

学校代码	10699
分 类 号	TP27
密 级	
学 号	2015201518

题目 基于深度学习的雷达信
号分类算法研究

作者 张治山

学 科 专 业 控制理论与控制工程

指 导 教 师 潘泉

申请学位日期 2018 年 1 月

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分
类算法研究

作者：张治山

学科专业：控制理论与控制工程

指导教师：潘泉

2018 年 1 月

**Title: A Research on Radar Signal Classification using
Deep Learning Based Techniques**

**By
Zhang Zhishan**

**Under the Supervision of Professor
Pan Quan**

A Dissertation Submitted to
Northwestern Polytechnical University

In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Control Theory and Control Engineering

Xi'an P. R. China
January 2018

摘要

本文以雷达信号分类识别为主要应用背景，利用深度学习的思想与方法，重点研究了天波超视距雷达地海杂波识别和雷达辐射源识别这两个实际工程问题，具体工作如下：

1) 利用天波超视距雷达地海杂波识别结果可以实时准确获得天波雷达的坐标配准修正系数，进而有效提高目标定位精度。本文在对地海杂波频谱实际数据深入分析的基础上，对原始频谱数据首先进行清洗、裁剪、融合等预处理步骤，然后构建了一个具有六层的深度卷积神经网络分类器并利用具有自适应学习率的算法训练学习，同时结合地海杂波这一实际工程问题调整分类阈值，最后对输出结果以分类精度和与实际地图的匹配精度两个层面衡量。实验结果表明，基于深度卷积神经网络的地海杂波识别算法在电离层环境较差的情况下仍具有较高的识别精度。

2) 为了克服标注大量数据成本过高及部分数据难以人工准确标注的问题，本文进一步提出了基于深度嵌入卷积的地海杂波聚类方法。通过在地海杂波数据中包含空间、时间信息，添加卷积层、卷积转置层和全连接层，设计了一个以端到端方式训练的卷积自编码器来从未标注的数据中学习特征，并将 KL 散度与重构损失两部分结合设计了一个新的损失函数。利用天波超视距雷达的实际地海杂波数据的实验结果表明了深度嵌入卷积聚类算法的有效性。

3) 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、雷达信号参数相近及工程中存在未知类别的辐射源等问题与挑战，本文提出了基于深度学习的辐射源个体识别算法。通过对现有辐射源信号的分析，使用其模糊函数切片这一脉内细微特征作为训练样本，构建了一个具有 10 层的一维卷积神经网络作为主分类器来对输入信号做初次分类，其后跟随一个支持向量机分类器作为 Meta-Recognition，实现对辐射源中未知类别的辨别。通过多架飞机的气象雷达辐射源的实际数据证明了本文算法分类的准确性。

关键字： 雷达信号分类, 天波雷达地海杂波识别, 雷达辐射源分类, 深度学习, 卷积神经网络

Abstract

Under the background of radar signal classification, this paper focuses on sea/land clutter recognition for Over-the-Horizon Radar(OTHR) and specific emitter identification using deep learning methodology, as follows:

1) The results of OTHR sea/land clutter recognition can be used for coordinate registration, which can help improve the target positioning accuracy effectively. Based on the analysis of sea/land clutter spectrum data, a six-layer deep convolution neural network classifier is constructed. The original spectrum data is preprocessed by cleansing, trimming, and fusion. Adaptive Moment Estimation method is used to train the network, which can give a stable learning rate. As a real-world project, the classification threshold is adjusted according to the features of clutter. The results are evaluated by the classification accuracy and the matching accuracy with actual map. Experimental results show that the clutter recognition algorithm based on deep convolution neural network still has high recognition accuracy under poor ionospheric environment.

2) In order to overcome the high cost of labeling large amounts of data and the difficult to label some data accurately manually, this paper further proposed a deep embedded convolution method for sea/land clutter clustering. Spatial locations and time sequences information is added to original clutter spectrum data. The network contains convolutional layer, deconvolutional layer and fully connected layer. A convolutional autoencoders structure is developed to learn embedded features in an end-to-end way. The experimental results show the effectiveness of deep embedded convolution clustering method.

3) In order to solve the problems of recognizing emitters in similar radar signal parameters and the existence of unknown types emitter in complex electromagnetic environment, this paper proposed a specific emitter identification method based on deep learning. By analyzing the signal of the specific emitters and using the ambiguity function slice as feature vectors, a 10-layer one-dimensional convolution neural network is constructed as the primary classifier to classify the input signals firstly. Unknown types of specific emitters are identified by a support vector machine classifier as Meta-Recognition. The

classification accuracy of the algorithm proposed in this paper is high in the experiments of meteorological radars from multiple aircraft.

Keywords : Radar Signal Classification, Sea/Land Clutter Recognition for Over-The-Horizon Radar, Specific Emitter Identification, Deep Learning, Convolutional Neural Networks

目录

摘要	I
Abstract	III
目录	VII
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状	1
1.2.1 天波超视距雷达地海杂波识别研究现状	1
1.2.2 辐射源个体识别研究现状	5
1.2.3 深度学习研究现状	7
1.3 论文研究内容及结构	8
2 深度卷积神经网络	11
2.1 引言	11
2.2 基本分类	11
2.3 传统人工神经网络结构	12
2.4 深度卷积神经网络	15
2.4.1 卷积	15
2.4.2 共享权重和偏置	17
2.4.3 池化	17
2.4.4 激活函数	18
2.4.5 神经网络的学习算法	20
2.5 小结	21
3 基于深度学习的天波超视距雷达地海杂波识别	23
3.1 引言	23
3.2 地海杂波频谱数据分析	24
3.2.1 数据集分组	25
3.3 地海杂波识别算法	26
3.3.1 数据预处理	27
3.3.2 分类算法设计	29

3.3.3 分类阈值设计	33
3.4 仿真验证	33
3.4.1 算法实现	33
3.4.2 仿真结果分析	34
3.4.3 特征可视化	38
3.5 小结	39
4 基于深度嵌入卷积聚类方法的地海杂波无监督分类	41
4.1 引言	41
4.2 卷积自编码网络	41
4.2.1 自编码器	41
4.2.2 卷积自编码器	42
4.3 深度嵌入卷积聚类方法	44
4.3.1 深度嵌入卷积聚类方法结构	44
4.3.2 KL 散度聚类方法	45
4.3.3 学习算法	46
4.4 仿真验证	48
4.5 小结	50
5 基于深度学习的辐射源识别	51
5.1 引言	51
5.2 辐射源信号分析	51
5.2.1 模糊函数	52
5.3 Open Set 分类器设计	53
5.3.1 深度卷积神经网络分类器设计	54
5.3.2 支持向量机 Meta-Recognition 设计	55
5.4 仿真实验与分析	59
5.4.1 实验环境	59
5.4.2 实验结果分析	60
5.5 小结	63
6 总结	65
6.1 本文的主要贡献	65
6.2 后续的研究进展	66

参考文献	67
致谢	77
攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况	79

1 绪论

1.1 研究背景及意义

在现代电子战信息获取和处理技术中，雷达信号识别分类是一个十分重要的方面。它主要指的是利用雷达、声波探测等各种主动、被动传感器获取信号，基于此感知识别周围环境信息并检测识别出感兴趣的目标。

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，从而受到越来越多国家的关注。但是由于量测与目标状态所在坐标系的不统一以及无法实时获得准确的坐标配准系数，导致天波超视距雷达的目标定位精度较差。通过地海杂波识别技术获得地理轮廓与实际地理位置进行匹配，可以快速准确地进行坐标配准系数的辨识，进而提高目标的定位精度。

雷达辐射源识别的主要目的是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及威胁等级，为战略情报分析提供信息^[1]。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，以提供更加全面精确的电磁斗争态势，从而进行有效的战场指挥与决策。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，辐射源的精确识别面临越来越严峻的挑战。

本文基于上述两个雷达信号分类识别问题，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识别进行研究分析，对后续雷达信号的分类研究具有一定的理论指导价值和工程意义。

1.2 研究现状

1.2.1 天波超视距雷达地海杂波识别研究现状

天波超视距雷达利用电磁波在电离层与地面或者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、巡航导弹和大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。天波超视距雷达的主要工作原理可以参照图 1-1，其工作频率为 6-28GHz，通过反射来自电离层的高频信号来检测和定位 1000 到 3000 公里范围内（地平线以外）的飞机、地面或者海洋目标，因此

在持续监测中起着重要作用^[2, 3]。然而，电磁信号通过电离层的传播会发生坐标系转换，目标处于大地坐标系（即经度和纬度）而天波雷达接收的量测信号定义在雷达坐标系下（即斜距和方位角）^[4]，这给雷达的目标跟踪与定位提出了新的需求：坐标配准。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。天波雷达的坐标配准在很大程度上影响着雷达跟踪精度，尤其是对电离层参数无法精确、实时获得的较远的区域。如果在雷达坐标系进行目标跟踪，整个坐标配准的过程可以分为两个子过程：（1）为每个量测或目标状态估计选择正确的电离层传播模式；（2）将量测或目标的状态估计从雷达坐标系转换为大地坐标系。

