距项。神经网络最左边的一层叫做输入层，最右的一层叫做输出层（本例中，输出层只有一个节点）。中间所

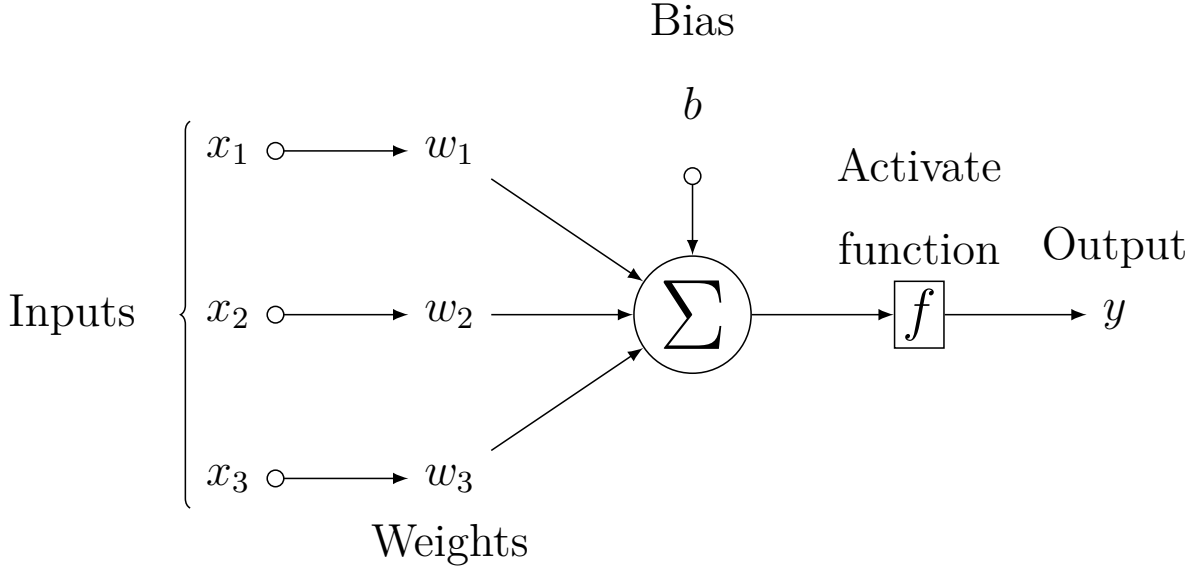


图 2-1 神经元

有节点组成的一层叫做隐藏层（不能在训练样本集中观测到它们的值）。同时可以看到，以上神经网络的例子中有 3 个输入单元（偏置单元不计在内），3 个隐藏单元及一个输出单元。

本例中网络的层数为  $n_l = 3$ ，将第  $l$  层记为  $L_l$ ，于是  $L_1$  是输入层，输出层是  $L_{n_l}$ 。本例神经网络有参数  $(W, b) = (W^{(1)}, b^{(1)}, W^{(2)}, b^{(2)})$ ，其中  $W_{ij}^{(l)}$ （下面的式子中用到）是第  $l$  层第  $j$  单元与第  $l+1$  层第  $i$  单元之间的联接参数（其实就是连接线上的权重，注意标号顺序）， $b_i^{(l)}$  是第  $l+1$  层第  $i$  单元的偏置项。因此在本例中， $W^{(1)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ， $W^{(2)} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ 。注意，没有其他单元连向偏置单元（即偏置单元没有输入），因为它们总是输出 +1。同时，我们用  $s_l$  表示第  $l$  层的节点数（偏置单元不计在内）。

$a_i^{(l)}$  表示第  $l$  层第  $i$  单元的激活值（输出值）。当  $l = 1$  时， $a_i^{(1)} = x_i$ ，也就是第  $i$  个输入值（输入值的第  $i$  个特征）。对于给定参数集合  $W, b$ ，我们的神经网络就可以按照函数  $h_{W,b}(x)$  来计算输出结果。本例神经网络的计算步骤如下：

$$a_1^{(2)} = f(W_{11}^{(1)}x_1 + W_{12}^{(1)}x_2 + W_{13}^{(1)}x_3 + b_1^{(1)}) \quad (2-2)$$

$$a_2^{(2)} = f(W_{21}^{(1)}x_1 + W_{22}^{(1)}x_2 + W_{23}^{(1)}x_3 + b_2^{(1)}) \quad (2-3)$$

$$a_3^{(2)} = f(W_{31}^{(1)}x_1 + W_{32}^{(1)}x_2 + W_{33}^{(1)}x_3 + b_3^{(1)}) \quad (2-4)$$

$$h_{W,b}(x) = a_1^{(3)} = f(W_{11}^{(2)}a_1^{(2)} + W_{12}^{(2)}a_2^{(2)} + W_{13}^{(2)}a_3^{(2)} + b_1^{(2)}) \quad (2-5)$$

$z_i^{(l)}$  表示第  $l$  层第  $i$  单元输入加权和（包括偏置单元），比如， $z_i^{(2)} = \sum_{j=1}^n W_{ij}^{(1)}x_j + b_i^{(1)}$ ，则  $a_i^{(l)} = f(z_i^{(l)})$ 。

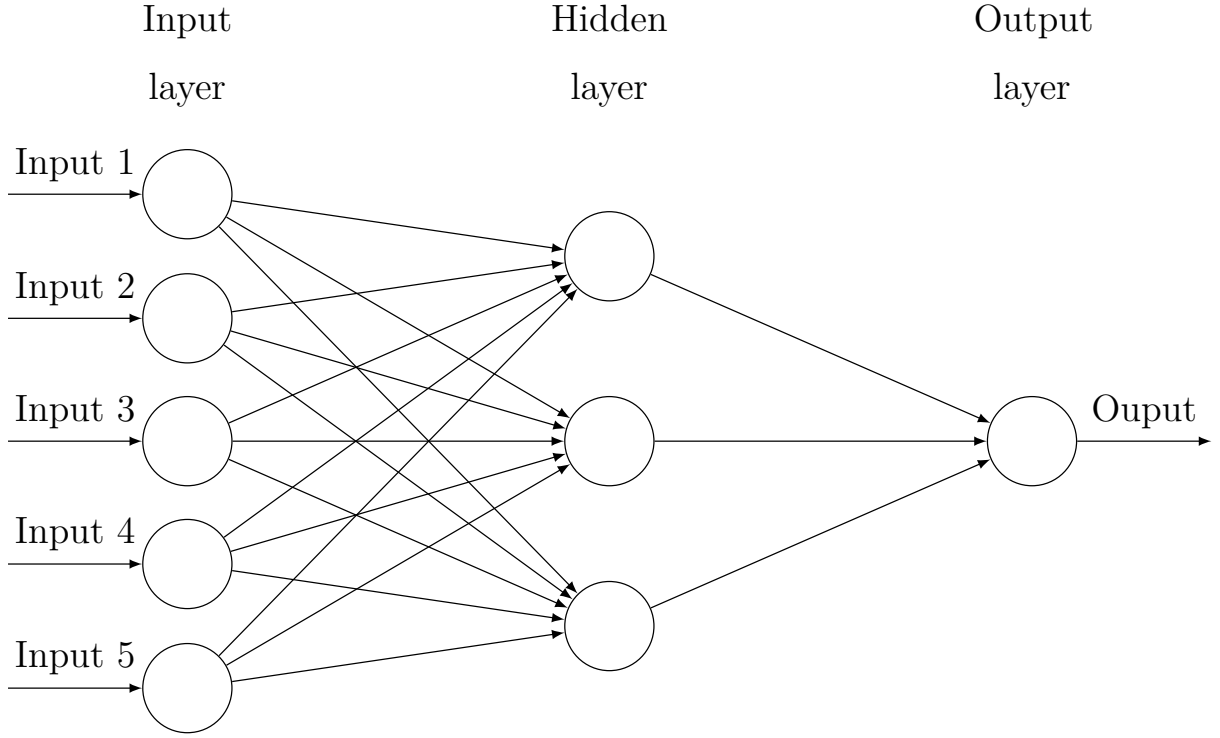


图 2-2 神经网络

这样就可以得到一种更简洁的表示法。这里激活函数  $f(\cdot)$  扩展为用向量（分量的形式）来表示，即  $f([z_1, z_2, z_3]) = [f(z_1), f(z_2), f(z_3)]$ ，那么，上面的等式可以更简洁地表示为：

$$z^{(2)} = W^{(1)}x + b^{(1)} \quad (2-6)$$

$$a^{(2)} = f(z^{(2)}) \quad (2-7)$$

$$z^{(3)} = W^{(2)}a^{(2)} + b^{(2)} \quad (2-8)$$

$$h_{W,b}(x) = a^{(3)} = f(z^{(3)}) \quad (2-9)$$

将上面的计算步骤叫作前向传播。用  $a^{(1)} = x$  表示输入层的激活值，那么给定第  $l$  层的激活值  $a^{(l)}$  后，第  $l+1$  层的激活值  $a^{(l+1)}$  就可以按照下面步骤计算得到：

$$z^{(l+1)} = W^{(l)}a^{(l)} + b^{(l)} \quad (2-10)$$

$$a^{(l+1)} = f(z^{(l+1)}) \quad (2-11)$$

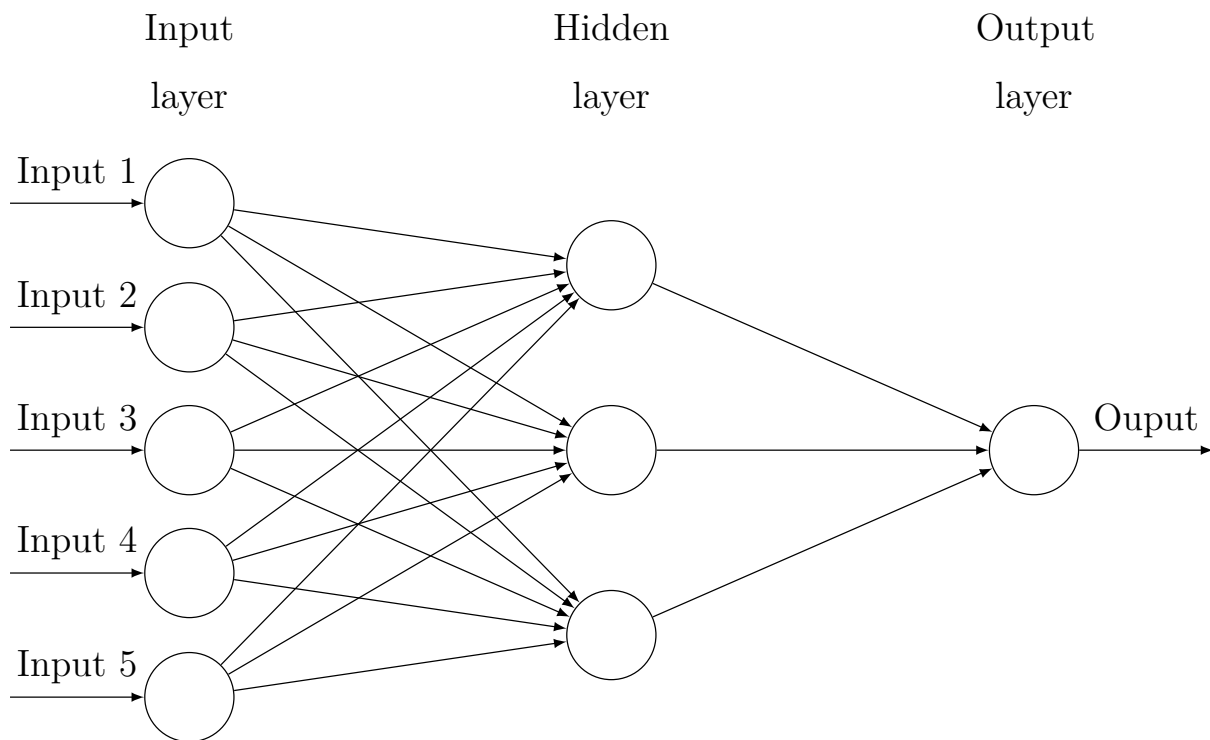


图 2-3 具有多个输出单元的神经网络示意图

将参数矩阵化，使用矩阵 - 向量运算方式，我们就可以利用线性代数的优势对神经网络进行快速求解。

也可以构建另一种结构的神经网络（这里结构指的是神经元之间的联接模式），也就是包含多个隐藏层的神经网络。最常见的一个例子是  $n_l$  层的神经网络，第 1 层是输入层，第  $n_l$  层是输出层，中间的每个层  $l$  与层  $l+1$  紧密相联。这种模式下，要计算神经网络的输出结果，我们可以按照之前描述的等式，按部就班，进行前向传播，逐一计算第  $L_2$  层的所有激活值，然后是第  $L_3$  层的激活值，以此类推，直到第  $L_{n_l}$  层。这是一个前馈神经网络的例子，因为这种联接图没有闭环或回路。

神经网络也可以有多个输出单元。比如，图 2-3 的神经网络有两层隐藏层： $L_2$  及  $L_3$ ，输出层  $L_4$  有两个输出单元。

要求解这样的神经网络，需要样本集  $(x^{(i)}, y^{(i)})$ ，其中  $y^{(i)} \in \Re^2$ 。

## 2.4 深度卷积神经网络

深度卷积神经网络在车牌和人脸检测领域的应用研究-张勇

在分类器设计方面，本章设计利用卷积神经网络的分类器。典型的卷积神经网络由

深层结构堆叠在一起的多个不同的层组成：输入层，多组卷积和池化层，有限数量的完全连接的隐藏层，以及输出层。其中最主要的部分为卷积层。其利用输入数据中的局部结构，将整个输入空间划分成很小的隐藏单元。将各个隐藏单元的权重构建得到的卷积核作用于整个输入空间，从而得到特征向量。利用这种机制，我们不仅大大减少了参数数量同时提高了数据的平移不变性。

其基本架构如图 2-2所示，最左边的为输入层，其中的神经元为输入神经元。最右边的输出层包含有输出神经元，可以有一个也可以由多个。中间层为隐藏层，这部分为需要进行主要设计，也是各种神经网络模型的主要区别之处。为了增强其泛化能力，一般情况下有扩增路径（将多个分支包含在架构中）、金字塔形状（在整个架构中应该有一次整体的平滑的下采样，而且该下采样应该与信道数量的增长结合起来）、规范层输入（使层输入标准化，使所有输入样本更加平等）等各种设计法则，此部分需要根据实际问题以及测试结果不断调整。

#### 2.4.1 卷积

深度卷积神经网络在特征提取过程中一个主要操作为卷积，在前向计算过程中，对于输入的一定区域的数据  $x$  和滤波器（或者说权重） $w$  点乘后得到新的特征向量，然后滑过一个个滤波器，组成新的输出数据  $s(t) = \sum_{a=-\infty}^{\infty} x(a)w(t-a)$ 。每个滤波器只关心数据的部分特征，当出现它学习到的特征的时候，就会呈现激活态。

深度卷积神经网络在特征提取过程中一个主要操作为卷积，在前向计算过程中，对于输入的一定区域的数据和滤波器（或者说权重）点乘后得到新的特征向量，然后滑过一个个滤波器，组成新的输出数据。每个滤波器只关心数据的部分特征，当出现它学习到的特征的时候，就会呈现激活态。

#### 2.4.2 局部感受野

对于传统的神经网络，每个输入元素会连接到每个隐藏神经元。相反，我们只是把输入的频谱数据进行小的、局部区域的连接，也即第一个隐藏层中的每个神经元会连接到一个输入神经网络的一个区域。这个输入向量的区域被称为隐藏神经元的局部感受野。它是输入向量上的一个小窗口，对于每个连接学习一个权重而隐藏神经元同时也学习一个总的偏置。通过在整个输入频谱数据上交叉移动局部感受野，可以构建起第一个隐藏层。