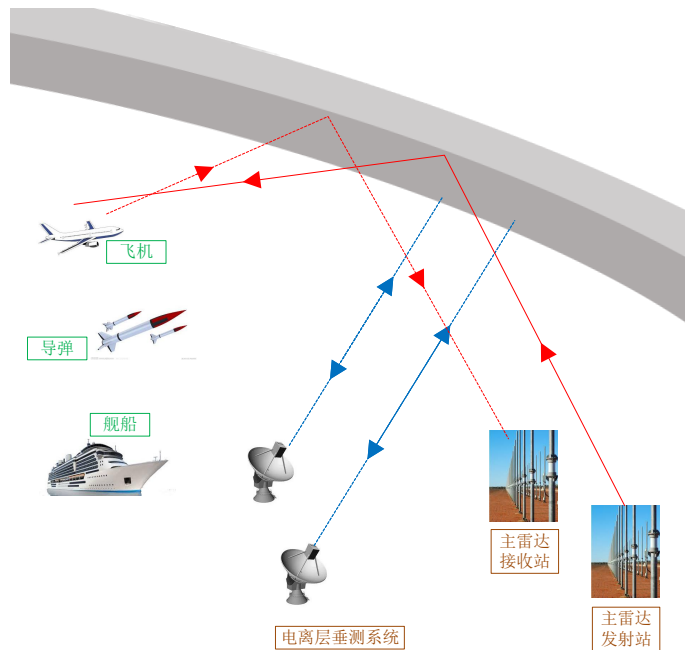


图 1-1 天波雷达工作原理示意图

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，这导致其目标检测和定位精度较低。如图 1-2所示，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及坐标配准参数等，如可能的电离层传播模式、每个模式对应的参数或者电离层的每层高度^[5]。然而，利用该方法有两个因素会影响目标定位的性能：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。对这些不可探测区域的电离层参数通常是建立基于先验信息的电离层统计模型，然后基于统计模型利用已探测区域的参数进行插值求得，但电离层的建模十分复杂且不同区域可能存在较大的变化，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的准确性，除此之外由于模型无法及时更新，有时会产生

严重错误（如天气突变情况）。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不一致，例如电离层探测系统识别的传播模式可能不同于主雷达所接收的量测的传播模式。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。

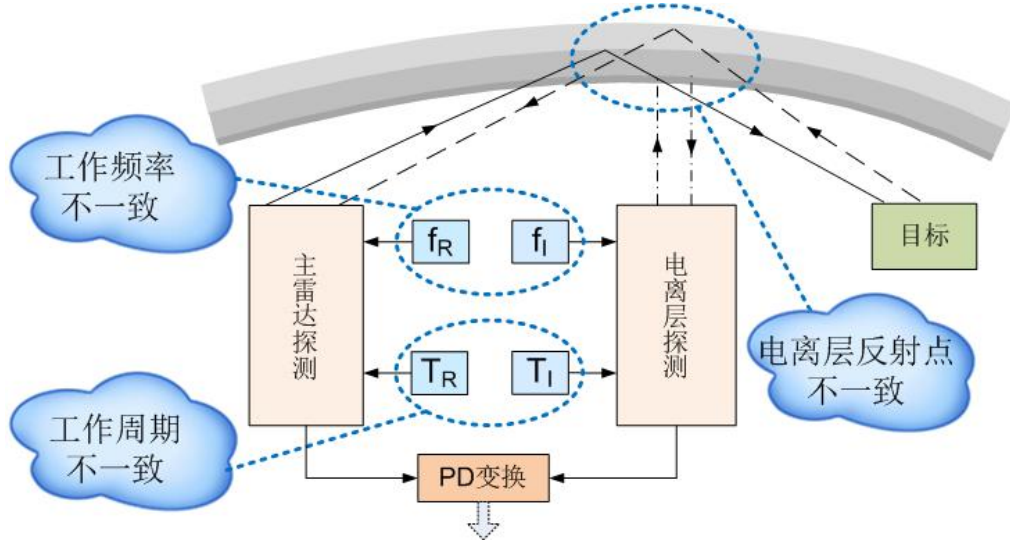


图 1-2 环境参数（电离层探测系统）与目标参数（主雷达）不一致

针对该问题，传统的解决方法是通过一些辅助检测设备收集信息。Weijers^[6] 提出了一种利用信标来改善坐标配准的方法。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量测值。通过将信标的量测与 GPS 提供的大地坐标系中的位置进行比较，可以实时地进行坐标的校正。然而，这种方法中信标部署区域有限且需要对信标进行维护。

事实上，可以利用远海区域的岛屿作为无源信标来求取电离层的相关参数。如果可以准确的辨识出信号来自陆地还是海洋，可以利用相同的思路进行坐标配准。这种方法的主要思路是，首先通过对频谱数据的分析识别出每个距离方位分辨单元上的地海情况。然后将识别结果中的地海轮廓与先验的地图轮廓信息进行匹配，匹配过程中的偏差可以作为坐标配准的参数。这种方法最重要的一点就是识别出杂波类型，也就是识别出雷达的每一个分辨单元是陆地还是海洋。这种方法主要有两个优点：一方面是我们可以使用获得的杂波地形图来匹配实际地图，然后根据匹配结果计算偏移量，从而提高目标跟踪的准确性，另一方面，我们可以通过使用由识别结果获得的频谱上的偏移来校正频谱本身，以提高目标检测的概率和准确度。

使用海岸线的坐标配准的想法首先出现在文献 [5] 中，然而该文献并没有给出具体的方法以及实际数据的验证。Barnum 等人^[7] 提出了一种基于地海杂波识别的坐标配准

方法，主要通过构造杂波模型进行杂波识别。但由于电离层状况的复杂性，地海杂波的特征不稳定（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^[8-11] 研究了利用天波雷达监测区域地貌结构来进行坐标配准的方法。对地理信息中的陆地和海洋用二进制矩阵表示，然后通过等效的电离层反射高度转换为参考信号。通过最大化接收到的雷达回波与地标特征之间的相关性来确定等效的电离层反射高度。然而，他们假设天波雷达传输单脉冲信号且仅提供了数值模拟结果。

Cacciamano 等人^[12] 提出了利用 3D 射线跟踪算法进行坐标配准误差评估的方法。主要思想是通过计算地海分界处的相对群延时与我们先验已知的实际群延时之间的差异进行坐标配准，其中实际的群延时是通过 3D 射线跟踪算法得到。Holdsworth^[13] 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。

Fabrizio 等人^[14] 提出了一种使用非合作辐射源在已知参考点产生的雷达回波来提高天波雷达坐标配准精度的方法并使用澳大利亚 Jindalee 天波超视距雷达的实验数据对该算法进行了验证。

虽然文献 [5-12, 14] 的工作均利用了地理信息进行坐标配准系数的提取，但这些文献的研究重点主要是如何通过地理坐标的匹配来进行坐标配准，而在地海杂波识别方面的研究却并不多。如图 1-3 所示，天波超视距雷达地海杂波识别面临很多特殊的挑战。首先是杂波模型的复杂度，由于杂波模型随着时间、地点、天气等的变化会发生较大的变化，故杂波建模十分复杂。传统的统计方法中，用于描述雷达杂波的分布有很多种，如瑞利分布（Rayleigh distribution），威布尔分布（Weibull distribution），K 分布（K distribution）等，但这些分布均只适用于某些特定情况，而不能在所有情况下均保持良好的效果。其次，地海杂波的特征无法很好的进行形式化描述。有经验的研究人员可能很容易地根据杂波图区分出某些单元是地还是海，但是用数学方法准确地描述这些特征几乎是不可能的。

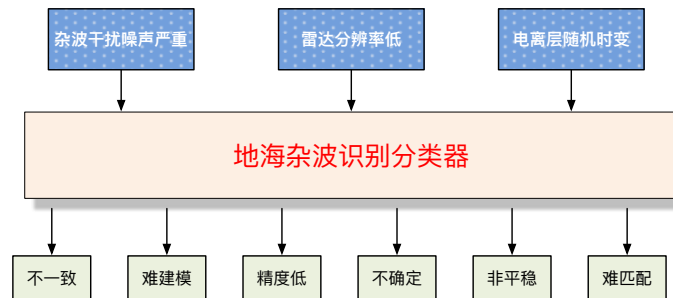


图 1-3 地海杂波识别分类器的背景

根据已有文献，只有 Turley^[15] 和 Jin^[16] 的工作对地海杂波的识别进行了研究。文献 [15] 定义 Bragg Ratio 为能量峰值处的多普勒频谱和次高峰处的多普勒频率之比。利

用该统计量在相邻距离方位角单元的基础上构建图边方程（graph edge equations），采用加权最小均方算法（weighted least-mean-square）求解该方程组。Jin 等人^[16]提出了一种基于支持向量机（Support Vector Machine, SVM）的地海杂波识别算法，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，取得了比较好的分类精度。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，具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。如图 1-4所示，上述两种常规的地海杂波识别算法采用电离层建模、特征提取、分类的方法，但该方法存在电离层建模复杂和信息利用不充分的问题。