### 2.4.3 共享权重和偏置

上面已经说过对于每个隐藏神经元具有一个偏置和连接到它的局部感受野的权重，同时对于该层的所有的隐藏神经元中每一个使用相同的权重和偏置。也即，对第  $j$  个隐藏神经元，输出为： $\sigma(b + \sum_{m=1}^M w_m a_{j+m})$  这里  $\sigma$  是神经元的激活函数， $b$  是偏置的共享值， $w_m$  是一个共享权重的  $1 \times M$  向量， $a_k$  表示位置  $k$  的输入激活值。这意味着第一个隐藏层的所有神经元检测完全相同的特征，只是在输入频谱数据的不同位置，因此卷积网络可以很好地适应频谱数据的布拉格峰偏移情况。

### 2.4.4 池化

我们在通过卷积获得了特征之后，下一步我们希望利用这些特征去做分类。理论上讲，人们可以用所有提取得到的特征去训练分类器，例如 *softmax* 分类器（多分类的逻辑回归分类器），但这样做面临着计算量的挑战，除此以外过多的特征向量，也容易导致过拟合。

由于我们雷达信号具有一种“静态性”属性，在一个数据区域有用的特征极有可能在另一个区域同样适用。因此，为了描述数据量较多的数据，一个很自然的想法就是对不同位置的特征进行聚合统计，例如，可以计算频谱数据上一段频率范围内的某个特征的最大值（或平均值）。这些经过采样的统计特征相比使用所有提取得到的特征不仅具有低得多的维度，同时还不容易过拟合，在一定程度上会改善结果。这种聚合的操作称为池化，常用的池化方法有平均池化和最大池化。由于这些池化单元具有平移不变性，所以即使频谱数据的布拉格峰经历了一个小的平移之后，依然会产生相同的池化的特征。

深度卷积神经网络具有过拟合的自然趋势，虽然可以通过权重共享来减少参数的数量。但是由于大多数情况下，估计集的数量比训练集大一个数量级，使得神经网络模型的泛化能力不足。在每个训练迭代中，每个隐藏单元以预定概率被随机删除，删除后学习过程继续。这些被称作 *dropout* 的随机扰动有效地防止了神经网络学习过程的依赖关系，并在隐藏的单元之间创建了复杂的关系。这样增加了网络模型的复杂度，从而提高深度神经网络模型的泛化能力。

### 2.4.5 网络的训练与学习

添加文字描述，关于梯度下降算法。

如果用符号  $x$  表示一个训练输入，用  $y = y(x)$  表示对应的期望输出。学习算法的主要目的是，找到一个权重和偏置，使得网络的输出  $y(x)$  可以拟合所有的训练输入  $x$ 。

为此可以定义一个损失函数（又称作代价函数）：

$$C(w, b) \equiv \frac{1}{2n} \sum_x \|y(x) - a\|^2 \quad (2-12)$$

这里  $w$  表示所有的网中权重的集合， $b$  是所有的偏置， $n$  是训练输入数据的个数， $a$  是表示当输入为  $x$  时输出的向量，求和总是在总的训练输入  $x$  上进行的。上述损失函数为均方误差，其是可以根据不同的问题进行不同的设置的。从定义可以看出， $C(w, b)$  越小说明分类越准确，那么训练神经网络的目的就是找到最小化二次代价函数  $C(w, b)$  的权重和偏置。

将上述问题一般化也就是，最小化任意的具有  $m$  个变量的多元实值函数  $C(v)$ ， $v = v_1, v_2, \dots, v_m$ 。对于这种具有大量变量的函数的解析解是极其复杂的，其比较合理的思路为利用数值计算的方法求取其极值点。每次对于  $C$  中的自变量添加一个微小的变化  $\Delta v$ ，根据此变化反映出来的  $C$  的变换  $\Delta C$  更新下次的微小变化，从而使得  $C$  可以持续减小。对  $C$  中自变量的变化  $\Delta v = (\Delta v_1, \dots, \Delta v_m)^T$ ， $\Delta C$  将会变为

$$\Delta C \approx \nabla C \cdot \Delta v \quad (2-13)$$

，这里的梯度  $\nabla C$  定义如下：

$$\nabla C \equiv \left( \frac{\partial C}{\partial v_1}, \dots, \frac{\partial C}{\partial v_m} \right)^T \quad (2-14)$$

其把  $v$  的变化关联为  $C$  的变化，假设我们选取  $\Delta v = -\eta \nabla C$  这里的  $\eta$  是一个很小的正数（称为学习速率），这时候有

$$\Delta C \approx -\eta \nabla C \cdot \nabla C = -\eta \|\nabla C\|^2 \leq 0 \quad (2-15)$$

也即如果利用更新规则  $v \rightarrow v' = v - \eta \nabla C$ ， $C$  会持续减小，此更新规则即为梯度下降算法，这就是最基本的学习算法。可以根据选择不同的代价函数  $C$  或者通过计算来完成学习速率的选择等各种技术对学习算法进行优化。

## 2.5 深度卷积神经网络在雷达信号处理中的应用

由于深度卷积网络在图像处理等领域的卓越表现，一部分学者也开始将其应用于雷达的信号处理领域。在早前，大部分应用均集中于合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像处理，主要用于遥感中的地物分类领域 [79, 80, 81]。而随着深度学习技术的发展，一部分学者逐渐把深度学习引入新的领域。Y Zhang [82] 通过将传统的 MN 逻辑航迹起始算法与深度学习进行结合实现了在复杂杂波环境下的多目标航迹起始算法。虽然应用场景逐渐增大，但是大部分的实施步骤仍然是利用二维的卷积神经网络对

图像进行分类识别等，我们在此通过对雷达信号序列的分析，利用深度学习方法对一维序列雷达信号进行处理。

### SAR 雷达图像处理基于深度学习的多摄像机协作监控系统

## 2.6 小结

本章总结了基本的深度学习基础。首先是其基本分类，然后针对于本文利用的深度卷积神经网络，首先介绍了传统的神经元的结构和卷积神经网络基于此的改进。在最后讨论了深度卷积神经网络在雷达信号处理中的应用。

This Page Intentionally Left Blank!

### 3 基于深度学习的天波超视距雷达地海杂波识别

#### 3.1 引言

该章可以添加利用二维卷积神经网络进行识别的算法实验 复合类的提取

天波超视距雷达利用电磁波在电离层与地/海面之间的反射作用传输高频能量，其作用距离不受地球曲率的限制，可实现对隐身战斗机、洲际导弹、巡航导弹、大中型舰船等高价值目标的远程预警，受到世界各国的高度关注。天波超视距雷达系统主要由主雷达和电离层探测子系统组成，其中后者为前者提供电离层传播条件评估以及坐标配准参数等。由于电离层探测子系统独立于主雷达工作，因此其提供的坐标配准参数与主雷达量测回波存在不一致性、误差大等问题，从而造成电离层传播模式识别正确率低、目标定位精度差等。一种改进方式是通过设置有源信标提供坐标配准修正参数，但是受到可部署区域的限制。由于陆地、海洋对雷达信号散射特性不同，可将陆地、海洋地理信息作为一类无源信标。通过区分识别地海杂波、构建地海边界轮廓、与先验地理轮廓信息匹配可同样提供坐标配准修正参数。传统地海杂波识别算法难以准确提取及表达地海杂波特征，从而在复杂电离层状况下地海杂波识别正确率较低。因此，如何发展一种更加准确的地海杂波类型识别方法，对天波超视距雷达电离层参数辨识及目标定位精度的提升有着重要意义。

本章解决了在复杂的电离层环境下天波超视距雷达地海杂波类型的识别问题。本章构建了适用于天波超视距雷达地海杂波类型识别的卷积神经网络，利用大量训练数据对卷积神经网络进行训练，提取合理的特征；然后，利用提取的特征对实时雷达地海杂波回波进行在线分类识别。本章要解决的技术问题是提供一种新的基于深度神经网络的地海杂波识别技术，避免了手工提取地海杂波特征。本章所提出的算法大大提高了天波超视距雷达地海杂波的识别正确率与实时性。

天波超视距雷达由于受雷达工作机制及其电波环境的影响，特别是受电离层多模多路径影响，目标回波-传播模式正确配对很困难，目标检测和定位精度较低。为了提升目标定位精度，一种设想是利用检测区域内的有源/无源信标进行目标位置修正处理，通过对地海杂波特征深入分析和研究，分类识别出地海杂波，提取地海特征信息，并通过与地理位置匹配处理产生修正参数等，从而解决电离层模式配对等诸多工程应用问题，达到提升目标定位精度的目的。同时，在海杂波背景中探测海绵舰船目标的环境极其复杂，由于电波传播环境的影响（电离层时变和失真、易受干扰等），地海杂波附近存在很

多虚警回波，严重影响目标的发现和自适应跟踪处理。为提升对舰船目标的处理能力，有必要研究新的处理方法，既能有效抑制虚警杂波，又能识别出感兴趣的低速舰船目标并稳定跟踪。

天波超视距雷达目标定位精度依赖于传播模式的准确识别以及 PD 变换系数的精确测量。电离层传播的复杂性使得传播模式很难精确确定，而电离层探测子系统独立于主雷达工作导致其提供的坐标配准参数与主雷达量测回波存在不一致性、误差大等问题，从而造成电离层传播模式识别正确率低、目标定位精度差等。天波超视距雷达地海杂波识别是一种基于无源信标（远海区域的岛屿等陆地）获得 PD 变换系数的技术。鉴于远海地区有源设备的布置面临着较大的困难，通过区分识别地海杂波、构建地海边界轮廓、与先验地理轮廓信息匹配可同样提供坐标配准修正参数，改善周围航迹目标的定位精度。受分辨率低、定位精度差、系统偏差大、电离层多模、多路径传播等因素影响，天波雷达地海杂波识别技术存在很大挑战，主要体现在以下几个方面：

- 天波雷达的距离分辨率为 7.5-30 公里，方位分辨率为  $0.582-1.067^\circ$ ，低分辨率影响地海特性的判别以及匹配精度；
- 离层状况变化情况十分复杂，导致地海杂波的特性并不稳定，区分地海杂波特性的布拉格峰会发生偏移甚至某个峰会消失，对地海杂波的建模影响很大；
- 确定修正系数对周围区域航迹的修正范围、有效性等难度大，需要大量实装数据验证；

因此，一些作者提出了一种使用岛屿作为无源信标的方法来寻找 PD 变换系数 [14] 的方法。我们可以根据频谱数据识别出地海分界线，进而确定出岛屿在雷达坐标系中的位置，然后将其与地理坐标中的岛屿对应。因此，我们可以根据相同位置基准的偏差来获得 PD 变换系数。因此，这种方法最基础和最关键的部分是识别地海杂波识别。

上述所有作者的研究重点主要是如何通过地理坐标的匹配来进行求取变换系数，而对于地海杂波识别方面的研究却并不多。靳珍璐等 [83] 提出了一种基于支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 的识别算法。他们通过使用三种地海杂波频谱特征来训练 SVM，并用仿真数据进行验证。然而，在实际情况下，地海杂波的特征取决于当时的电离层环境、雷达的扫掠角度、天气环境等，地海杂波模型有十分强的不确定性。当建模所需的参数变化时，算法的准确性将急剧下降。2013 年，Li 等 [84] 使用神经网络方法解决了一个和我们问题十分相似的飞机检测问题。

在本章中，我们采用深度学习方法，特别是深层卷积神经网络来解决天波超视距雷达的地海波识别。通过分析天波雷达收到的地海回波频谱数据的特征，我们发现... 基于

### 深度学习方法，符合分类器优势资格。

一种方法是利用建立基于先验信息的电离层统计模型，另一种方法是通过一些检测设备收集信息。但是这两种方法都有一些限制，前者无法及时更新，有时会产生严重错误（如天气突变情况），后者需要大量设备，并且不容易将其放置在远海地区。

我们利用不同电离层条件、雷达工作条件、位置和时间下的频谱数据来进行算法的验证。不同的时间和地理位置对应于不同的电离层条件，不同的电离层条件将严重影响频谱的状态。对于不同的雷达工作条件，由于发射频率变化，回波频谱密度和幅度也将随之变化。通过观察、学习大量不同条件的频谱数据，可以更全面地区分地海杂波。

#### 3.1.1 地海杂波识别分析

天波超视距雷达目标的坐标配准问题在很大程度上影响了其跟踪精度，特别是对于电离层参数无法准确及时获得的较远。识别地海分界线主要有两个优点：第一个是我们可以使用获取的杂波地形图与实际的地图进行匹配，然后根据匹配结果计算偏移量，得到坐标修正系数，用来提高目标跟踪精度；另一方面，我们可以利用由识别结果获得的频谱上的偏移来校正频谱本身，以提高目标检测概率和准确度。

天波超视距雷达频谱数据的地海杂波识别有两个独特的挑战。第一个是难以对杂波进行建模，由于电离层模型变化较大导致杂波模型混乱且复杂性较高。传统的建模方法一般根据实际数据选取一种分布来描述雷达杂波，如瑞利分布（Rayleigh distribution），威布尔分布（Weibull distribution），K 分布（K distribution）等。但天波超视距雷达获得的杂波模型一直变化，这种建模方法不能得到很好的结果。其次，传统的地海杂波的分类特征很难定量描述。一个熟练的操作人员可能很熟练地区分出地海杂波，但是这部分却很难利用数学模型对其描述。本章我们提出了一种新的可以有效解决上述挑战的利用深度卷积神经网络的方法。我们的算法将 CNN 应用于地海杂波识别。我们避免了对杂波进行建模选取特征的方法，从根本上避免了传统方法所面临的困难。

本节将我们提出的算法与传统工程中常用的单阈值法和支持向量机方法进行了对比，我们发现：

- 我们基于卷积神经网络的方法中获得最好的结果，且在地图匹配结果方面显著优于其余两种方法。
- 我们的方法具有很强的鲁棒性，雷达参数或者自然变化对识别结果影响不大。

我们初步对我们基于深度卷积神经网络的地海杂波分类算法进行了可行性分析，从结果可以看出其明显优于其余两种算法。另一方面，如果我们针对于特定的问题对卷积神经网络的参数进行调整，可以进一步提高我们算法的性能。



### 3.1.2 我们的方法

天波超视距雷达地海杂波识别技术的处理流程可分为信息预处理、地海杂波识别、地理位置匹配、定位精度提升四个处理层。图 1 系统结构图具体过程为：对频谱数据进行清洗、裁剪、融合等预处理操作，将预处理过的整体频谱数据输入到已经训练好的深度卷积神经网络分类器中进行识别，并将识别结果与二值化的地图模板进行匹配，从而得到匹配结果进而得到修正系数。最终将修正系数应用于目标跟踪过程，提升定位精度。

深度学习体系结构中有几大网络模型，其中的卷积神经网络可以直接将整个需要分类的数据作为网络的输入，避免了传统识别算法中复杂的特征提取和数据重建过程。基于此优点，使卷积神经网络在本章所需解决的天波超视距雷达地海杂波特征识别问题中有着巨大优势。

典型的卷积神经网络由深层结构堆叠在一起的多个不同的层组成：输入层，多组卷积和池化层，有限数量的完全连接的隐藏层，以及输出层。其中最主要的部分为卷积层。其利用输入数据中的局部结构，将整个输入空间划分成很小的隐藏单元。将各个隐藏单元的权重构建得到的卷积核作用于整个输入空间，从而得到特征向量。利用这种机制，我们不仅大大减少了参数数量同时提高了数据的平移不变性。

本章根据地海杂波频谱的实际数据以及其反映出来的特性，构建了基本的具有 3 层隐藏层的深度卷积神经网络，每层具有多个特征向量，每个特征向量具有多个神经元，并且每个特征向量来自于一种卷积核所提取输入的一种特征。