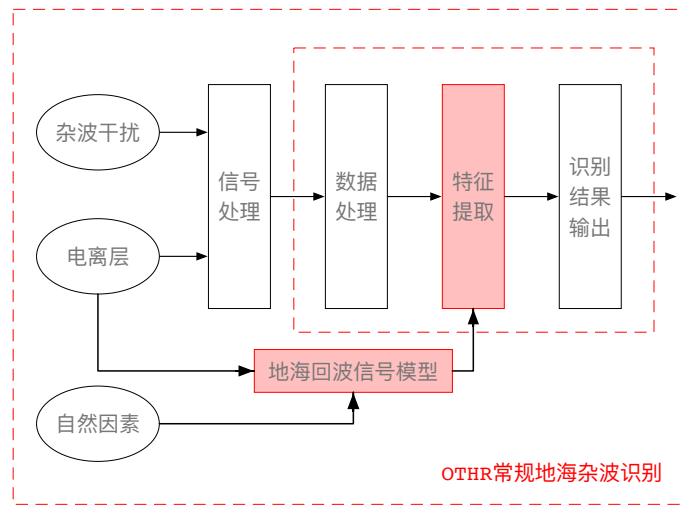


图 1-4 常规地海杂波识别

1.2.2 辐射源个体识别研究现状

辐射源个体识别（Specific emitter identification, SEI）是一种只依靠接受到的无线信号来辨识出甚至是同一型号的辐射源的技术^[17]。文献 [18] 理论证明了由于射频（radio frequency, RF）电路硬件在生产制造过程中存在公差并且使用过程中使用时间以及工作方式的不同，辐射源个体识别是可以实现的。

随着近几年认知雷达^[19] 和自组织网络^[20] 等新技术的出现，辐射源的快速、准确和鲁棒的自动目标识别在现代军事尤其是军事通讯中的作用日益重要。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力方面的差距。但总体来说，我国在该方面的研究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。

辐射源识别是通过将接收信号携带的特征与分类特征组进行比较并选择与这些特

征最匹配的类别来区分单个辐射源的过程。因此,辐射源识别中使用的一种典型方法是维护一个唯一标识各种辐射源信号的特征集,并将辐射源的输入信号与特征集进行比较,并将与输入信号最匹配的特征集的标识符(或标签)分配给它^[17, 21]。这种方法的隐含要求是特征集合,这意味着来自某辐射源个体产生的所有信号的特征值是相似和可重复的,而与由不同辐射源产生的特征值明显不同^[17]。上述分析表明辐射源个体识别的关键技术主要是两部分,一部分是雷达辐射源信号的特征挖掘与提取,另一部分是利用提取的特征进行分类识别。

自上世纪 70 年代开始,国外很多学者就针对雷达辐射源信号特征挖掘与提取开展了大量研究工作^[22],国内的研究始于上世纪 80 年代初,虽然起步较晚,但受到了军方的高度重视,因此发展迅速。该部分研究主要可以分为两个阶段:

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^[23],选取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。

第二阶段为雷达辐射源信号的脉内特征挖掘。当只利用雷达辐射源参数无法进行准确的辨识时,国内外学者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。根据辐射源的操作模式,信号可以分为瞬态信号和稳态信号。瞬态信号,通常被称为开启信号,提供了独特和可区分的特征,适合特征提取和辐射源识别^[24, 25]。测量瞬态特征的主要方法是通过检测噪声的起始点和终点来从噪声中提取瞬态信号^[26]。一般情况下,辐射源的瞬态特征是特定且一致的,这对识别是十分有帮助的;然而,由于瞬态信号的持续时间非常短,它们很难被捕获。此外,瞬态特征很容易受到非理想和复杂信道条件的阻碍,这可能会对识别结果产生负面影响^[27]。

稳态信号由在稳定条件下工作的辐射源传输。尽管稳态特征容易被传输的信息破坏而导致提取困难,但由于其很容易被检测和捕获,故稳态信号的识别具有相当大的实际意义。在这种情况下,国内外学者提出了许多特征提取方案,最先被提出的是对时域信号进行分析处理的方法,如 Roe 提出的时域波形分析法^[28];继而学者利用频域信号进行挖掘,如谱相关法^[29, 30]、脉内瞬时频率特征^[31, 32]与累积法^[33]及普运伟提出的瞬时频率派生特征^[34],随后学者综合时域信息与频域信息提出了时频综合法^[35-37],时频表示将信号映射到二维时间和频率平面上,同时提供时间和频谱信息。文献 [38] 基于短时傅立叶变换(short-time Fourier transform, STFT)提出了一个信号检测和识别系统。然而,STFT 不能用于分析非线性信号的线性变换。小波分析因其多分辨率分析的特点也被广泛应用于该领域,Cohen^[39]首次将小波变换引入到信号的分析处理,余志斌在此

基础上提出了基于局域波分解^[40]、小波脊频级联特征^[41, 42]的脉内特征挖掘方法和小波包特征^[43]等；越来越多其余学科的知识也被应用于该领域，如信息理论准则与聚类技术综合法^[44]、信号的分形特征^[45-47]、基于 Chirplet 原子的特征^[48]、熵特征^[49]、粗集理论^[50]、信息维数^[51]和分形盒维数^[52, 53]等来量化评估信号的不确定性和复杂性。

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。总体上有三种分类方法被应用于雷达辐射源识别中：一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^[54]、C4.5 算法^[55]和模板匹配^[56, 57]等；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 K 最近邻算法^[58]。第三种是判别型分类器，其需要在学习过程中最优化某种目标函数，如线性判别分类器^[59]、神经网络^[60-63]、支持向量机^[64]等方法。

从目前的研究现状来看，大多数研究方法存在三个主要缺陷：

- 特征提取过程计算量大，需要大量的存储空间。
- 特征选择困难，不同的特征在分类识别能力上存在较大差异。
- 目前的分类识别局限于已知类别的识别，当有新的来自未知类别的辐射源出现时，无法准确迅速的发现。

1.2.3 深度学习研究现状

由于深度学习算法可以有效的学习高维数据的稀疏特征表示，它已经被广泛应用于人脸识别、目标检测、手写字体识别以及场景分类等领域。1982 年，Kunihiko 等人^[65]首次将卷积神经网络（Convolutional Neural Networks, CNN）模型的概念引入神经网络。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^[66]和 BP 算法^[67]引入到卷积神经网络。2003 年，Behnke 写了一本总结卷积神经网络^[68]的书。同年，Simard 等人^[69]对卷积神经网络进行了简化。2011 年，Ciren 等^[70]进一步改进卷积神经网络并实现了 GPU 版本，使得卷积神经网络的训练识别速度有了巨大的提升，并使用卷积神经网络框架对多个图像数据库进行实验，并取得了最佳成果。

深度学习在无监督分类领域的研究也十分广泛，Hinton 和 PDP 小组^[71]于 20 世纪 80 年代首次提出自编码器这种对输入数据进行重构的神经网络结构，用输入数据作为标签来解决无监督反向传播的问题。自编码器与 Hebbian 学习规则^[72]共同为无监督学习提供了一个基本的范例，后来被推广到各种问题的全局学习方面。自编码器在深度架构方法中占据着比较重要的位置，特别是形式上类似受限玻尔兹曼机的自编码器，堆栈

自编码器。堆栈自编码器通过首先利用无监督的方式自下而上地进行训练，随后是以有监督学习的方式训练顶层并微调整个架构，在一些具有挑战性的分类或回归问题上得到了最优的结果^[73-76]。

由于深度学习算法在图像、语音等领域的卓越表现，一部分学者也开始将其应用于雷达领域。在研究初期，大部分应用均集中于合成孔径雷达（Synthetic aperture radar, SAR）图像识别，主要用于遥感中的地物分类领域。Chen^[77]提出了一种利用单层卷积神经网络从 SAR 图像自动学习特征进行分类的方法，并利用 MSTAR 公开数据集进行验证得到了较高的分类准确率。Lv^[78]提出了一种基于深度置信网络的城市测绘方法，在复杂的城市环境中仍可以保持很高的精度，优于自适应支持向量机等方法。Xie^[79]提出了一种自动学习极化合成孔径雷达（PolSAR）中多层特征的方法，首先利用堆栈稀疏自编码器进行特征提取，然后使用少量标签微调方法中的参数，显著提升了分类精度。

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。恒虚警（Constant False Alarm Rate, CFAR）检测是雷达系统常用的目标检测算法，Rohman^[80]提出了一种隐含神经元数变化的集成神经网络分类器，对雷达环境进行分类的自适应 CFAR 检测方法。在多目标和杂波边界环境下，该方法仍然能够表现出最好的性能。Kim^[81]提出了一种基于多普勒雷达的深度卷积神经网络（DCNNs）用于人体检测和活动分类的方法。他们主要针对传统解决方案中依赖手工特征设计的问题，提出了将 DCNN 直接应用于人体检测和活动分类问题的原始多普勒频谱图。DCNN 可以使用量测数据共同学习必要的特征和分类边界，而不需要在多普勒信号上使用任何明确的特征，并且取得了很高的精度。Zhang^[82]针对不同运动形式和复杂杂波背景下的多目标跟踪问题，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。仿真实验表明，其方法比传统的用于航迹起始的改进 Hough 变换要好得多，特别是在目标机动的情况下，同时该方法具有很强的鲁棒性和适应性，能够对来自不同雷达的数据进行起始。