频谱数据预处理频谱数据是从天波超视距雷达获取的多普勒频率与幅度值对应的数据。在利用数据之前，我们首先对该数据进行清洗，把下图这种并非处于正常探测模式下的数据进行去除。图 3 需要被清洗掉的数据由于数据来自不同波位、不同时刻，具有不同的雷达工作频率，我们在利用这些数据进行训练或者识别前需要首先对其进行基本的处理。主要包括将数据按照积累点数、波位和多普勒频率范围进行分类，不同类别的数据分开处理。另一方面，由于地海杂波特征主要集中于多普勒频率较低的区域，我们可以将数据进行裁剪，只选取有效数据（本课题中在权衡信息保留以及计算量的清洗下，保留了处于零频附近，且频率范围为整体一半的区域），在一定程度上减小计算量。图 4 数据裁剪示意图受电离层非平稳、时变等特性影响，天波超视距雷达杂波数据可能会出现较大波动。对这种波动不加处理会导致地海杂波识别结果不准确。在一个相对短时间内，电离层会保持一个较平稳的状态，也即同一距离、方位单元的真实的地海属性不会发生变化。因此，本课题在频谱数据预处理阶段采用滑窗融合的思想，将连续窗长时间内的相邻杂波数据进行加权融合得到新的频谱数据作为深度卷积神经网络分类器



的输入，其中为频谱数据的权重，关于窗长及权重的选择会在后面技术方案验证部分进行详细的讨论。

卷积神经网络 (Convolution neural network, CNN) 是深度学习中的一种重要算法，在分类等领域具有很大的优势。该方法经常被用于图像识别、语音识别等问题。它对原始数据进行卷积运算，**然后提取从最后一步生成的卷积数据的特征**，丰富了识别中使用的特征。同时，它可以通过池化（合并相邻特征）减少计算复杂度。通过利用 CNN 进行地海杂波识别，避免了对天波雷达回波的建模，从根本上避免了传统方法所面临的困难。我们结合我们具体问题构建了一个三层卷积神经网络。在此基础上，我们使用相同的样本来分别训练和测试基于支持向量机的分类器和我们的算法。实验结果表明我们的算法具有更好的稳定性和准确性。我们的地海杂波识别问题主要是基于频谱数据的特征来识别。人工识别主要基于海杂波中存在两个关于零频对称的布拉格峰，而地杂波只存在零频率附近的一个峰值。然而，还有一些无法直观的描述的特征，如整体幅度等等。此外，在一些频谱数据中仍然有一些无用的特征，例如，出现一个目标，这部分可以通过卷积特征提取和权重共享容易地去除对最终识别的影响。因此，一种基于 CNN 的方法很适合我们的问题。

综上所述，我们这里的创新点有以下两个方面：

- 我们提出了一种使用深度卷积神经网络方法利用频谱数据进行地海杂波分类的方法，克服了传统算法的挑战。
- 我们利用实际数据进行验证，发现利用不同时间的同一区域的频谱数据进行融合可以很大程度上提高分类精度。

### 3.2 地海杂波识别算法

天波超视距雷达地海杂波识别技术利用深度学习中的深度卷积神经网络算法(DCNN), 避免了对于地海杂波的建模，也即从根本上避免了传统方法所面对的困难。如图 xxxx 所示，其主要可分为训练和识别两个步骤：利用大量已打好标签的样本通过深度卷积神经网络进行训练；然后对于新得到的雷达频谱数据利用模型进行识别，获得当前频谱数据的识别结果。图 xxxx 地海杂波识别技术结构图利用深度卷积神经网络进行天波超视距雷达地海杂波识别过程的主要挑战与难点在于网络模型的设计。如图 xxxx 所示，本课题设计的深度卷积神经网络的结构在功能上可以分为特征提取和全连接网络这两部分，特征提取层主要通过卷积操作和池化操作从输入的频谱数据中学习出最好的卷积核以及这些卷积核的组合方式，同时每一层的输出又作为下一层的输入，每层具有多个特

征向量，每个特征向量具有多个神经元，并且每个特征向量来自于一种卷积核所提取输入的一种特征；全连接网络，主要是将任何一个神经元均和上一层的任何神经元之间建立管理，通过矩阵运算得到输出结果。图 6 深度卷积神经网络结构图 (1) 深度卷积神经网络结构设计对于频谱数据的杂波识别问题，可以构建如下的神经网络结构，其基本步骤为：图 7 本课题深度卷积神经网络结构设计图（以的序列为例）步骤 1：输入地中海杂波频谱数据（此处以大小为 128 的输入序列为例），对其进行卷积运算，得到层。本课题经过不同参数的试验对比结果，最终确定使用 32 个大小为 3 的卷积核，故特征向量中每个神经元与输入中的邻域相连，这样层中的特征大小就为 128。又因为有 128 个可训练参数（每个滤波器具有 3 个单元参数和一个偏置参数，一共 32 个滤波器，共 128 个参数），共 128 个连接，将连接通过 ReLU 激活函数。步骤 2：对进行最大池化处理，该操作将相邻的多个特征采用一个特征进行代替。通过降低特征向量的长度，在减小了计算量的同时也在一定程度上修正了过拟合情形。步骤 3：将经过上述两个步骤获得的特征向量作为新的输入，重复三次步骤 1 至 2，可以得到一个三阶段的深度卷积神经网络结构。通过上述多阶段卷积操作，输入向量的特征获得了充分的提取。步骤 4：构建输出层。压平步骤 3 获得的特征向量，把多维的输入一维化，以此作为卷积层到全连接层的一个过渡。在第一个全连接层的基础上添加参数，然后添加第二层全连接并通过激活函数，输出识别结果。(3) 深度神经网络训练过程在搭建好合理的深度神经网络结构之后，下一步需要利用大量的数据对该网络进行训练。图 8 展示了训练的基本流程，对于地中海杂波识别问题由于需要对不同相干积累点数和多普勒频率范围的数据进行分开训练，故首先需要对不同的数据进行分类处理并标注其地中海杂波类型，通过此步骤完成训练样本的生成。接下来就是利用训练样本对搭建好的网络结构进行训练，获得最终的分类器。图 8 深度卷积神经网络训练过程图训练过程或者说学习过程主要是利用了梯度下降算法，梯度反映了参数的移动方向。这其中很重要的问题就是学习率的选择，学习率过小则运行缓慢，过大则无法得到很好的结果。

1982 年，Kunihiko 等人 [67] 首次将卷积神经网络模型的概念引入深度学习。后来许多学者在实践中对 CNN 的发展和理论分析作出了重大贡献。1989 年，LeCun 等人将基于梯度的学习方法 [68] 和 BP 算法 [69] 引入到 CNN。2003 年，Behnke 写了一本总结 CNN[85] 的书。同年，Simard 等人 [70] 对卷积神经网络进行了简化。2011 年，Cirean 等 [77] 进一步改进 CNN 并实现了 GPU 版本，使得 CNN 的训练识别速度有了巨大的提升，并使用 CNN 框架对多个图像数据库进行实验，并取得了最佳成果。

在本节中，我们首先介绍我们的算法的输入和输出变量，然后描述我们的算法设计和评估方法。

### 3.2.1 特征向量和识别结果

传统的分类问题一般利用各种不同的由原始数据进行变换得到的特征进行分类。在这里，我们利用原始的杂波频谱数据来做地海杂波的识别。同时针对于我们问题的数据形式，对输入数据做了二次处理。

我们并没有选择某距离方位角单元的完整杂波频谱数据作为输入特征，而是考虑到用来区分地海杂波属性的特征主要集中于零频附近，因此我们对原始频谱数据做了剪切处理，只选择了零频附近一个区域的数据。通过减少大量无用数据，我们在一定程度上减少了计算量而且有助于防止过拟合现象的出现。

另一方面，我们最初从雷达得到的数据为时域数据，我们对这些数据进行快速傅立叶变换获得频域中的数据。虽然，表面上看利用频域或者时域数据进行训练和测试区别不大。然而，在实际的情况中，特征所处的位置在时域数据以及频域数据中并不相同，并且频域数据的特征更加集中，这样在执行卷积运算时学习得到的特征也更加准确。

#### 概率阈值

由于我们的问题是一个二分类问题，所以我们得到的是回波频谱数据是来自于海洋还是陆地的概率。对于一般的二分类问题，我们可以使用 0.5 作为概率阈值来进行分类。但是，在我们的问题上，结合实际的情况，我们需要考虑下面两个方面：

- 海洋的变化远远大于陆地，海洋容易被误判为陆地。
- 海洋/陆地应该是连续的。

因此，我们不能直接输出结果。我们需要找到合适的阈值来划分地海杂波，**这将在后面讨论**。此外，我们还需要根据该距离方位单元周围单元的识别结果进行进一步处理。也就是说，如果我们得到初步结果  $y_{i,j}$ ,  $i$  表示方位角的  $i$  个单位， $j$  表示  $j$  个斜率单位。那么，最终结果  $y_{i,j}$  可以表示为：

$$y_{i,j} = (1 - w)y_{i,j} + \frac{w(y_{i-1,j} + y_{i+1,j} + y_{i,j-1} + y_{i,j+1})}{4} \quad (3-1)$$

$w$  是周围的频谱数据影响结果的权重。

### 3.2.2 算法设置

#### 训练

本课题不仅考虑梯度，同时考虑包含梯度变换的信息，采用了一种具有自适应学习率的优化算法 Adam(Adaptive Moment Estimation)。该算法利用梯度的一阶矩估计和

二阶矩估计动态地调整每个参数的学习率。经过偏置校正后，每一次迭代学习率都有明确范围，使得参数比较平稳。传统的梯度下降更新规则为，这里表示需要学习的参数，为学习速率，为损失函数的梯度，则变为，在这里是用来控制梯度变化的超参数。其根据实际数据进行调整过参数后的具体步骤为：首先初始化步长，矩估计的期望衰变率，初始参数，一阶矩与二阶矩，迭代次数；接下来，从训练集中选取对应于目标的具有个样本的采样，其中为批处理中一批样本的个数；然后，计算梯度，其中为损失函数，针对天波超视距雷达的杂波类型识别问题采用对数损失函数，其定义为。更新迭代次数，有偏一阶矩估计，有偏二阶矩估计，这里表示点乘，也即两个矩阵对应元素相乘。对一阶矩估计和二阶矩估计修正得到，更新参数，其中用来保持稳定性；判断更新后的参数是否满足结束条件，如果不满足，则从采样步骤开始重复迭代执行。

在本章的问题中，我们选取了几种不同的雷达工作配置下的数据。多普勒频率的范围可以是-5Hz 至 5Hz，也可以是-20Hz 至 20Hz。我们分别以不同的频率训练数据。此外，对于相同频率的数据，我们通过人工辨识的方法从中抽取出可以准确判定为地或者海的样本数据用于实验的训练和测试。同时，为了保证样本的多样性，对于同一个雷达参数下的数据，我们根据季节、地理位置、一天的早中午进行了选择，确保可以覆盖尽可能多的情形。

## 算法验证

对于一个分类问题，最基本的算法性能评估方法是分类的准确度。然而，由于我们这里利用实际数据进行验证，这些数据没有准确的标签，尤其是地海交界处的杂波的类别更加难以确定。而在实际工程实践中，该部分的识别准确度影响着最终电离层参数的辨识。因此，我们设计了另一种评估方法来分析我们算法的性能，该方法为与地图的匹配程度，其基本定义如下：

$$g_{C_1, C_2} = \frac{area(C_1 \cap C_2)}{\max(area(C_1), area(C_2))} \quad (3-2)$$

我们用 0 和 1 来二值化我们的区域，如图 3-1所示。 $area(C)$  表示区域  $C$  的面积， $g_{C_1, C_2}$  表示区域  $C_1$  和  $C_2$  的相似度。

## 单阈值法

首先介绍一种常用于工程实践中的地海杂波识别算法，单阈值法。通常，海洋和陆地杂波的差异在于，地杂波最大能量的频率几乎为零。然而，海杂波存在沿着零频率对称的有两个类似的峰，称为布拉格峰。因此，我们可以使用频率  $f$  来判别频谱数据的地



图 3-1 A binary map.

海杂波属性。

$$f_{i,j} = \arg \max_f x(i, j, f) \quad (3-3)$$

$x(i, j, f)$  是在频率  $f_{i,j}$  下的能量值。在已知  $f_{i,j}$  的情况下, 我们需要和阈值  $\eta$  比较来判断其地海属性。

$$y_{i,j} = \begin{cases} 0 & |f_{i,j}| > \eta, \\ 1 & |f_{i,j}| < \eta \end{cases} \quad (3-4)$$

0 代表海洋, 1 代表陆地。

### 3.2.3 我们的分类算法

受电离层非平稳、时变等特性影响, 天波超视距雷达杂波数据可能会出现较大波动。对这种波动不加处理会导致地海杂波识别结果不准确。在一个相对短时间内, 电离层会保持一个较平稳的状态, 也即同一距离、方位单元的地海属性不会发生变化。本章采用滑窗融合的方法对输入数据进行预处理。其基本思想是, 将连续窗长时间内的相邻杂波数据进行加权融合得到新的频谱数据作为输入。

根据我们地海杂波频谱的实际数据及其反映的特点, 构建了一个具有六层的基本卷积神经网络, 如图 3-2所示, 每层具有多个特征向量, 每个特征向量具有多个神经元, 并且每个特征向量从提取输入的卷积滤波器的特征导出。本章选择频谱向量中的连续范围作为池化区域 (池化长度为 2), 并且只是池化相同的隐藏单元产生的特征。

### 池化层

这部分要结合实际问题讨论

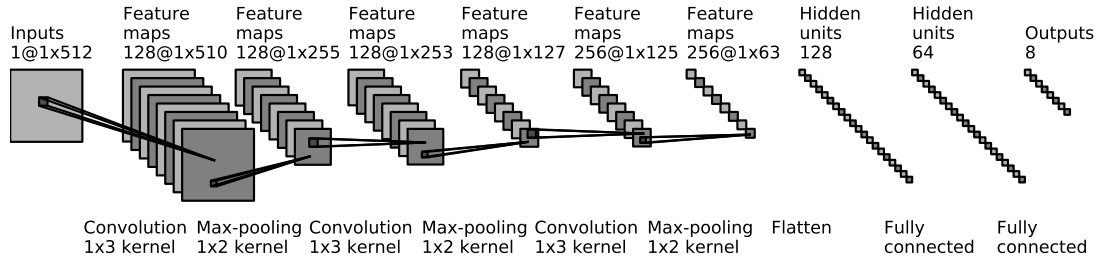


图 3-2 卷积神经网络结构

## 激活函数

激活函数的选择是构建卷积神经网络模型的一个非常重要的方面。传统方法通常选择 Sigmoid 或双曲正切。介绍 ReLU 的优越性，同时修改公式表示方法。然而，我们通常在卷积神经网络中使用以下 ReLU 激活函数。

$$F(x) = \max(0, x) \quad (3-5)$$

ReLU 具有优于传统激活函数的几个优点：更快的计算速度和更有效的梯度传播（它们不像 S 形单元那样饱和），生物学可能性和稀疏激活结构。尽管它们结构简单，但仍然保持足够的辨别性质。其缺点之一是随机权重的初始状态，多个单位可能过早地落入死区（零输出的恒定梯度）。因此，当与整个连接层进行全连接时，Sigmoid 激活函数的效果更好。

$$F(x) = \frac{1}{1 - \exp(x)} \quad (3-6)$$

## 训练算法

传统的神经网络优化方法是 mini-batch 梯度下降。这个想法是计算每次迭代的 mini-batch 梯度，然后更新参数。然而，这种方法有两个缺点，一个是学习率的选择是困难的，因为它对所有参数使用相同的学习率，故很难选择一个很合适的初值，另一个是趋向于收敛到局部最优。

在本章中，我们选择一种自适应算法 Adaptive Moment Estimation，其具有自适应学习速率。该训练算法通过使用一阶矩估计和梯度的二阶矩估计来动态地调整每个参数的学习速率。每次调整后，每个迭代学习率都有明确的范围，使得参数更加稳定。

其基本的算法表示如下：

写成算法图模式是否更好？



步骤 1：输入地海杂波频谱序列，设其为  $1 \times N$  的序列，对其进行卷积运算，得到第一个卷积层，用 C1 表示。本章使用 32 个大小为  $1 \times 3$  的卷积核，故特征向量中每个神经元与输入中的  $1 \times 3$  的邻域相连，这样 C1 层中的特征大小就为  $1 \times (N-3)$ 。又因为 C1 有 128 个可训练参数（每个滤波器具有 3 个单元参数和一个偏置参数，一共 32 个滤波器，共  $(1 \times 3 + 1) \times 32 = 128$  个参数），共  $128 \times (N-3)$  个连接，将连接通过 ReLU 激活层。