1.3 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分类技术，研究重点为深度学习方法在复杂环境下的天波雷达地海杂波识别和含有未知分类的辐射源分类中的应用。本文各章安排如下：

第 1 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与发展，辐射源类别识别以及深度学习方法在雷达信号分类领域的国内外研究现状。

第 2 章为深度卷积神经网络。该章主要是深度学习理论的相关介绍。

第 3 章为基于深度学习的地海杂波识别。该章根据天波超视距雷达的频谱信息，构建了一个深度卷积神经网络分类器，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 4 章基于深度嵌入卷积聚类方法的地海杂波无监督分类。结合卷积神经网络与自编码器提出了一种无监督分类算法，深度嵌入卷积聚类方法。利用卷积自编码器进行特征提取，并在损失函数中将 KL 散度与重构损失两部分结合，并利用天波超视距雷达的实际地海杂波数据进行了测试，结果验证了深度嵌入卷积聚类算法的有效性。

第 5 章为基于深度学习的辐射源未知分类识别。针对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已知类别的辐射源的识别。同时设计了一个 Meta-Recognition，对识别结果做进一步处理，实现了未知分类的辨别。该章最后利用来自多架飞机气象雷达的实际数据进行了测试，实验结果验证了本文提出的算法具有很高的识别准确率和未知分类分辨正确率。

第 6 章对全文进行总结，并对后续的研究方向进行了讨论。

2 深度卷积神经网络

2.1 引言

人工神经网络^[72] 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。Fukushima^[65] 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临的计算复杂度高等问题进行了改进，提出了基于梯度下降的优化算法^[66] 和 BP 算法^[67]。2003 年，Simard 对卷积神经网络进行了简化^[69]。Hinton 在 2006 年的两篇文章^[73, 74] 可以作为深度学习（Deep Learning, DL）正式提出的里程碑。Ciren 等人^[70] 在 2011 年对神经网络进行改造使其可以通过 GPU 训练计算，并在大量的图像数据集对深度学习算法进行了测试，且都取得了最好的成绩。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^[83]、图像识别^[84] 和自然语音处理^[85] 等各种方面。专门用于深度学习的芯片不断问世，例如谷歌公司的 TPU^[86]，大大提高了深度学习的应用场景。

深度神经网络模型是一种非常强大的深度学习模型，它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。针对海量数据，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。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^[87]。

本章安排如下：2.2 节对深度学习的基本分类进行了介绍，2.3 节详细地阐述了传统人工神经网络结构的定义和神经元之间信息传递的过程，2.4 节对本文主要运用的深度卷积神经网络的特性进行了介绍，2.5 节进行本章总结。

2.2 基本分类

传统上可以把深度学习分为卷积神经网络、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）、自编码器、稀疏编码（Sparse Coding）、受限玻尔兹曼机（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，使学习效率更高并减少过拟合，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。而递归神经网络对的隐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，是由多个受限玻尔兹曼机组成，这些网络被“限制”为一个可见层和一个隐层，层间存在连接，但是层内的单元间不存在连接，通过训练隐层单元来捕捉在可见层表现出来的高阶数据的相关性。

通过对以上几种最常用的深度学习方法的介绍，易知卷积神经网络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

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权重函数，用来进行模式识别、分类等。神经网络主要是将许多个单一神经元（也称作感知器）连接在一起，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。首先介绍单一神经元的结构，如图 2-1所示，神经元一般具有多个输入 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，这些输入可以取 0 和 1 中的任意值。神经元对每一个输入有权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 和一个总的偏置 b_0 ，其输出为：

$$y = f(w \cdot x + b) \quad (2-1)$$

其中， f 为该神经元的激活函数。

上述多个神经元分层互联即可形成神经网络，图 2-2是一个简单的神经网络，其中圆圈表示神经网络的节点，也即神经元。对于一个具有 n_l 层的神经网络，如将第 l 层用 L_l 表示，则有最左边的一层 L_1 为输入层，最右的一层 L_{n_l} 为输出层。由于不能在训练

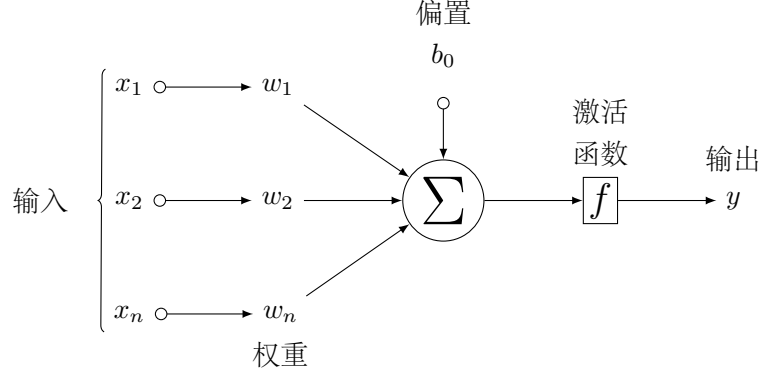


图 2-1 神经元

样本集中观测到中间所有节点的值，故将这些层称做隐层。本例中网络的层数 $n_l = 3$ ，输入层具有 4 个输入单元，隐层具有 5 个隐层单元，输出层只有一个输出单元。

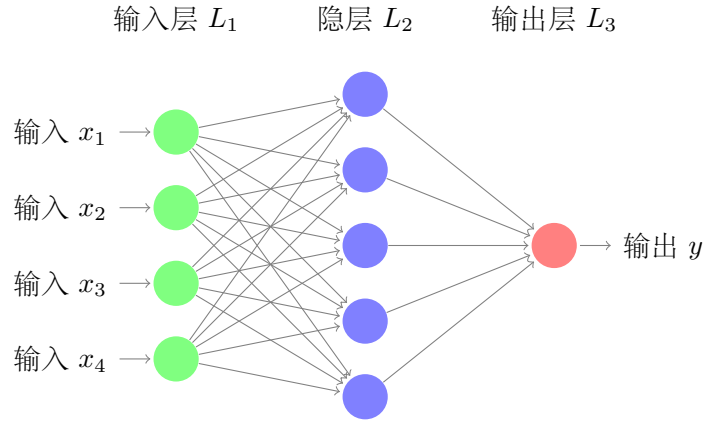


图 2-2 神经网络

根据输入 x_i 求解输出 y 的主要过程为前向传播。用 $w_{ij}^{(l)}$ 表示第 l 层的第 j 单元与第 $l+1$ 层的第 i 单元之间的权重， $b_i^{(l)}$ 是第 $l+1$ 层中第 i 单元的偏置项。因此， $w^{(l)}$ 为第 l 层权重组成的向量， $w^{(1)} \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ ， $w^{(2)} \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ 。根据图 2-1 和公式 (2-1) 可以知道每个神经元节点的输出是经过激活函数的激活值，可以用 $y_i^{(l)}$ 表示第 l 层的第 i 单元的输出值。当 $l=1$ 时， $y_i^{(1)}$ 为就是第 i 个输入值，也即有 $y_i^{(1)} = x_i$ 。当权重已知时，可以根据公式 (2-1) 求解此传播过程，进而求解最终的输出值 y 。从 L_1 层到 L_2 层的过程为：

$$y_1^{(2)} = f(w_{11}^{(1)}x_1 + w_{12}^{(1)}x_2 + w_{13}^{(1)}x_3 + w_{14}^{(1)}x_4 + b_1^{(1)}) \quad (2-2)$$

$$y_2^{(2)} = f(w_{21}^{(1)}x_1 + w_{22}^{(1)}x_2 + w_{23}^{(1)}x_3 + w_{24}^{(1)}x_4 + b_2^{(1)}) \quad (2-3)$$

$$y_3^{(2)} = f(w_{31}^{(1)}x_1 + w_{32}^{(1)}x_2 + w_{33}^{(1)}x_3 + w_{34}^{(1)}x_4 + b_3^{(1)}) \quad (2-4)$$

$$y_4^{(2)} = f(w_{41}^{(1)}x_1 + w_{42}^{(1)}x_2 + w_{43}^{(1)}x_3 + w_{44}^{(1)}x_4 + b_4^{(1)}) \quad (2-5)$$

$$y_5^{(2)} = f(w_{51}^{(1)}x_1 + w_{52}^{(1)}x_2 + w_{53}^{(1)}x_3 + w_{54}^{(1)}x_4 + b_5^{(1)}) \quad (2-6)$$

根据同样的计算过程可以得到：

$$y = y_1^{(3)} = f(w_{11}^{(2)}y_1^{(2)} + w_{12}^{(2)}y_2^{(2)} + w_{13}^{(2)}y_3^{(2)} + w_{14}^{(2)}y_4^{(2)} + w_{15}^{(2)}y_5^{(2)} + b_1^{(2)}) \quad (2-7)$$

把公式 (2-6) 代入公式 (2-7) 就可以计算得到输入 x_i 与输出 y 之间的关系。为了使表达更清晰，用 $z_i^{(l)}$ 表示第 l 层第 i 单元输入加权和，则有：

$$z_i^{(l)} = \sum_{j=1}^n w_{ij}^{(l-1)}x_j + b_i^{(l)} \quad (2-8)$$

因此公式 (2-6) 变为：

$$y_i^{(l)} = f(z_i^{(l)}) \quad (2-9)$$

则整个前向传播过程可以简化为：

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

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

其中， $b^{(l)}$ 为第 $l+1$ 层偏置项组成的向量， $h^{(l)}$ 为第 l 层各个单元输出值组成的向量。

根据上述计算过程，对于一个具有 n_l 层的前馈神经网络（在网络中没有闭环或者回路），其第 1 层是输入层，第 n_l 层是输出层，中间的所有隐层 L_l 均与下一层 L_{l+1} 全连接。只需逐个计算每一个层中的节点的输出值，然后据此得到下一层的输出值。一个复杂的神经网络一般会具有多个隐层并且输出层中可以有多个输出单元，图 2-3 的神经网络有三层隐层： L_2 、 L_3 及 L_4 ，输出层 L_5 有三个输出单元。

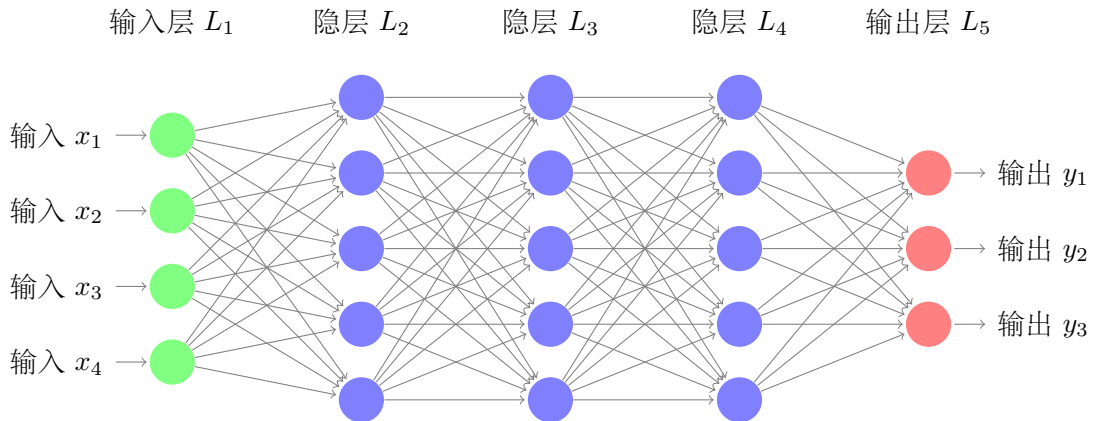


图 2-3 具有多个输出单元的神经网络示意图

2.4 深度卷积神经网络

卷积神经网络是深度学习中的一种重要算法，在分类等很多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。卷积神经网络是一种特殊的人工神经网络，由多对卷积层（Convolutional layer）和池化层（Pooling layer），以及全连接层（Full-connected layer）组成。图 2-4 为一个典型的卷积神经网络，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一个或者多个输出神经元，其余的是多组卷积、池化层和有限数量的完全连接的隐层。

网络的前向传播主要是卷积和池化操作，其网络参数的更新采用误差反向传播（Error Backpropagation）算法。相比于传统人工网络，卷积神经网络有以下几个特点：

- 输入为原始数据，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。
- 多个卷积核可以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层单元。将各个隐层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。这种机制不仅大大减少了参数数量同时提高了数据的平移不变性。
- 具有超过两个的隐层以及可以逐层初始化模型的参数，通过更多的隐层可以更好地对事物的特征进行学习表达。

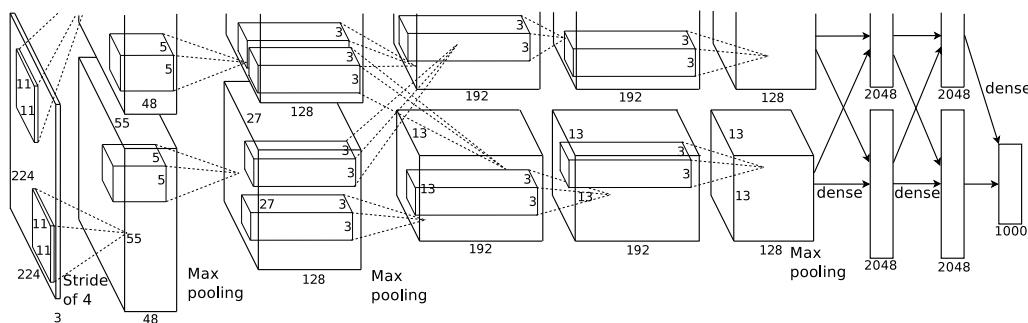


图 2-4 AlexNet 卷积神经网络模型^[84]

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，输入的一定区域的隐层的特征向量 x 和滤波器（权重） w 点乘后得到新的特征向量，然后滑过一个个滤波器，以产生输出特征向量。权重实际上是一个四维张量，第一维 F 是卷积输入层的特征向量的数量，另一维 F_p 是卷积输出层的特征向量的数量，另外两维是在宽度和高度方向给出的卷积核的大小，也称作感受野。

传统神经网络的每个输入元素会连接到每个隐层神经元。然而，在卷积神经网络中，只是把输入数据进行小的、局部区域的连接，也即第一个隐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层神经元的局部感受野，它是输入向量上的一个小窗口，对每个连接学习一个权重而隐层神经元同时学习一个总的偏置。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层。

感受野允许用一个子集来代替整个输入数据。它的目的是在输入数据中搜索相似的模式，而不管模式在哪里，也即平移不变性。输出图像的宽度和高度也由步长（stride）确定，步长为在进行再次应用卷积运算之前在垂直、水平方向上滑动的像素的数目。以图 2-5 展示的二维卷积操作来介绍卷积运算的过程。

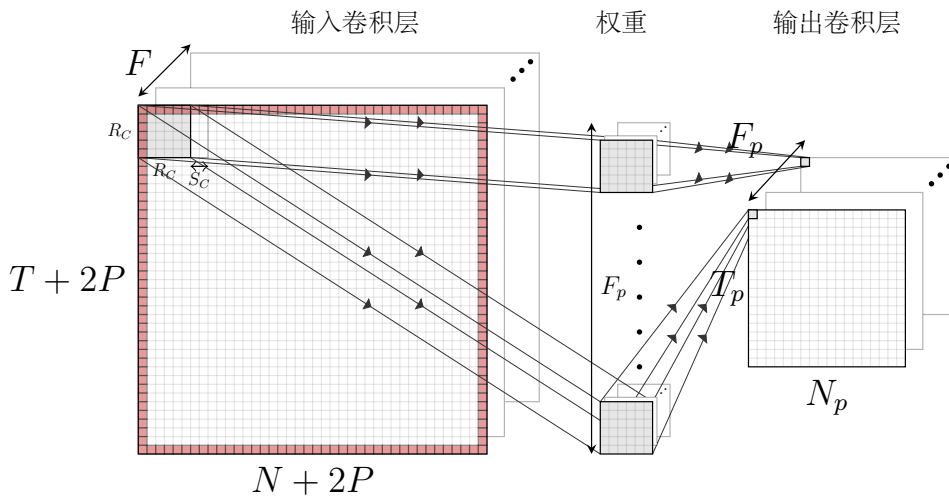


图 2-5 卷积示意图

图中的 R_C 为卷积感受野的大小， S_C 为卷积的步长。根据输入高度 T 和宽度 N ，可以计算输出图像的高度和宽度：

$$N_p = \frac{N + 2P - R_C}{S_C} + 1, \quad T_p = \frac{T + 2P - R_C}{S_C} + 1 \quad (2-12)$$

通常对输入数据进行边界扩充（padding）来使得输入特征图的宽度和高度满足 $N = N_p = T = T_p$ ，这样当前进步长 $S_C = 1$ 时，可以得到：

$$P = \frac{R_C - 1}{2} \quad (2-13)$$

一个给定的层 L_n 的卷积运算的计算过程为：

$$y_{flm}^{(\nu)} = \sum_{f'=0}^{F_{\nu}-1} \sum_{j=0}^{R_C-1} \sum_{k=0}^{R_C-1} w_{f'jk}^{(o)f} h_{f'S_Cl+jS_Cm+k}^{(\nu)} \quad (2-14)$$

其中 o 表示网络中的第 $o+1$ 个卷积核。 $\nu \in [0, N-1]$ 表示网络中的第 ν 个隐层， $f \in [0, F_{\nu+1}-1]$ 为输入卷积层的第 f 个特征图， $l \in [0, N_{\nu+1}-1]$ 为输入卷积层的第 v

个特征图的宽度单位, $m \in [0, T_{\nu+1} - 1]$ 为输入卷积层的第 ν 个特征图的高度单位。因此可以得到 $S_C l + j \in [0, N_\nu - 1]$, $S_C l + m \in [0, T_\nu - 1]$ 。于是可以通过添加激活函数计算隐层单元的输出。考虑到边界填充可以得到:

$$h_{f, l+P, m+P}^{(\nu+1)} = f(y_{f, l, m}^{(\nu)}) \quad (2-15)$$

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 共享权重和偏置

如前节所述, 每个隐层神经元具有一个偏置和连接到它的局部感受野的权重, 对该层的每一个神经元使用相同的权重和偏置, 那么第 j 个隐层神经元的输出为:

$$h_j = f(b + \sum_{m=1}^M w_m y_{j+m}) \quad (2-16)$$

其中, f 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, y_k 表示位置 k 的输入激活值。这意味着第一个隐层的所有神经元检测完全相同的特征, 只是在输入数据的不同位置, 因此卷积网络可以很好地适应数据偏移的情况。