步骤 2：对 C1 进行最大池化处理，该操作将相邻的多个特征采用一个特征进行代替。通过降低特征向量的长度，在减小了计算量的同时也在一定程度上修正了过拟合情形。

步骤 3：将经过上述两个步骤获得的特征向量作为新的输入，重复多次步骤 1 至 2（本章为三次），可以得到一个三阶段的卷积神经网络结构。上述多阶段卷积操作充分提取了输入向量的特征。

步骤 4：构建输出层。拉平（flatten）步骤 3 获得的特征向量，以此作为卷积层到全连接层的一个过渡。在第一个全连接层的基础上添加 dropout 参数，然后添加第二层全连接，通过激活函数 Sigmoid，获得分类结果的输出层。

步骤 5：训练神经网络模型。在搭建好神经网络模型后，利用训练样本对该模型做进一步训练，其基本步骤如下：步骤 a、初始化步长，矩估计的期望衰变率，初始参数，一阶矩与二阶矩变量，迭代次数。步骤 b、从训练集中获取对应于目标的具有  $n$  个样本的采样，其中  $n$  为批处理中一批样本的个数。步骤 c、计算梯度，其中  $\mathcal{L}$  为对数损失函数，其定义为  $\mathcal{L} = -\sum_{i=1}^n \log p(y_i)$ 。步骤 d、更新迭代次数，有偏一阶矩估计，有偏二阶矩估计。步骤 e、修正一阶矩估计，二阶矩估计。步骤 f、更新参数，其中用来保持稳定性，同时判断是否满足结束条件，如果不满足重复步骤 b-f。

步骤 6：在线识别。将需要识别的样本进行融合预处理，其基本思路为维护一个滑窗，对于某滑窗内的对应分辨单元的数据进行加权融合，其权值与窗长需要根据实验数据进行确定（本章窗长选择为 5），然后将融合后的数据通过步骤 5 获得的训练好的模型，得到最终识别结果。

### 3.2.4 增量学习

随着时间的迁移，天波超视距雷达的观测范围或者是运行参数可能会发生大的变化，使得目前的训练结果无法很好的满足新的需求，于是本文设计了一种基于增量学习的训练方法。对于新的频谱数据集一般会相比于原数据集更小，所以重新训练常常无法取得一个很好的结果，对原始训练结果进行微调是十分必须的。一般来说，DCNN 的比较靠前的层所包含的特征更一般化，而更靠后的层会越来越特定于该频谱数据中包含的分类细节。所以一个比较好的方案是保持前面的一些层固定，只微调网络后面的一些层。另一方面，由于原始数据训练出的 DCNN 的权重是相对较好的，故需要给正在被微调的 DCNN 权重使用较小的学习率和学习衰减率。

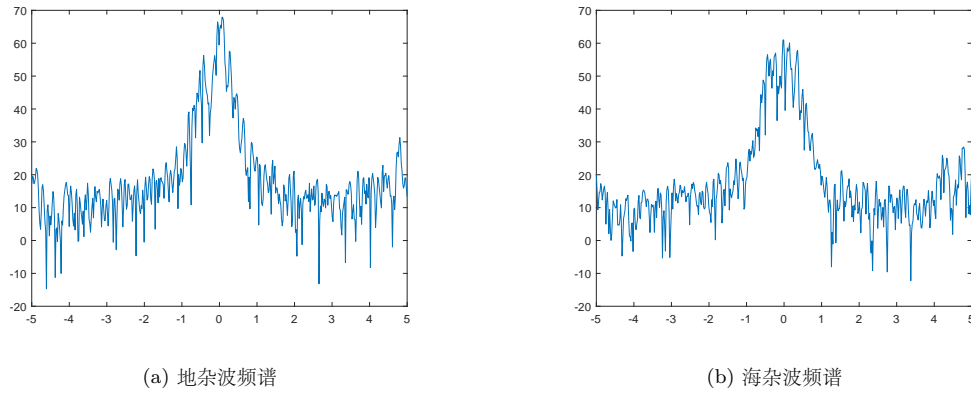


图 3-3 These two pictures are not easy to identify. 3-3a has a little shift, and the Barrage peak pf 3-3b cannot distinguish easily.

### 3.3 地海杂波分类评估

在本节中，我们利用实际数据对我们提出的算法的性能进行评估。

#### 3.3.1 数据集分析

我们所有的数据都来自不同时间，不同地点和不同雷达配置的频谱数据。我们分析了所有频谱数据，并选择一些典型的频谱数据，如图 3-3所示。

#### 数据集分组

在本章的问题中，当雷达配置发生变化时，我们会获得不同的频率范围和精度频谱数据。例如，一些频谱数据的频率变化范围为-5Hz 到 5Hz、具有 512 个相干积累点，而另一些数据的频率变化范围为-10Hz 到 10Hz、相干积累点数为 256 个。因此，基于这两个条件，我们将所有数据分为 4 组：

- 组 A: 如图 3-4a所示，具有 256 个相干积累点数，频率变化范围为-10Hz 到 10Hz;
- 组 B: 如图 3-4b所示，具有 512 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz;
- 组 C: 如图 3-4c所示，具有 512 个相干积累点数，频率变化范围为-10Hz 到 10Hz;
- 组 D: 如图 3-4d所示，具有 1024 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz;

我们只选择了上述四个具有典型意义的分组的数据来进行验证，舍弃了其余类型的与他们相似的数据，例如频率变化范围为-10Hz 到 10Hz 的具有 512 个相干积累点的数据，这与组 B 的数据基本相同。



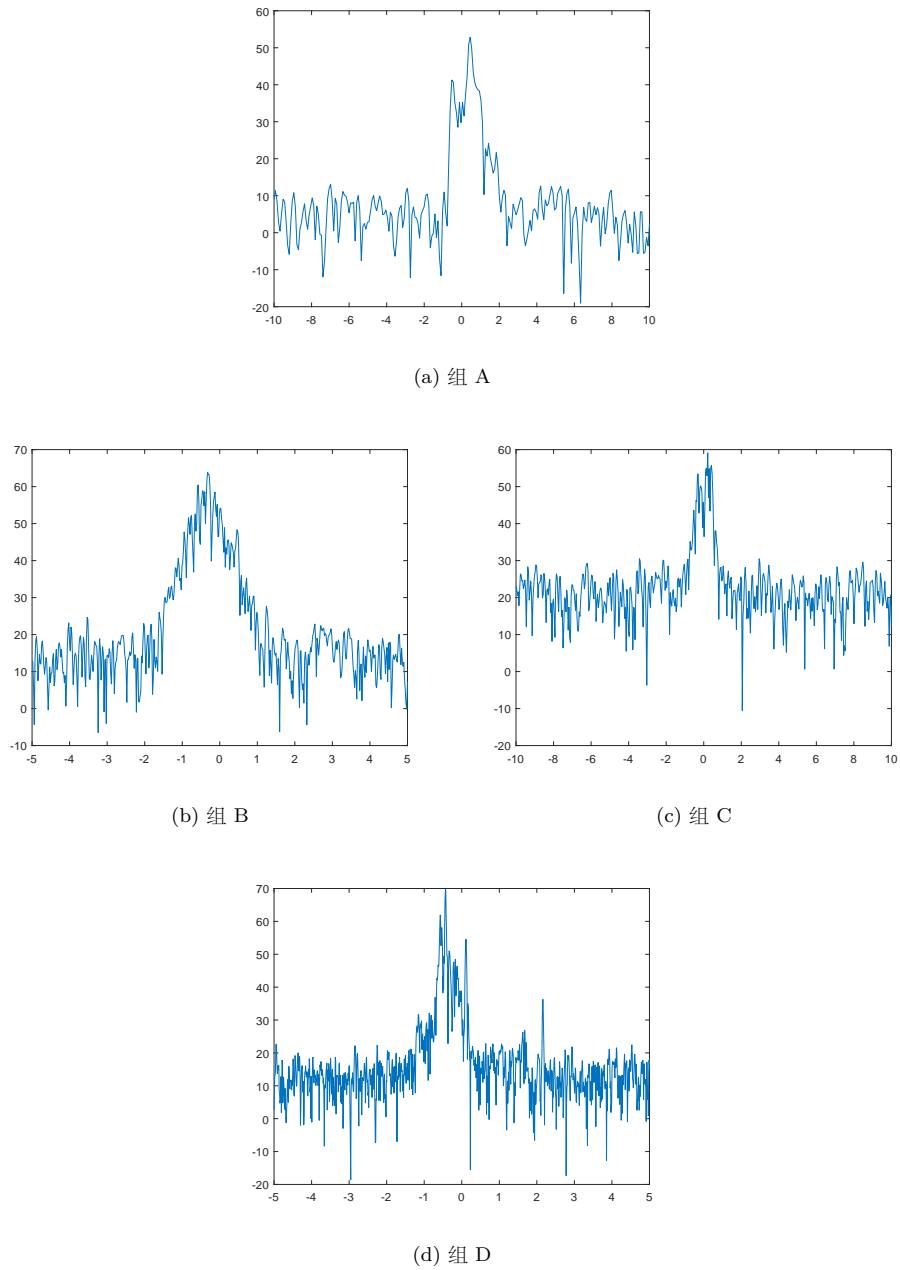


图 3-4 不同组数据的频谱对比示意图

### 3.3.2 算法实现

对其余两个算法的介绍 我们将我们的算法与传统的单特征识别算法和 SVM 算法进行对比。选择 SVM 的地海杂波的两个特征是：

- 最大后向散射幅值
- 频谱中最大与次大幅值频率之差
- 频谱中最大与次大幅值幅度之差

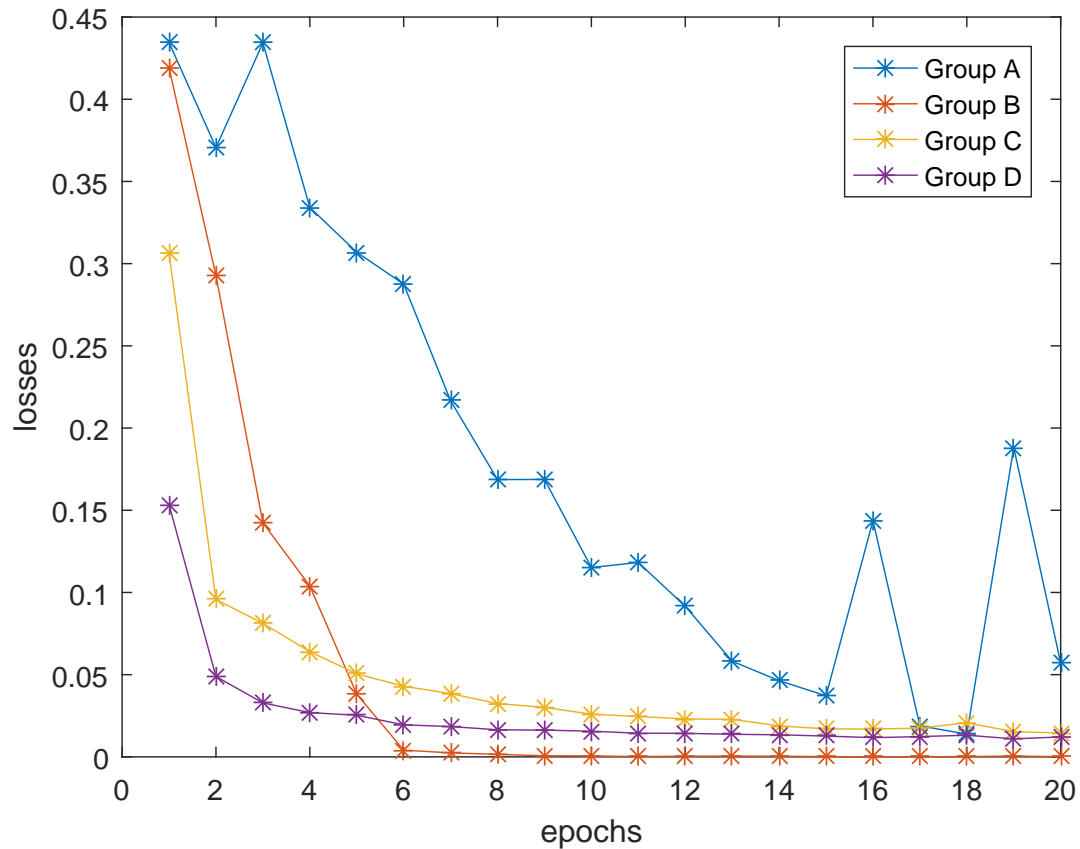


图 3-5 不同数据集损失函数对比图。

为了确保我们有足够的数据来训练和测试我们的算法，我们选取了不同的雷达工作条件、天气、时间的多组数据（每组约有 20000 个频谱数据）。我们随机选择其中 70% 的数据作为训练数据，20% 作为交叉验证数据，其他数据用作测试数据。

### 测评计算公式叙述

#### 3.3.3 仿真验证

为了验证我们的深度卷积网络的泛化能力，我们利用了四组数据测试了我们的方法，其不同组数据的损失函数如图 3-5所示，结果表明我们的算法可以在不同的数据集组中获得良好的结果。虽然，对于相同的神经网络结构，第一个数据集需要最多的迭代次数才能收敛，这是因为当频率和相干累计点的比例变小时信息或者说特征也随之减少，故需要较多的迭代次数。正如上面描述的，还有另外两种常用的算法来做地中海杂波的识别。我们利用实际数据进行实验来对三种算法进行了对比。实验结果如表 3-1所示，可以明显的看到，我们的算法在识别正确率和匹配准确率均为最优。并且，我们可以发现 SVM 和基准方法都匹配到了错误的区域。此外，当通过整个世界地图找到最大的匹

表 3-1 三种算法识别正确率与匹配正确率计算.

	我们的算法	支持向量机	单阈值算法
识别正确率	99.69%	92.44%	81.85%
最大匹配正确率	88.99%	22.77%	23.48%
匹配正确率	88.99%	81.31%	88.21%

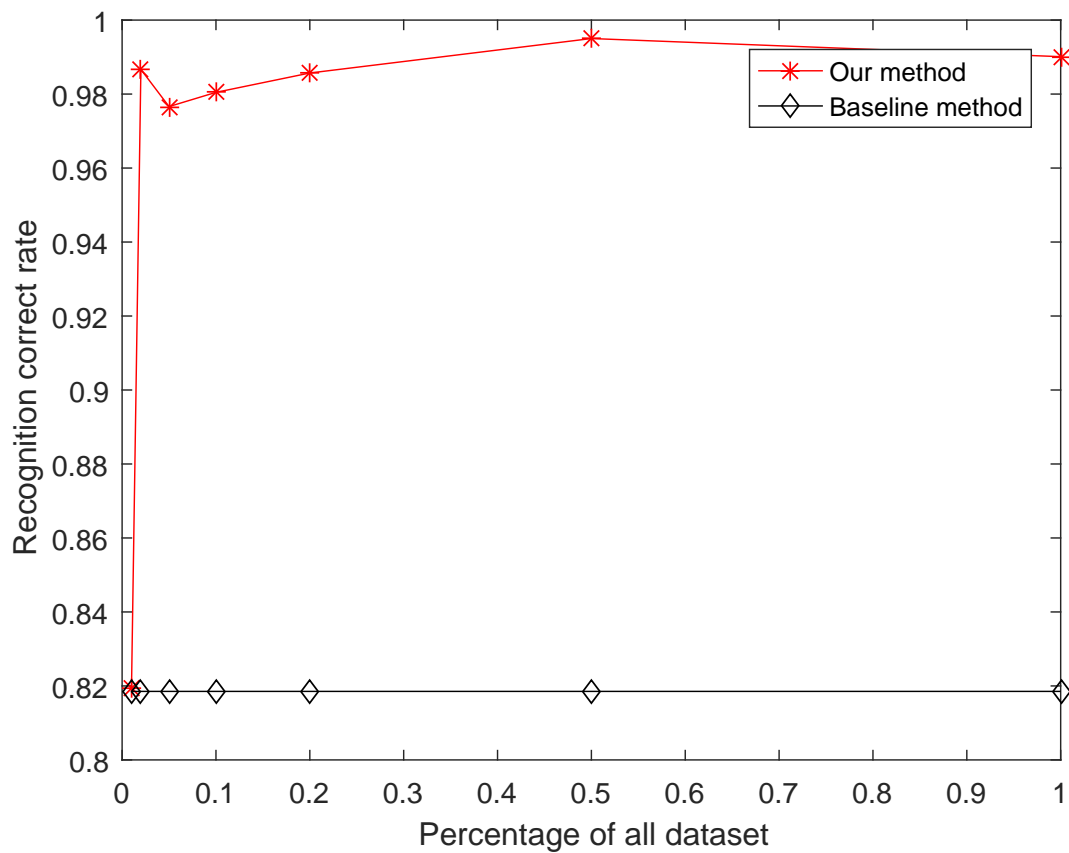


图 3-6 不同数量数据集的分类准确度对比曲线图

配率时，三种方法与其配对地图在一段时间内的交配率似乎有所不同。

#### 添加对于三个判断结果参数的设计

图 3-6展示的是在样本集大小不同的情况下，我们的算法与基准算法的平均分类准确率的对比图。由于基准方法仅使用根据先验知识得到的阈值，因此随数据集增长其识别准确度变化不大，而我们的深度卷积神经网络的算法随着数据集内样本数量的增加，准确度有着显著提升。

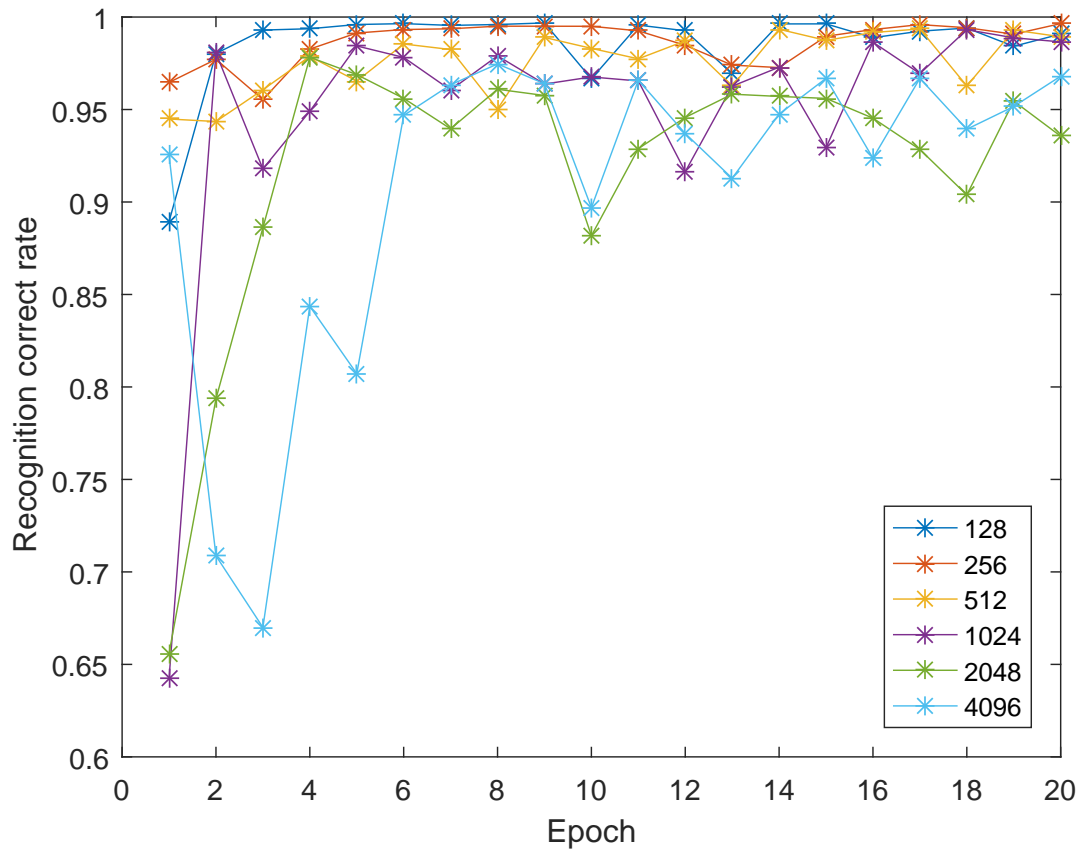


图 3-7 不同批长度下，分类准确度与迭代次数曲线图

众所周知，卷积神经网络的参数对于最终分类识别的准确率起着重要的作用。因此，我们需要对参数的选择进行一些分析。首先，我们分析在批大小（Batch Size）和迭代次数变化时，验证集数据的分类准确度。如图 3-7所示，我们可以发现识别准确度随着迭代次数的增加而增长。而当批长度变大时，收敛速度加快。

融合预处理参数设计由于滑窗算法的很重要的一个参数就是窗长，针对于本问题主要考虑到电离层会发生变化，过长的窗长对无法及时的响应电离层的变化，影响识别准确率以及地图匹配精度。为了取得一个合适的窗长，我们首先利用不同窗长平均融合后的数据进行测试，得到图 20 的结果，该结果也证明了在窗长过长时候，准确率会下降的结论，当窗长过大时准确率会降到比窗长为 1 时还要低。图 23 不同窗长识别结果对比图为了进一步比较权重的变化对于识别结果的影响，我们设窗长为，样本的权重为，则有融合后的样本为，当取权重为时，得到下面结果，故根据实验结果，本课题最终选择窗长长度为 3 图 24 更改权重后不同窗长识别结果对比 4.2 目标定位精度修正验证由于缺乏实际的变换相关的航迹信息，故无法对定位精度修正系数进行一个很好的验证。这里我们采用地图变换的过程来进行辅助验证。其基本流程与目标的定位精度修正类

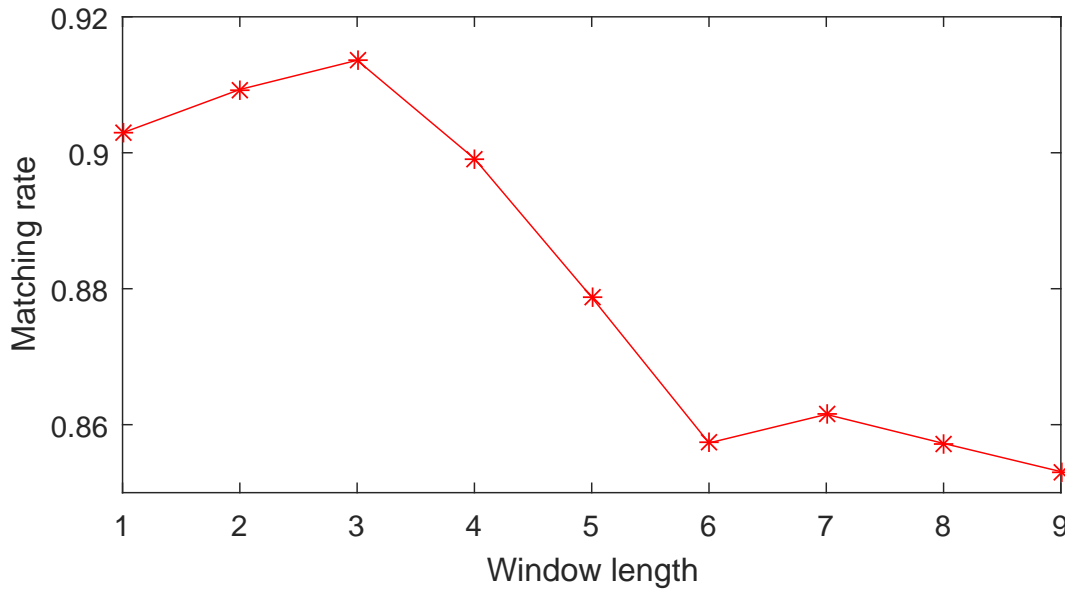


图 3-8 The matching rate against fusion window length.

似。首先将整个匹配地图划分为很多小的匹配区域，然后对于每个匹配区域分别进行修正系数计算。

如前面所描述的，我们利用融合的方法来减少由于某一帧数据中某距离方位单元由于出现的随机噪声对于我们识别结果的影响。图 3-8显示匹配率随着窗口长度的增加首先提高，然后减小。这是因为当窗口过长时，由于天波雷达的采样周期较长，这个期间内，雷达的频谱可能已经出现了一定程度的变化，这回影响最终的识别结果。为了找出区分识别结果中海洋与陆地的最佳阈值，我们使用不同的概率阈值计算相同测试数据的正确率。图 3-9显示，**随着阈值越大，增长速度越慢，速率越快**。另一方面，当阈值仅为 0.01 时，识别率仍高于 0.86。这说明我们的方法的分类结果的概率值均处于较高的水平，如 3-10所示。

### 3.3.4 特征可视化

**该部分需要添加详细的内容**

识别结果的理论分析上面利用大量的测试数据的识别结果以及地图匹配结果对于算法进行了验证，这里我们通过理论分析，验证了算法的合理性。通过计算当输入数据的某个数据点发生变化时输出梯度的变化，得到每一个数据点对于输出梯度的影响，从而得到该频谱数据关注度图。图 3-12中红色圆圈部分表示主要利用的特征所在多普勒频率，可以很直观地看出，对于下图这样的海杂波布拉格峰附近频点的数据被关注比较多，另一方面同时兼顾了其余频点的特征，提高了识别准确率。

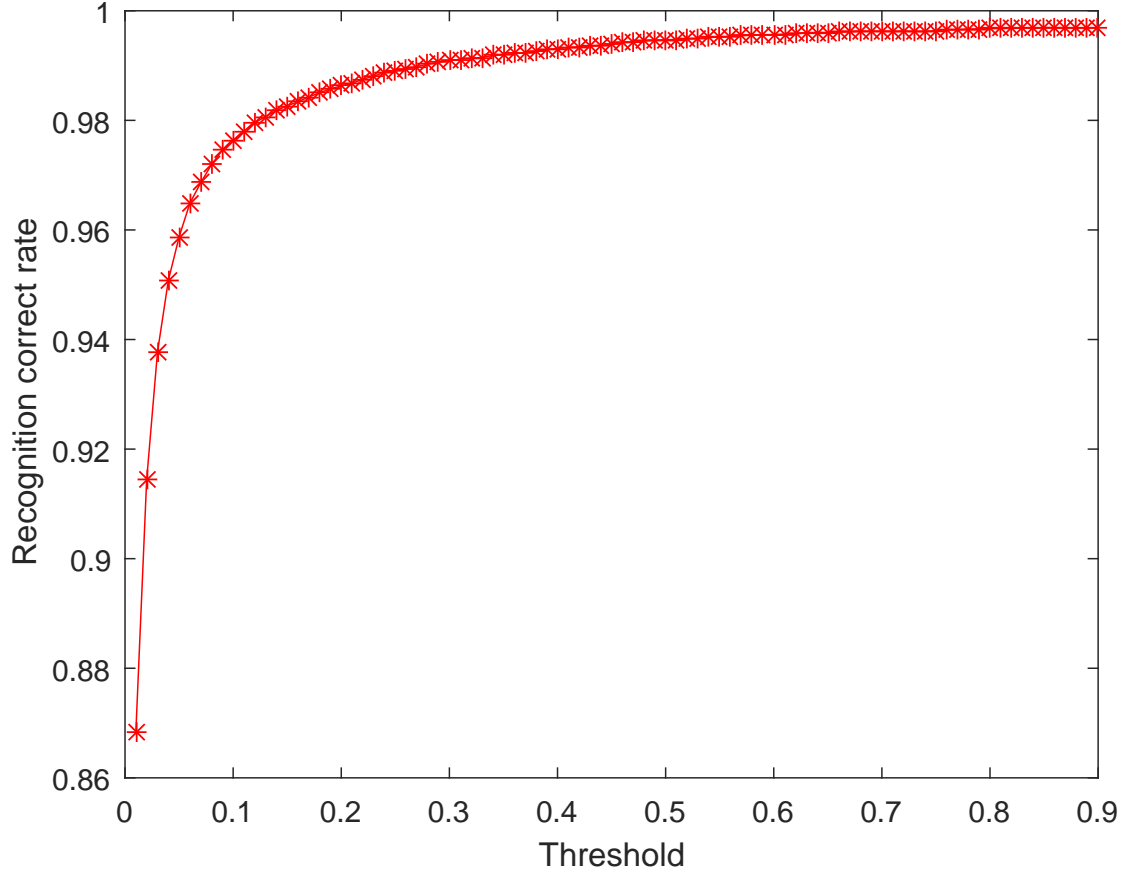


图 3-9 识别率与概率阈值曲线图.

卷积神经网络方法有一个问题是其为一个黑盒操作，我们无法直观地看到其用于分类的特征。因此，为了在理论上对于我们算法的有效性进行分析。在本节中，我们使用基于梯度变化的可视化方法，其思想为利用我们已经训练好的模型展示对于其最终判断测试结果为正或者为负主要利用的频谱特征点。我们定义频谱数据序列为  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ，其中  $n$  是频谱序列中的点数，设输出概率为  $p(S)$ 。那么，我们可以得到式 3-7：

$$p(S) = w^T S + b, \quad (3-7)$$

其中  $w$  和  $b$  分别是我们的模型的权重和偏差。实际上，这里的权重  $w$  表示对应点的重要性。在我们的模型中，类概率函数  $p(S)$  是高度非线性函数，这里使用泰勒方法近似  $p(S)$ 。为了简化计算，我们使用一阶泰勒展开：

$$w = \frac{\partial p}{\partial S} \Big|_{s_i} \quad (3-8)$$

因此，我们以通过反向传播计算得到  $w$  的方程式 3-8 (todo: 详细描述)。图 3-11 显示，特征点主要集中在我们预期的数据上。

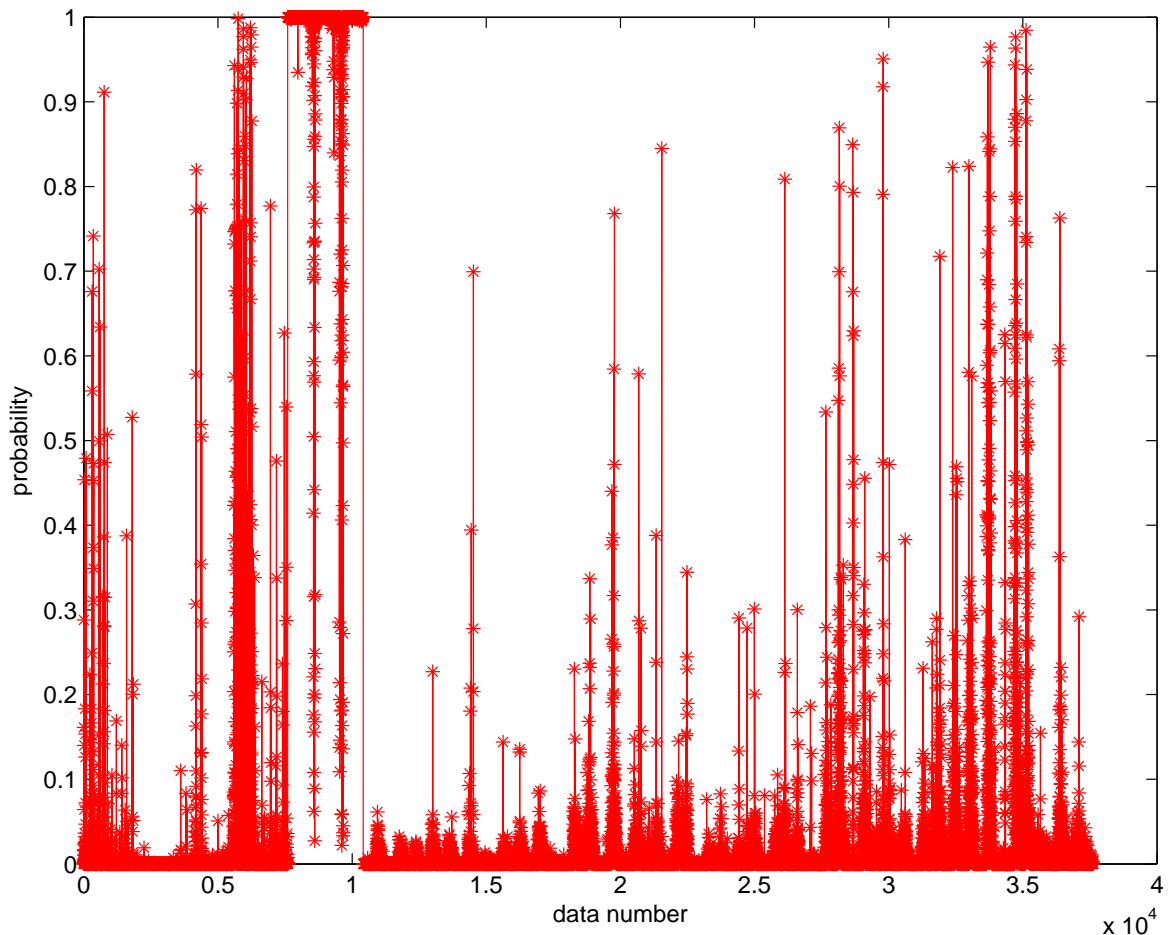


图 3-10 不同帧数据识别结果概率值

### 3.4 小结

在本章中，我们提出了基于卷积神经网络天波雷达地海杂波识别的新算法。其主要克服了传统的阈值识别方法或支持向量机算法根据经验从频谱数据中提取特征，导致操作复杂度高，分类精度低的缺点。同时，我们将我们的算法与传统算法和支持向量机算法进行了对比。实验结果表明，我们的方法在地海杂波识别问题上更加有效以及抗干扰性能更强。在更高精度的识别结果的帮助下，我们可以得到更加精确的修正系数，可以为目标检测和跟踪问题提供非常大的帮助。