2.4.3 池化

在通过卷积获得了特征之后, 下一步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。由于本文的雷达信号具有一种“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, 而且不容易过拟合, 在一定程度上会改善结果。这种聚合的操作称为池化。池化操作是卷积神经网络中一种常用的用来对数据进行降维处理的方法。一般有平均池化和最大池化, 主要过程为选取输入特征向量的 F 一个池化感受野 R_P 和步长 S_P 选取其最大或者平均元素来代表该区域, 得到输出特征向量 $F_p = F$, 其中宽度 $N_p < N$, 高度 $T_p < T$ 。在池化操作过程中, 一般不考虑输入隐层的边界扩充值, 因此在公式 (2-17) 中存在 $+P$ 这一部分。

给定的第 ν 个平均池化操作的公式为:

$$y_{f, l, m}^{(\nu)} = \sum_{j, k=0}^{R_P-1} h_{f, S_P l + j + P, S_P m + k + P}^{(\nu)} \quad (2-17)$$

最大池化的公式为：

$$y_{f,l,m}^{(\nu)} = \max_{j,k=0}^{R_P-1} h_{f,S_P l+j+P,S_P m+k+P}^{(\nu)} \quad (2-18)$$

其中， $\nu \in [0, N-1]$ 表示网络中的第 ν 个隐层， $f \in [0, F_{\nu+1}-1]$ ， $l \in [0, N_{\nu+1}-1]$ 以及 $m \in [0, T_{\nu+1}-1]$ 。因此有 $S_P l+j \in [0, N_{\nu}-1]$ ， $S_P m+k \in [0, T_{\nu}-1]$ 。最大池化是最常用的一种池化方式，本文所用的神经网络结构均使用最大池化。用 $j_{f,l,m}^{(t)(p)}$ ， $k_{f,l,m}^{(t)(p)}$ 来表示第 t 次批采样在 l, m 处特征向量图的最大值，则公式 (2-18) 变为：

$$h_{f,l+P,m+P}^{(t)(\nu+1)} = y_{f,l,m}^{(t)(\nu)} = h_{f,S_P l+j_{f,l,m}^{(t)(p)}+P,S_P m+k_{f,l,m}^{(t)(p)}+P}^{(t)(\nu)} \quad (2-19)$$

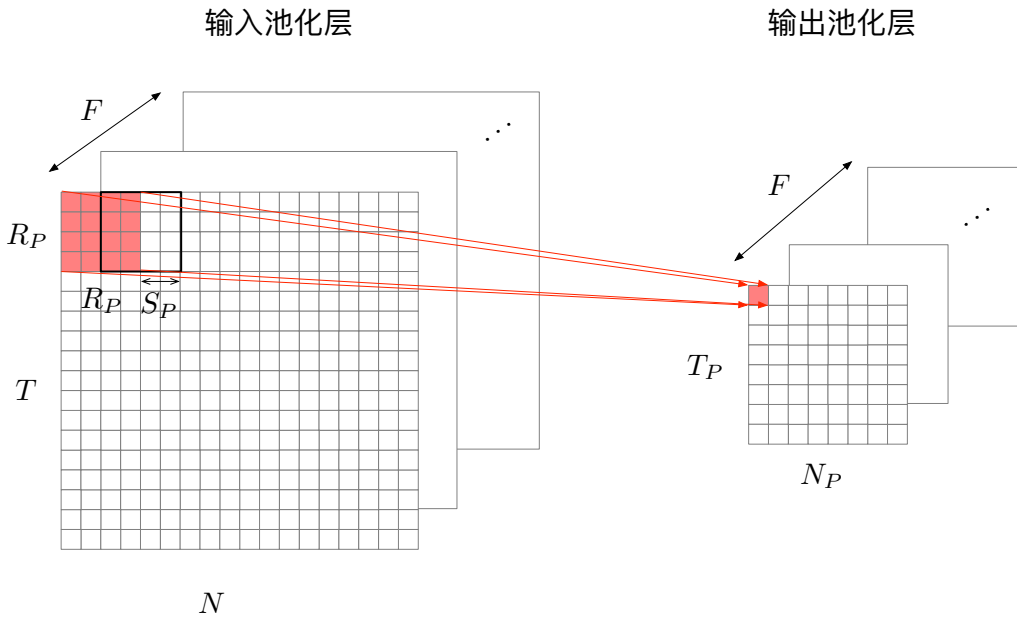


图 2-6 池化示意图

深度卷积神经结构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，每个隐层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，并在隐层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。

2.4.4 激活函数

在公式 (2-7) 中， $f(x)$ 被用于每一个神经元节点，因此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，在本节介绍几种常用的激活函数。

sigmoid 激活函数

在传统人工神经网络中常用的激活函数为 sigmoid 激活函数（S 型激活函数），其取值范围为 $(0, 1)$ ，其定义为：

$$f(x) = \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2-20)$$

对其求导可以得到：

$$\sigma'(x) = \sigma(x) (1 - \sigma(x)) \quad (2-21)$$

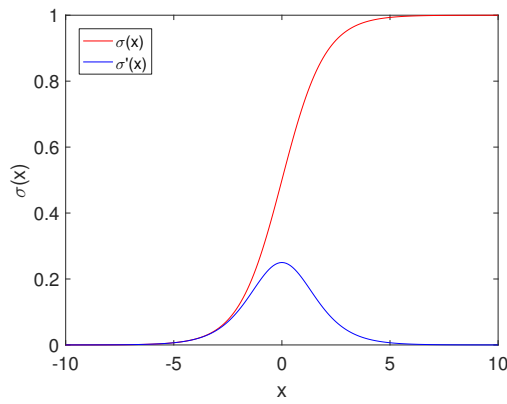


图 2-7 sigmoid 激活函数及其导数

tanh 激活函数

tanh 激活函数的取值范围为 $(-1, 1)$ ，其定义如下：

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (2-22)$$

对其求导可以得到：

$$\tanh'(x) = 1 - \tanh^2(x) \quad (2-23)$$

ReLU 激活函数

ReLU(Rectified Linear Unit) 的取值范围为 $[0, +\infty)$ ，其定义为：

$$f(x) = \text{ReLU}(x) = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2-24)$$

对其求导可以得到：

$$\text{ReLU}'(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2-25)$$

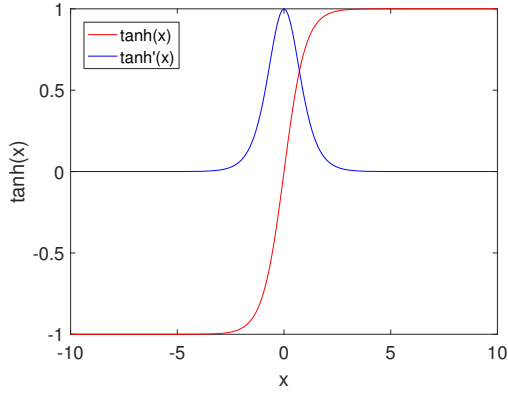


图 2-8 tanh2 激活函数及其导数

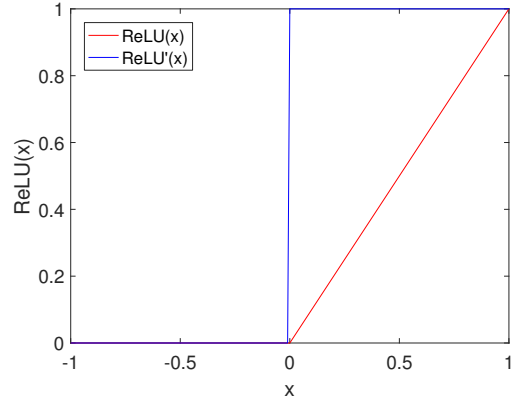


图 2-9 ReLU 激活函数及其导数

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，多个单元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。

2.4.5 神经网络的学习算法

参照上文的符号定义，用符号 x 表示训练输入的向量集， w 表示所有的网络中权重的集合， b 是所有的偏置，用 $y = f(w \cdot x + b)$ 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 w 和偏置 b 使得网络的输出 y 可以拟合所有的训练输入 x 。为此可以定义一个损失函数或代价函数 (loss function) $C(w, b)$ ，不同的问题可以选取不同的损失函数。

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使得损失函数 $C(w, b)$ 最小的权重和偏置。为了求解该问题，将上述问题一般化，原问题变为最小化任意的具有 m 个变量的多元实值函数 $C(v)$ ， $v = v_1, v_2, \dots, v_m$ 。这种具有大量变量的函数的解析解的求解是极其复杂的，一个比较合理的思路为利用数值计算的方法求取其极值点。每次给 C 中的自变量 v 添加一个微小的变化 Δv ，根据此变化反映出来的 C 的变化 ΔC 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 $\Delta v = (\Delta v_1, \dots, \Delta v_m)^T$ ， ΔC 将会变为

$$\Delta C \approx \nabla C \cdot \Delta v \quad (2-26)$$

，此处梯度 ∇C 的定义如下：

$$\nabla C \equiv \left(\frac{\partial C}{\partial v_1}, \dots, \frac{\partial C}{\partial v_m} \right)^T \quad (2-27)$$