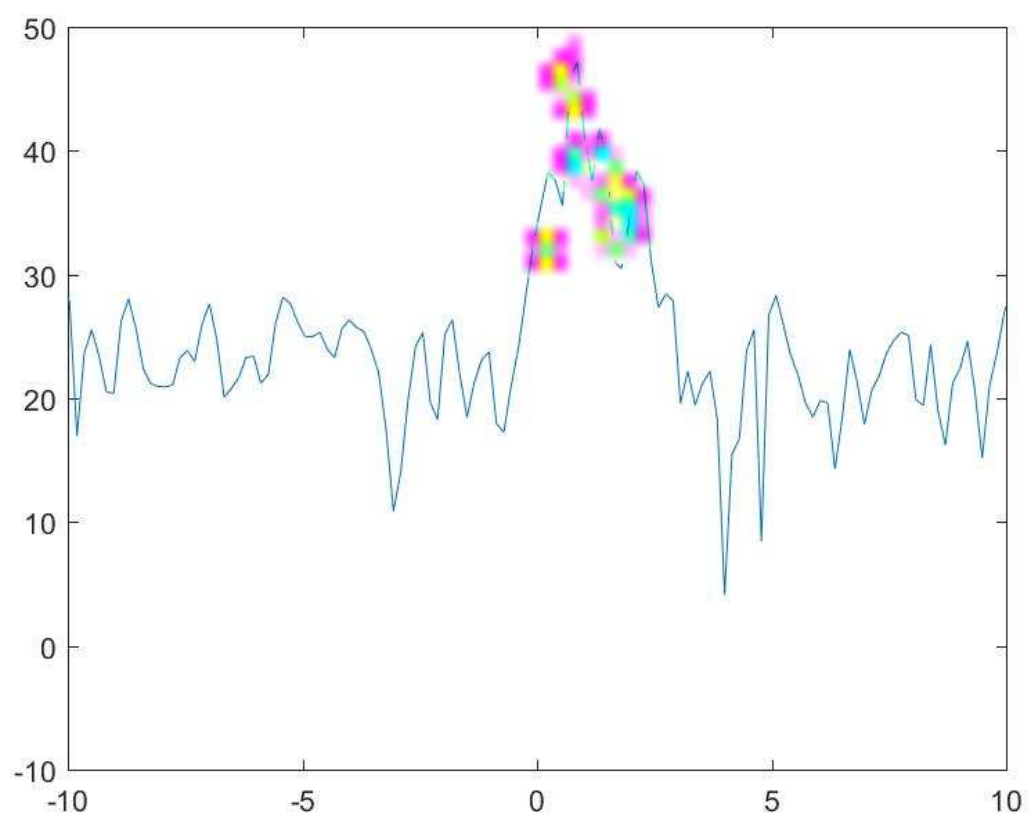


图 3-11 特征重要程度热力图。



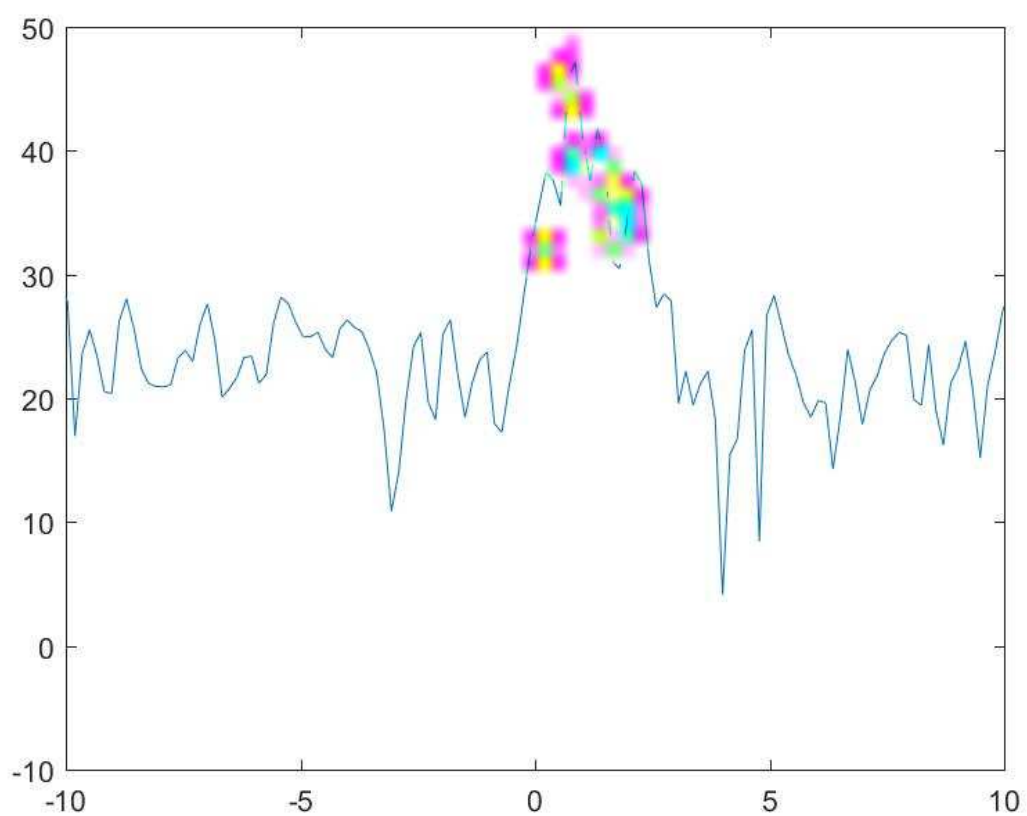


图 3-12 某距离方位单元海杂波频谱数据关注度图。

This Page Intentionally Left Blank!

## 4 基于深度学习的辐射源未知分类识别

### 4.1 引言

在辐射源识别领域，我国在跟踪发达国家研究进展的基础上也开始加紧研发可装备于军方的 SEI 系统，以逐步缩小与发达国家在技术实用方面的差距。但总体来说，我国在该方面的研究还赶不上美英等发达国家，除了缺乏深层次且系统化的理论分析研究外，更缺乏成熟的工程化系统实践和实际装备，因而迫切需要加快在该领域的理论研究和应用步伐。本章综合雷达信号处理、深度学习等多学科理论，重点围绕在复杂电磁环境下不同辐射源的个体识别所面临的识别能力差等问题与挑战，提出合理的雷达脉内细微特征模型，结合深度学习的理论与方法，解决传统辐射源识别方法的局限性，为雷达辐射源识别提供理论支撑于技术指导

Open Set 目标识别系统必须可以准确的处理下面三种类型的数据类：

- 已知的（目标）类，被标记为正训练样本的数据。
- 已知的未知（非目标）类，被标记为负训练样本的数据。
- 未知的未知（非目标）类，在训练样本中不存在的类别的数据。

国内外对于 Open Set 的识别也早有研究，Simonson[86] 提出了一种称作 probabilistic fusion (PF) 的利用统计的方法来进行 Open Set 识别，其主要通过合并来自不同数据源的证据得到一个统计测试模型，根据此模型的分布来对于类别进行判断。Scheirer 等人[87] 提出了一种通过分析后验数据得分来进行类型判断的方法。

详细分析不同辐射源雷达信号的差别，研究不同雷达的信号建模过程以及据此获取雷达信号的基本特征；对雷达有意调制和无意调制这两种脉内调制形式进行建模，综合分析其对应的各种特征（瞬时自相关、相位差分法、模糊函数等）；综合考虑各种脉内细微特征，建立基于深度学习的分类结构；结合大量数据，对结构进行验证和调整；基于实际数据，对算法的各种特性进行验证。

### 4.2 辐射源信号分析

对于辐射源信号的处理，本章主要考虑两方面：信号预处理、特征提取优化。

在信号预处理方面，首先需要剔除无用和错误的数据。然后将信号进行分选，其主要是从随机交叠的脉冲信号流中分离出各个雷达的脉冲信号并选出有用信号。其实质是去交叠、去交错，所利用的是同一部雷达信号参数的相关性和不同雷达信号参数的差异性。

在特征提取优化方面，合理的特征是分类识别的基础。本章通过对雷达信号的各种特征分析，最终选取了雷达模糊函数的切片作为特征。

#### 4.2.1 模糊函数

模糊函数不仅能描述雷达信号的分辨特性和模糊度，还能描述由雷达信号所决定的测量精度和杂波抑制特性等，并根据这种雷达无意调制产生的信号脉内细微特征来进行分类所需的特征。对于信号  $x(t)$ ，其瞬时自相关函数为  $R_x(t, \tau) = x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)$ ，其中  $\tau$  为时延，模糊函数的定义为，

$$A(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(t, \tau) e^{j2\pi\nu t} dt \quad (4-1)$$

即  $R_x(t, \tau)$  关于时间  $t$  的傅里叶反变换。由于在实际中发射机自身存在相位噪声以及各类杂散输出，故可以区分出型号、参数均相同的辐射源，通过模糊函数在时延和频偏这二维上的变换，可以多角度的刻画出无意调制对于发射信号的影响。

为了方便在数字信号中使用，式 4-1 可以经过变换等价于下面的形式：

$$A(\tau, \nu) = \int_0^\tau x(t)x^*(t + \tau)e^{j2\pi\nu t} dt \quad (4-2)$$

对信号均匀采样，即对接收信号和参考信号离散化后，式 4-2 可以表示为：

$$A(\tau_l, \nu_m) = A(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^*(n+l)e^{j\frac{2\pi mn}{N}} \quad (4-3)$$

其中， $\tau_l = l/f_s, \nu_m = mf_s/N$ 。

### 4.3 Open Set 分类器设计

此部分主要解决的问题是当得到一个新的测试样本，如果该样本不属于已经经过训练的分类，那么传统的神经网络模型会将该样本指派给与其最相似的一个类别，此种情况对于一个 Open Set 识别系统，也即类似于辐射源识别系统这种具有较多尚未经过训练的样本的一个数据集，首先这会导致其识别率下降，另一方面是由于对于未知的辐射源无法很好的确定，无法很好的完成预警等任务。国内外学者对于该问题的研究主要分为下面两个思路：

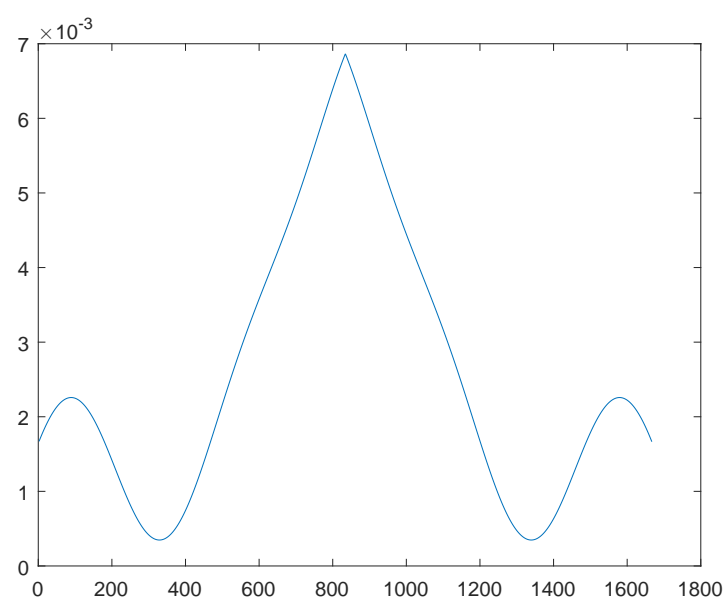


图 4-1 模糊函数切片图

- 在训练集中添加一个“未知”类别，利用不同的来自非已知类别的数据作为训练样本对该类别进行训练，然后对于所有的输入数据进行类别的识别，对于识别结果为该类别的数据作为未知分类。然而该思路最大的问题是我们无法得到所有可能的未知类别的样本来进行训练，具有一定的局限性。
- 针对于多分类使用的 softmax 函数，可以设立阈值或者对于该识别结果进行一个评价（例如与已知类别数据的一个“距离”）等进行分辨出未知的分类。

针对于该问题，我们基于思路 2 的想法设计了一个基于 meta-recognition 的可以识别未知辐射源的深度神经网络。首先是创建一个深度卷积神经网络分类器，该分类器的输出为该训练样本属于各个类别的概率，我们然后将此类别作为一个输入，输入到我们的 meta-recognition 中，这里我们设计一个支持向量机分类器作为 meta-recognition，然后从该 meta-recognition 会进行判断该输入是否为一个未知分类。

用新图，专利或者项目中的

#### 4.3.1 深度卷积神经网络分类器设计

本章根据辐射源信号的实际数据以及其反映出来的特性，构建了基本的具有13层的卷积神经网络，每层具有多个特征向量，每个特征向量具有多个神经元，并且每个特征向量来自于一种卷积核所提取输入的一种特征。主要过程为对于输入的辐射源信号，进行多次的卷积、池化操作，进行再次特征提取，然后通过 BP 网络进行训练。

该分类器作为主要分类器，且 meta-recognition 是以该分类器的输出作为输入，所以该分类器性能的好坏会直接影响到对已知类别的分类和对未知类别的判断。

由于模糊函数作为输入为一个  $1 \times 1000$  的向量，基于此我们设计了一个具有 7 层的一维卷积神经网络。这部分缺少详细描述，但是如何和上一个问题区分开来是一个问题

#### 4.4 SVM meta-recognition 设计

支持向量机是一种流行的分类方法，因为它们可以在不需要大量数据的情况下产生良好的结果。我们可以利用所有的目标数据和未知目标的数据来作为训练样本对该 SVM 分类器进行训练，本部分我们以深度卷积神经网络的输出作为该分类器的输入，利用各类别的概率作为其特征进行训练识别。由于在类别的识别过程中，存在一定的波动性，这个会影响对于是否属于未知类别的分类判断，我们这里选取对于来自同一个辐射源的连续 10 拍的识别结果进行一个平均作为最终的输入。