其把 v 的变化关联为 C 的变化，假设选取 $\Delta v = -\eta \nabla C$ ，其中的 η 是学习率，一般取一个很小的正数，则公式 (2-26) 变为：

$$\Delta C \approx -\eta \nabla C \cdot \nabla C = -\eta \|\nabla C\|^2 \leq 0 \quad (2-28)$$

也即如果利用更新规则 $v \rightarrow v' = v - \eta \nabla C$ ， C 会持续减小，此更新规则即为最基础的学习算法，梯度下降算法。图 2-10展示了梯度下降的示意图，其跟随当前位置最陡的下降的方向也即负梯度，其中学习率 η 描述在每个迭代步骤中下降的步长。可以根据选择不同的损失函数 C 或者通过计算来完成学习率的选择等各种技术对学习算法进行优化。根据梯度下降的思想，结合卷积神经网络中的反向传播，获得神经卷积神经网络的训练流程图，如图 2-11所示。

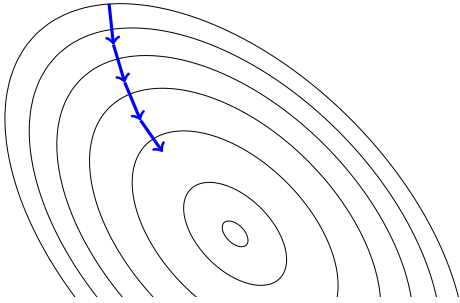


图 2-10 梯度下降示意图

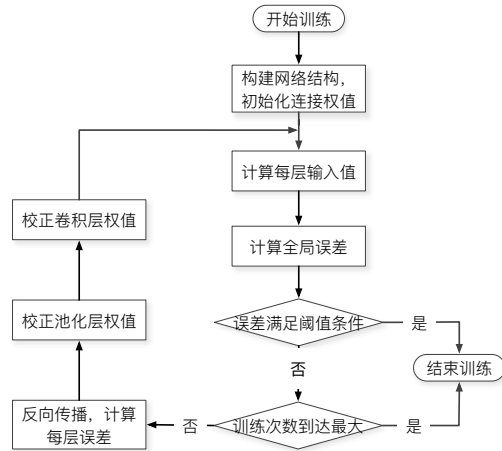


图 2-11 神经网络学习算法流程图

2.5 小结

本章介绍了深度学习的相关基础。首先是其基本分类，然后介绍了传统的神元的结构和卷积神经网络基于此的改进，最后讨论了深度卷积神经网络的学习算法。

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

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坐标配准系数的精确测量。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）获得坐标配准系数的技术。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，主要体现在以下两个方面：

- 天波雷达的距离分辨率为 $7.5 - 30$ 公里，方位分辨率为 $0.582 - 1.067$ 度，低分辨率影响地海特性的判别以及匹配精度。
- 传统的地海杂波的分类特征难以定量描述。由于电离层环境复杂，地海杂波的特性不稳定，区分地海杂波特性的 Bragg 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，根据实际数据选取一种分布来描述雷达杂波这种传统建模方法无法取得很好的结果。

本章提出一种新的在复杂电离层环境下的基于深度卷积神经网络的地海杂波识别技术，避免了对杂波进行建模然后选取特征的方法，从根本上避免了传统方法所面临的困难。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，利用大量实际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在线分类识别。本章选取不同电离层条件、雷达工作条件、位置和时间下的频谱数据进行实验，结果证明本章提出的基于深度卷积神经网络算法具有很高的识别正确率。

本章安排如下：3.2节分析了天波雷达杂波信号并对数据集进行分组，3.3节根据实际数据特性构建了基于深度学习的分类器，3.4节利用实际数据对本章的分类器与已有方法进行对比，验证了本章提出方法的性能，3.5节进行本章总结。

3.2 地海杂波频谱数据分析

传统的天波雷达地海杂波识别方法主要利用海杂波的 Bragg 特性，但是在实际情况中，受电离层条件、工作环境等的影响，会出现很多频谱很难分辨的情形，如图 3-1 所示。在天波超视距雷达的工作过程中，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。在不同的雷达工作条件下，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。

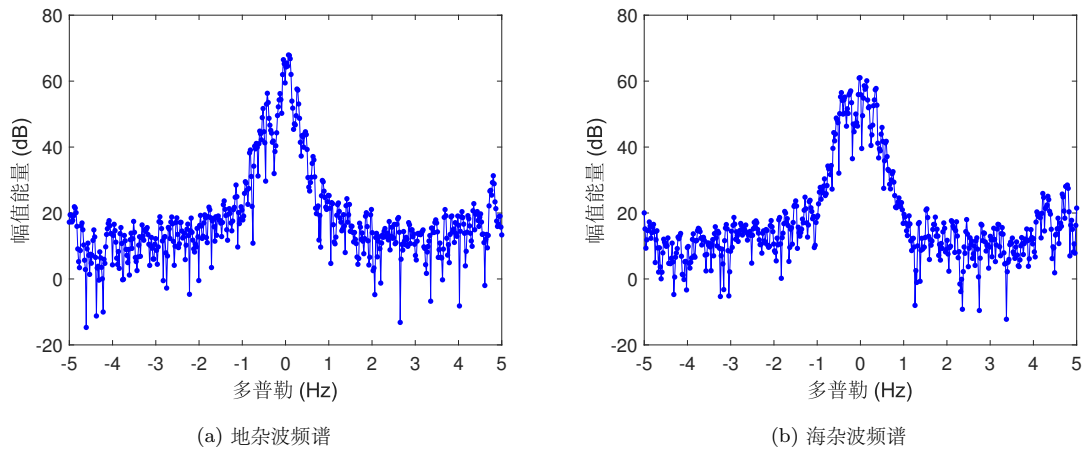
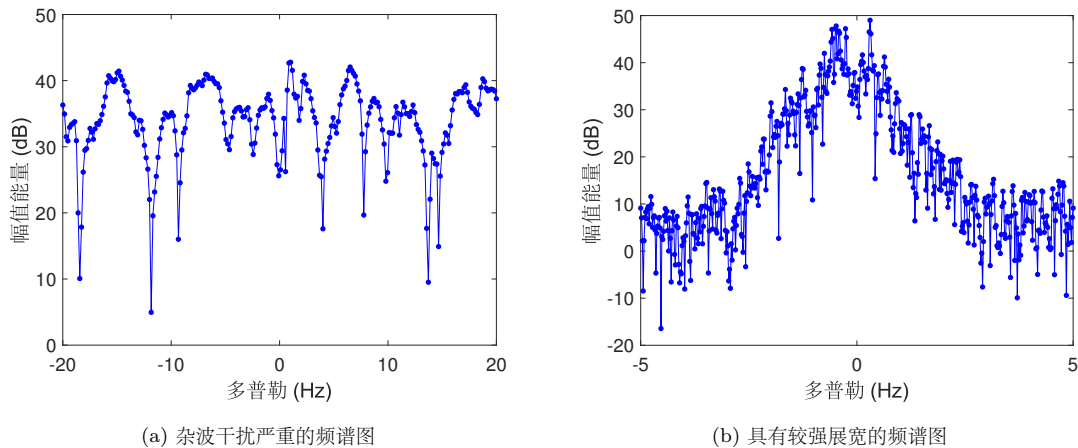


图 3-1 两幅无法轻易区分的地海杂的频谱波示意图。图 3-1a 作为地杂波最大幅值能量未处于零频处，图 3-1b 作为海杂波却无法容易的分辨出 Bragg 峰。

本章选取了几种不同的雷达工作配置（工作频率、朝向等）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。为了保证样本的多样性，本章对同一个雷达参数下的数据根据季节、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，图 3-2 展示了一些典型的频谱数据。