下面是对于 SVM 分类器的设计，首先是核函数的选择。核函数将输入空间映射到

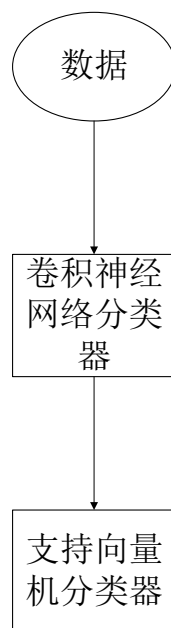


图 4-2 分类器设计结构图

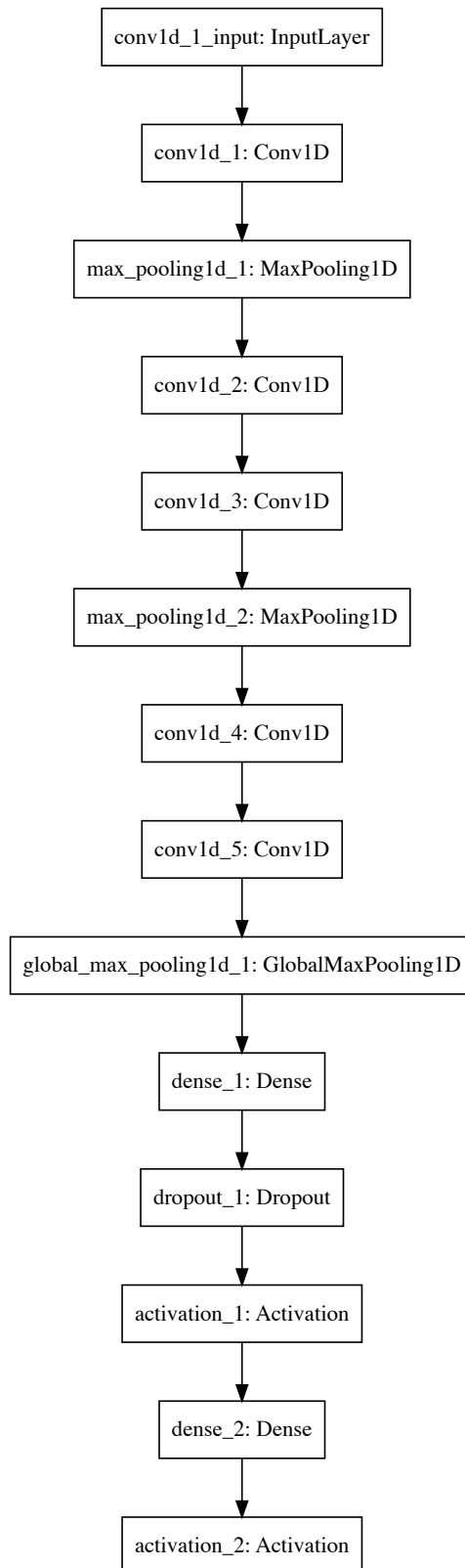


图 4-3 深度卷积神经网络框架图



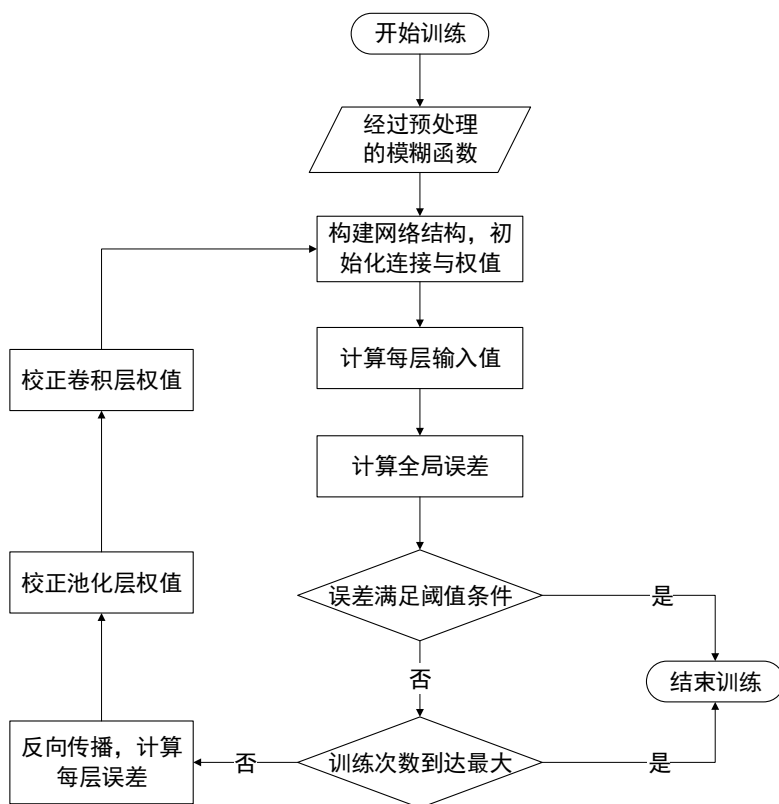


图 4-4 深度卷积神经网络算法流程图

高维特征空间，最终在高维特征空间中构造出最优分离超平面，从而把平面上本身不好分的非线性数据分开。常用的核函数为线性核函数和高斯核函数。对于核函数的选择，一般分为三种情况：

- 特征的数量很大，跟样本数量差不多，这时候选用 LR 或者是线性核的 SVM
- 特征的数量比较小，样本数量一般，不算大也不算小，选用高斯核函数
- 特征的数量比较小，而样本数量很多，需要手工添加一些特征变成第一种情况

由于我们的问题符合情况 2，故选择高斯核函数。

支持向量机具有两个关键参数，惩罚参数  $C$  的和核参数  $\sigma$ ，这两个参数的取值在很大程度上决定了 SVM 的性能的优劣。核函数的参数主要影响样本数据在高维特征空间中分布的复杂程度，即维数。特征子空间的维数越高，那么得到的最优分类超平面就会越复杂。反之亦然。因此只有选择合适的核参数得到合适的特征子空间，才能得到推广能力良好的 SVM 分类器。本章中用到的是高斯核参数。大量的实验数据表明，如果与样本点之间的距离很小， $\sigma \rightarrow 0$ ；如果与样本点之间的距离很大时， $\sigma \rightarrow \infty$ ；当  $\sigma$  很小，高斯核函数支持向量机得到的判别函数差不多是一个常数，出现过拟合现象。当  $\sigma$  很大时，样本的正确分类率也会比较低。

惩罚参数是影响 SVM 算法性能的另一个重要因素。它的作用主要是调节特征子空间中 SVM 模型的置信范围与经验风险的比例，使支持向量机的泛化能力达到最好。特征子空间不同时，最优参数值取值也会不同。惩罚参数与经验误差的惩罚和 SVM 的复杂度成正比，与经验风险值成反比，反之亦然。因此，选择合适的惩罚参数也是非常重要的。

从上面的分析可以看出，核参数影响着映射函数、进而影响样本子空间的复杂度。最后会影响分类机性能的好坏。惩罚参数作用是在数据子空间中调节学习机器自信区间的范围。这些都说明了惩罚参数和核参数的选择非常重要。

## 4.5 仿真实验与分析

### 4.5.1 实验环境

由于我们原始获得的数据为 IQ 两路数据，为了更好的捕捉到回波的特征信息，我们对数据进行了一个变换，求取其模糊函数，并做偏移为 0 附近的一个切片。由于深度学习需要大量的数据进行训练学习，而本身数据量偏少，故我们在已有数据的基础上在一定信噪比的前提下，生成部分仿真数据。

对于数据的选择方面，我们从数据中选择出 2 至 8 个类别分别进行实验，对于每一个类别，我们均选择大约 10000 组数据，其中 70% 作为训练样本，20% 作为交叉验证样本，10% 作为测试样本，同时在测试样本中又添加了与已知分类等数量的未知分类的数据进行测试。由于该变换后，数据之间的差距比较大，我们对数据进行了归一化。我们采用的归一化方法为 min-max 标准化 (Min-Max Normalization)，也称为离差标准化，是对原始数据的线性变换，使结果值映射到 [0, 1] 之间。转换函数如下：

$$x^* = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4-4)$$

其中  $x_{max}$  为样本数据的最大值， $x_{min}$  为样本数据的最小值。

我们采用网格搜索法对 SVM 参数进行调优，最终选择参数惩罚参数为 32，核参数  $\sigma$  为 0.0312。

#### 4.5.2 实验结果分析

在上述样本的情形下，我们通过选取不同的类别数目，进行训练和测试得到下表的识别结果。从表中数据我们可以看出，随着样本类别数的增加，对于未知分类的识别准确率也随之有了大幅度的增加，而另一方面随着类别的增加，对于每个类别的识别准确率有一定的降低，但是仍然维持在比较高的水平。

### 4.6 小结

本章针对复杂电磁环境下辐射源的识别面临的电磁信号干扰大、雷达信号参数相近等问题与挑战，利用深度学习的思想与方法，深入研究辐射源脉内细微特征，设计合适的神经网络结构，并基于实际机载气象雷达数据进行初步验证。主要特色与创新点如下：

(1) 利用深度学习方法进行辐射源识别前沿。通过对现有辐射源信号进行分析，利用其脉内细微特征作为训练样本，使得识别准确率有了较大的进步。虽然已有研究利用神经网络、支持向量机等机器学习算法进行识别，但是仍然需要基于雷达信号的基本参数，没有考虑信号的内部特征参数。

(2) 本章采用方法具有较强的抗噪声、抗干扰能力。传统方法进行辐射源个体识别前均需进行降噪、多径抑制和分选等复杂的信号预处理工作，这些操作会在一定程度上削弱雷达的个体特征。深度学习方法可以通过大量的样本，智能地判断各特征的权重，通过赋予不同的权重在保留雷达个体特征的情况下，避免干扰的影响。由此可见，本章所运用的方法具有较好的鲁棒性。

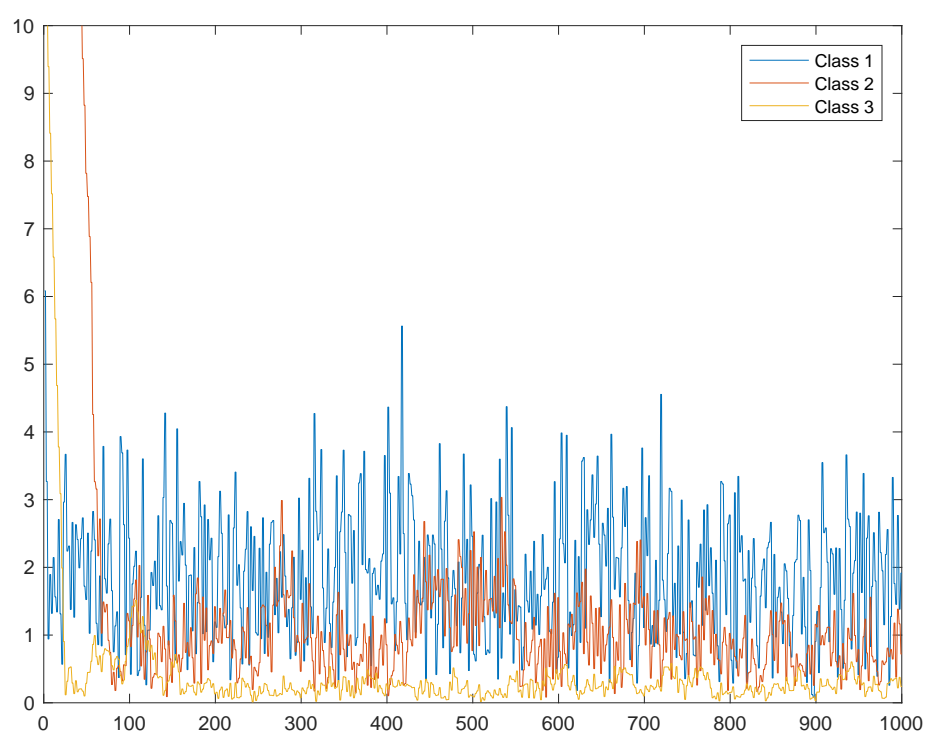


图 4-5 不同类别样本特征图

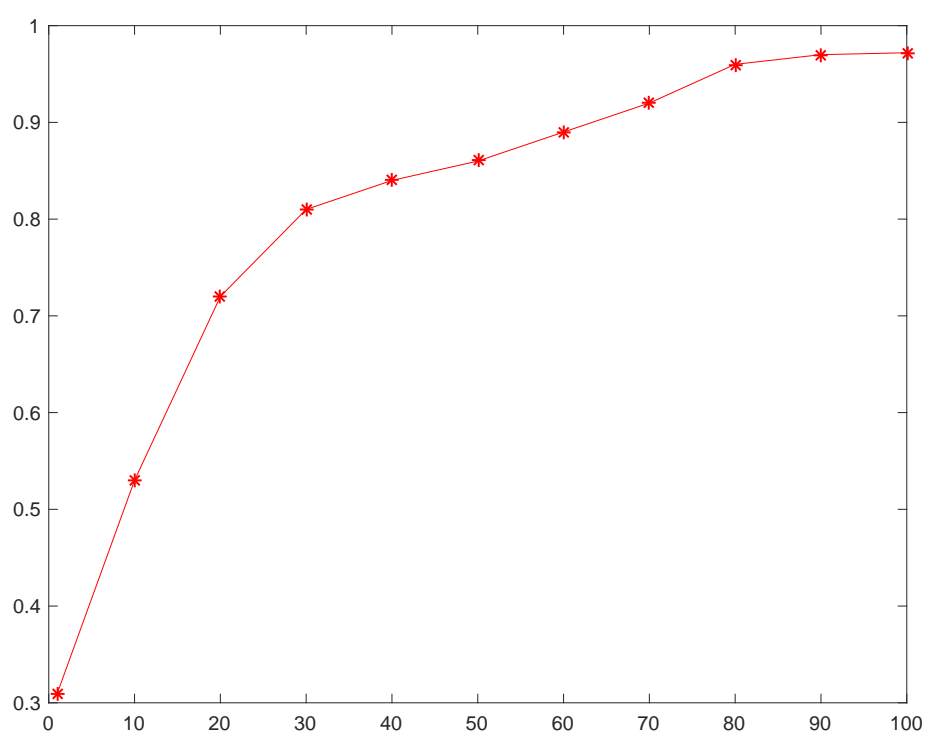


图 4-6 迭代次数与识别准确率曲线图

This Page Intentionally Left Blank!

## 5 总结

### 5.1 本文的主要贡献

雷达信号处理一直是雷达领域一个很重要的方面，通过对接受到的信号的处理分析，从而获得更多的信息。在电子科技迅猛发展的今天，电磁环境急剧变化，雷达信号处理在军事侦查，目标识别，电子对抗等领域有着广阔的应用场景。而深度学习方法由于其在识别分类等领域的结果，引起了国内外越来越多学者的重视。本文对于雷达信号处理中的两个方面进行了研究，通过对雷达信号数据的分析，构建了一个合理的卷积神经网络模型，实现了对于雷达信号类别的识别。同时，针对于雷达中存在未知类别的情况，构建了一个支持向量机分类器作二次识别，实现了未知分类的辨别。本文的主要研究成果和最终的结论如下：

本文首先综述了深度学习的研究现状和发展，以及其与传统神经网络方法相比的优点所在。描述了深度学习的几种常用方法和基本结构，研究了深度卷积神经网络的原理和其训练过程。

针对于天波超视距雷达中由于电离层的变化无法确定其 PD 变换系数的问题，本文通过地海杂波识别进行地理位置匹配来获取该变换系数，用于提高目标定位精度。在地海杂波识别过程中，通过对于海量频谱数据的分析，构建了一个一维卷积神经网络分类器。同时将该算法的识别结果与传统的基于信号频谱分析和支持向量机算法进行对比，证明了本文算法的优越性。

对于辐射源识别中未知分类的辨别问题，首先概述了辐射源识别中雷达信号处理的过程，介绍了辐射源特征提取和辐射源识别的常用方法及存在的问题。本文将深度学习和支持向量机相结合，构建了用于辐射源分类及未知分类辨别的模型，通过实际数据进行实验验证，并对不同辐射源类别数、卷积神经网络层数、节点数、不同支持向量机参数与正确率进行了比较，讨论了相关参数对结果的影响。

### 5.2 后续的研究进展

在本文中，我们已经利用实际数据进行测试并验证了我们的深度学习方法在地海杂波识别方法和辐射源识别这两个方面的有效性。但是由于雷达数据处理方面信号种类多，在实际工程中涉及环节多，因此，对于利用深度学习进行雷达信号处理还有很多工

作需要完成。结合本文所研究的问题，我们希望未来可以在以下方面做进一步研究：

- 针对于雷达信号特征，对本文算法进一步调整。在天波雷达地海杂波识别中，我们现在把已有数据分成几组，分别进行训练。我们计划尝试使用一些方法对这些数据进行融合分析，以获得一个可以适应各种数据情况的模型。对于辐射源识别，利用更多的数据对算法进行进一步的验证，目前类别较少的情况下，部分结果会对选择的类别具有一定的依赖性，另一方面是选取更多更合适的特征进行训练学习。
- 进一步优化算法，提高计算效率。虽然在数据量比较大的情况下，深度学习算法具有准确率高的优势，但训练过程计算量较大。本文拟将深度学习方法同其他方法进行结合，进一步完善网络结构，减少计算量、提高训练速度。
- 进一步优化网络结构、相关参数的选取、训练方法等。深度学习的理论研究仍然存在一些不足，可以通过进一步的理论研究，选择更加优秀的参数和训练方法。除了本文的卷积神经网络结构之外，我们计划尝试其他深度学习的方法或者思想来解决我们的问题或者构建更优的神经网络结构。
- 对数据进行无监督或者半监督学习的方式进行训练。由于雷达信号量大，人为进行标记困难较大，本文计划进一步尝试无监督等减少人为标记的工作量。



## 参考文献

- [1] 顾耀平. 电子战发展趋势分析 [J]. 航天电子对抗. 2006, 22(2):24–27.
- [2] 孙德海. 国外电子战发展综述及对我国电子战研究的思考 [J]. 舰船电子对抗. 2003, 26(1):1–6.
- [3] 炜森, 桑, 耀平. 综合电子战新技术新方法 [M]. 国防工业出版社. 1996.
- [4] 孙纪尧. “电子战”的维度识别性研究 [D]. 哈尔滨工业大学. 2014.
- [5] Headrick JM, Skolnik MI. Over-the-horizon radar in the HF band[J]. Proceedings of the IEEE. 1974, 62(6):664–673.
- [6] Fabrizio G. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications[M]. New York, USA: McGraw Hill Professional. 2013.
- [7] Krolik JL, Anderson RH. Maximum likelihood coordinate registration for over-the-horizon radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing. 1997, 45(4):945–959.
- [8] Wheadon N et al. Ionospheric modelling and target coordinate registration for HF sky-wave radars[C]. In Proceedings of the Sixth International Conference on HF Radio Systems and Techniques. IET1994:258–266.
- [9] Weijers B, Choi DS. OTH-B coordinate registration experiment using an HF beacon[C]. In Proceedings of the 1995 IEEE International Radar Conference. IEEE1995:49–52.
- [10] Barnum JR, Simpson EE. Over-the-horizon radar target registration improvement by terrain feature localization[J]. Radio Science. 1998, 33(4):1077–1093.
- [11] Cuccoli F et al. Over the horizon sky-wave radar: Coordinate registration by sea-land transitions identification[C]. In Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Moscow, Russia2009.

- 
- [12] Cuccoli F et al. Over the horizon sky-wave radar: simulation tool for coordinate registration method based on sea-land transitions identification[C]. In Proceedings of 2009 European Radar Conference. IEEE2009:208–211.
- [13] Cuccoli F et al. Sea-Land transitions identification for coordinate registration of over the horizon sky-wave radar: numerical model for performance analysis[C]. In Proceedings of 2010 11th International Radar Symposium. IEEE2010:1–4.
- [14] Cuccoli F, Facheris L, Sermi F. Coordinate registration method based on sea/land transitions identification for over-the-horizon sky-wave radar: Numerical model and basic performance requirements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011, 47(4):2974–2985.
- [15] Cacciamano A et al. A coordinate registration technique for OTH sky-wave radars based on 3D ray-tracing and sea-land transitions[C]. In PIERS Proceedings. Kuala Lumpur, Malaysia2012:146–150.
- [16] Fabrizio G et al. Using emitters of opportunity to enhance track geo-registration in HF over-the-horizon radar[C]. In Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference. IEEE2016:1–5.
- [17] Holdsworth DA. Skywave over-the-horizon radar track registration using earth surface and infrastructure backscatter[C]. In Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE. IEEE2017:0986–0991.
- [18] Matuszewski J. Specific emitter identification[C]. In Radar Symposium, 2008 International. IEEE2008:1–4.
- [19] Therrien C et al. Application of feature extraction to radar signature classification[C]. In Proc. 2nd Int. Joint Conf. Pattern Recognition. 1974.
- [20] 徐欣, 周一宇, 卢启中. 雷达截获系统实时信号分选处理技术研究 [J]. 系统工程与电子技术. 2001, 23(3):12–15.
- [21] Roe J, Pudner A. The real-time implementation of emitter identification for ESM[C]. In Signal Processing in Electronic Warfare, IEE Colloquium on. IET1994:7–1.
- [22] Jouny I, Garber E, Moses R. Radar target identification using the bispectrum: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1995, 31(1):69–77.

- 
- [23] Zhang XD, Shi Y, Bao Z. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing. 2001, 49(9):1875–1885.
- [24] Melvin WL, Guerci JR. Knowledge-aided signal processing: a new paradigm for radar and other advanced sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 200642(3).
- [25] Roe J, Cussons S, Feltham A. Knowledge-based signal processing for radar ESM systems[C]. In IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing). IETvol. 1371990:293–301.
- [26] Capraro GT et al. Knowledge-based radar signal and data processing: a tutorial review[J]. IEEE Signal Processing Magazine. 2006, 23(1):18–29.
- [27] Rose CM. Emitter frequency-time measurement by a moving observer using no navigation input1996 Jul. 9. US Patent 5,534,866.
- [28] Chen VC, Ling H. Joint time-frequency analysis for radar signal and image processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine. 1999, 16(2):81–93.
- [29] Li L, Ji HB, Jiang L. Quadratic time–frequency analysis and sequential recognition for specific emitter identification[J]. IET signal processing. 2011, 5(6):568–574.
- [30] Moraitakis I, Fargues MP. Feature extraction of intra-pulse modulated signals using time-frequency analysis[C]. In MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings. IEEEvol. 22000:737–741.
- [31] Cohen A et al. On the importance of combining wavelet-based nonlinear approximation with coding strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory. 2002, 48(7):1895–1921.
- [32] Zhou Y, Lee JP. Combining clustering techniques and information theoretic criteria based approach for emitter number detection in ESM applications[C]. In Signals, Systems, and Computers, 1999. Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on. IEEEvol. 11999:474–478.
- [33] Kawalec A, Owczarek R. Radar emitter recognition using intrapulse data[C]. In Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004. MIKON-2004. 15th International Conference on. IEEEvol. 22004:435–438.

- [34] Aubry A et al. Cumulants-based radar specific emitter identification[C]. In Information Forensics and Security (WIFS), 2011 IEEE International Workshop on. IEEE2011:1–6.
- [35] Dudczyk J, Kawalec A. Identification of emitter sources in the aspect of their fractal features[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2013, 61(3):623–628.
- [36] Zhang G, Jin W, Hu L. Fractal feature extraction of radar emitter signals[C]. In Environmental Electromagnetics, 2003. CEEM 2003. Proceedings. Asia-Pacific Conference on. IEEE2003:161–164.
- [37] Dudczyk J, Kawalec A. Fractal features of specific emitter identification[J]. Acta Physica Polonica A. 2013, 124(3):406–409.
- [38] 毕太平, 董晖, 姜秋喜. 基于瞬时频率的脉内调制识别技术 [J]. 电子对抗技术. 2005, 20(2):6–9.
- [39] 张葛祥, 荣海娜, 金炜东. 基于小波包变换和特征选择的雷达辐射源信号识别 [J]. 电路與系統學報. 2006, 11(6):45–49.
- [40] 张葛祥, 金炜东, 胡来招. 基于相像系数的雷达辐射源信号特征选择 [J]. 信号处理. 2005, 21(6):663–667.
- [41] 张葛祥, 胡来招, 金炜东. 基于熵特征的雷达辐射源信号识别 [J]. 电波科学学报. 2005, 20(4):440–445.
- [42] 张葛祥, 金炜东, 胡来招. 基于粗集理论的雷达辐射源信号识别 [J]. 西安交通大学学报. 2005, 39(8):871–875.
- [43] 张葛祥. 雷达辐射源信号智能识别方法研究 [J]. 成都: 西南交通大学. 2005.
- [44] 张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号分形特征研究 [J]. 现代通信理论与信号处理进展——2003 年通信理论与信号处理年会论文集. 2003.
- [45] 张葛祥, 胡来招, 金炜东. 雷达辐射源信号脉内特征分析 [J]. 红外与毫米波学报. 2004, 23(6):477–480.
- [46] 朱明, 金炜东, 胡来招. 基于原子分解的辐射源信号二次特征提取 [J]. 西南交通大学学报. 2007, 42(6):659–664.

- [47] 朱明 et al. 一种基于 Spectrum 原子的雷达辐射源信号识别方法 [J]. 电子与信息学报. 2009, 31(1):188–191.
- [48] 普运伟, 金炜东, 胡来招. 雷达辐射源信号瞬时频率派生特征分类方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报. 2009, 41(1):136–140.
- [49] 普运伟 et al. 雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法 [J]. 红外与毫米波学报. 2008, 27(2):133–137.
- [50] 陈韬伟, 金炜东. 雷达辐射源信号符号化脉内特征提取方法 [J]. 數據採集與處理. 2008, 23(5):521–526.
- [51] 陈韬伟, 金炜东, 李杰. 基于围线积分双谱的雷达辐射源信号个体特征提取 [J]. 计算机工程与应用. 2013, (8):209–212.
- [52] 余志斌, 金炜东, 张葛祥. 基于局域波分解的雷达辐射源信号时频分析 [J]. 计算机应用研究. 2008, 25(10):3142–3144.
- [53] 余志斌, 陈春霞, 金炜东. 一种新的 Morlet 小波及其在雷达信号特征提取中的应用研究 [J]. 電路與系統學報. 2010, 15(1):129–134.
- [54] 余志斌, 金炜东, 陈春霞. 基于小波脊频级联特征的雷达辐射源信号识别 [J]. 西南交通大学学报. 2010, 45(2):290–295.
- [55] Dudczyk J, Kawalec A. Fast-decision identification algorithm of emission source pattern in database[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2015, 63(2):385–389.
- [56] Dudczyk J. Applying the radiated emission to the radioelectronic devices identification[D]. Dissertation Thesis. 2004.
- [57] Jouny I, Garber F, Ahalt S. Classification of radar targets using synthetic neural networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1993, 29(2):336–344.
- [58] Petrov N, Jordanov I, Roe J. Identification of radar signals using neural network classifier with low-discrepancy optimisation[C]. In Evolutionary Computation (CEC), 2013 IEEE Congress on. IEEE2013:2658–2664.
- [59] Shieh CS, Lin CT. A vector neural network for emitter identification[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2002, 50(8):1120–1127.

- [60] Willson GB. Radar classification using a neural network[C]. In Applications of Artificial Neural Networks. International Society for Optics and Photonicsvol. 12941990:200–211.
- [61] Ren M et al. Radar emitter signal classification based on mutual information and fuzzy support vector machines[C]. In Signal Processing, 2008. ICSP 2008. 9th International Conference on. IEEE2008:1641–1646.
- [62] Mika S et al. Fisher discriminant analysis with kernels[C]. In Neural Networks for Signal Processing IX, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE Signal Processing Society Workshop. IEEE1999:41–48.
- [63] Cover T, Hart P. Nearest neighbor pattern classification[J]. IEEE transactions on information theory. 1967, 13(1):21–27.
- [64] Quinlan JR et al. Bagging, boosting, and C4. 5[C]. In AAAI/IAAI, Vol. 1. 1996:725–730.
- [65] Lyden D et al. Id1 and Id3 are required for neurogenesis, angiogenesis and vascularization of tumour xenografts[J]. Nature. 1999, 401(6754):670–677.
- [66] Hebb DO. The organization of behavior: A neuropsychological theory[M]. Psychology Press. 2005.
- [67] Fukushima K, Miyake S. Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of visual pattern recognition[C]. In Competition and cooperation in neural netsSpringer. 1982, :267–285.
- [68] LeCun Y et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE. 1998, 86(11):2278–2324.
- [69] LeCun Y et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition[J]. Neural computation. 1989, 1(4):541–551.
- [70] Simard PY et al. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis.[C]. In ICDAR. Citeseervol. 32003:958–962.
- [71] Hinton GE, Salakhutdinov RR. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. science. 2006, 313(5786):504–507.

- 
- [72] Hinton GE, Osindero S, Teh YW. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural computation. 2006, 18(7):1527–1554.
- [73] Hinton G et al. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups[J]. Signal Processing Magazine, IEEE. 2012, 29(6):82–97.
- [74] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]. In Advances in neural information processing systems. 2012:1097–1105.
- [75] Collobert R et al. Natural language processing (almost) from scratch[J]. Journal of Machine Learning Research. 2011, 12(Aug):2493–2537.
- [76] Silver D et al. Mastering the game of go without human knowledge[J]. Nature. 2017, 550(7676):354–359.
- [77] Ciresan DC et al. Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification[C]. In Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2011.
- [78] Jouppi NP et al. In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit[J]. arXiv preprint arXiv:1704.04760. 2017.
- [79] Chen S, Wang H. SAR target recognition based on deep learning[C]. In Data Science and Advanced Analytics (DSAA), 2014 International Conference on. IEEE2014:541–547.
- [80] Xie H et al. Multilayer feature learning for polarimetric synthetic radar data classification[C]. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. IEEE2014:2818–2821.
- [81] Lv Q et al. Classification of land cover based on deep belief networks using polarimetric RADARSAT-2 data[C]. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. IEEE2014:4679–4682.
- [82] Zhang Y et al. A novel multi-target track initiation method based on convolution neural network[C]. In Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP), 2017 International Workshop on. IEEE2017:1–5.

- [83] Jin ZL et al. SVM Based Land/Sea Clutter Classification Algorithm[C]. In Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publvol. 2362012:1156–1162.
- [84] Li T et al. High-frequency radar aircraft detection method based on neural networks and time-frequency algorithm[J]. IET Radar, Sonar & Navigation. 2013, 7(8):875–880.
- [85] Behnke S. Hierarchical neural networks for image interpretation[M]vol. 2766. Springer Science & Business Media. 2003.
- [86] Simonson K. Probabilistic fusion of ATR results[R]. Tech. rep.Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM1998.
- [87] Scheirer WJ et al. Meta-recognition: The theory and practice of recognition score analysis[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2011, 33(8):1689–1695.



## 附录

附录

This Page Intentionally Left Blank!

## 致谢

感谢 XXX...

This Page Intentionally Left Blank!

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况

dasfkjaslfk

This Page Intentionally Left Blank!

## 西北工业大学

### 学位论文知识产权声明书

本人完全了解学校有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于西北工业大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版。本人允许论文被查阅和借阅。学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律注明作者单位为西北工业大学。

保密论文待解密后适用本声明。

学位论文作者签名：\_\_\_\_\_

年 月 日

指导教师签名：\_\_\_\_\_

年 月 日

-----

## 西北工业大学

### 学位论文原创性声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容和致谢的地方外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表或撰写过的研究成果，不包含本人或其他已申请学位或其他用途使用过的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式表明。

本人学位论文与资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

学位论文作者签名：\_\_\_\_\_

年 月 日