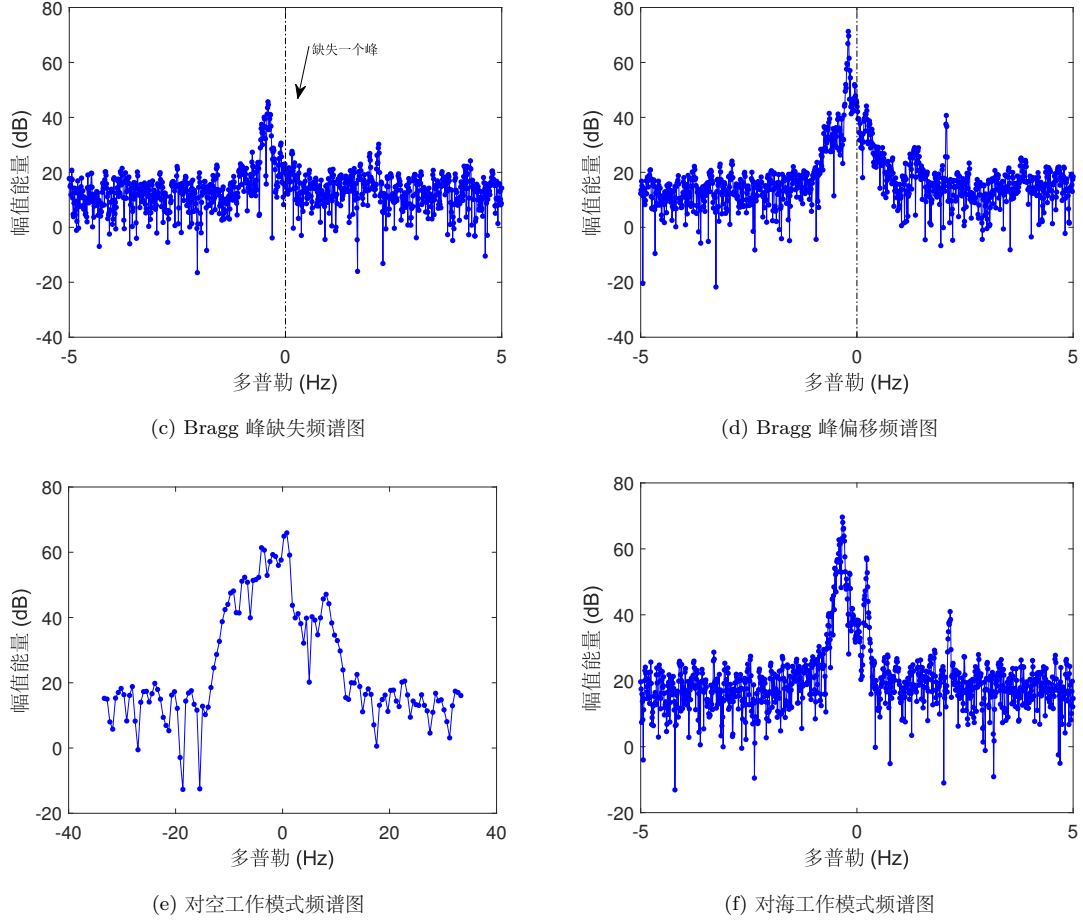


图 3-2 复杂环境下频谱图

3.2.1 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，将所有数据分为 4 组：

- 组 A: 如图 3-3a所示，具有 128 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz。
- 组 B: 如图 3-3b所示，具有 256 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz。
- 组 C: 如图 3-3c所示，具有 512 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz。
- 组 D: 如图 3-3d所示，具有 1024 个相干积累点数，频率变化范围为-5Hz 到 5Hz。

本章只选择了上述四个具有典型意义的分组的数据（如图 3-3所示）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。同时，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。

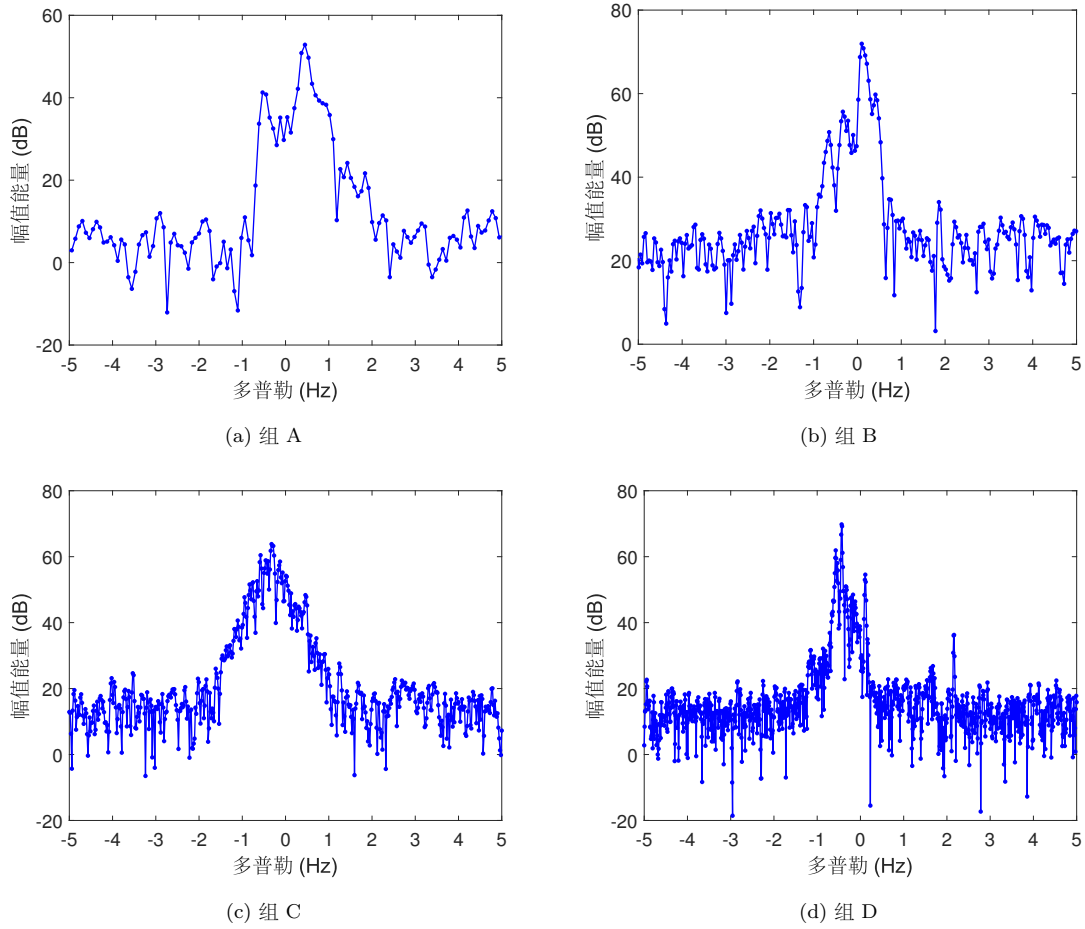


图 3-3 不同组数据的频谱对比示意图

3.3 地海杂波识别算法

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定位精度，特别是电离层参数无法准确及时获得的较远区域。识别地海分界线主要有两个优点：第一个是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，用来提高目标定位精度；另一方面，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。

如图 3-4所示，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和地海杂波识别两个处理层。具体过程为：对输入频谱数据进行清洗、裁剪、融合等预处理操作，根据频谱数据的特性进行相关积累点数匹配和多普勒频率范围匹配选择恰当的深度卷积神经网络分类器，然后将预处理过的整体频谱数据输入到分类器中，输出地海杂波识别结果。

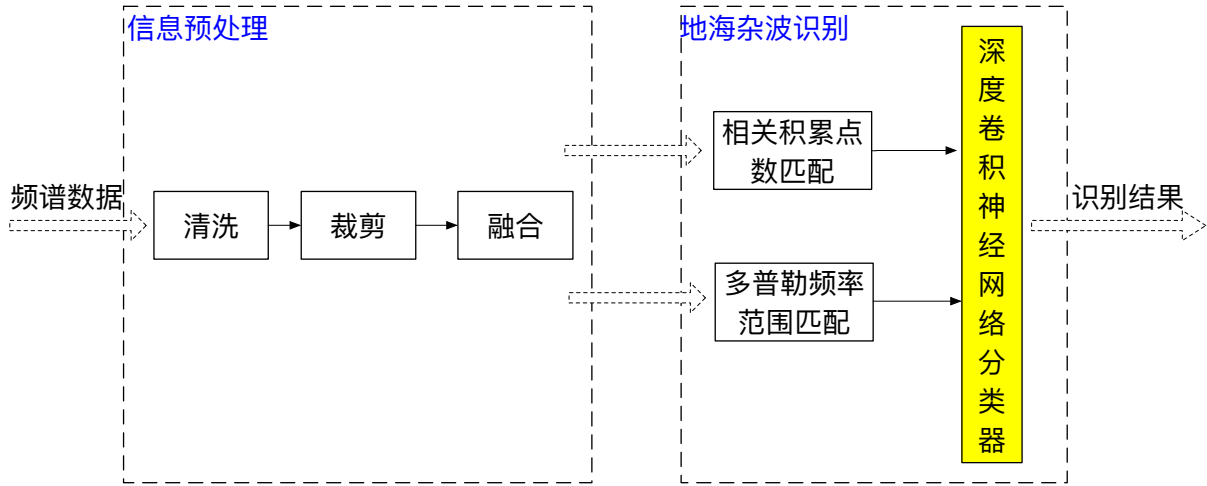


图 3-4 系统结构图

3.3.1 数据预处理

本章不同于传统分类问题中利用各种不同的由原始数据变换得到的特征，而是直接利用原始的杂波频谱数据来做地海杂波的识别。同时针对地海杂波识别问题的数据形式，本章对输入数据做了二次处理。本章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，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，最初从雷达得到的数据为对时域数据进行快速傅立叶变换后获得的频域中的数据，本章对这些数据进行平移操作，将快速傅立叶变换的直流分量移到频谱中心。虽然，表面上看利用平移前后的数据训练和测试区别不大。然而，在实际的情况中，在经过平移变换后，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。

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，首先对该数据进行清洗，把图 3-6这种并非处于正常探测模式下的数据去除。

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，本章在利用这些数据训练或者识别前需要首先对其进行处理，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，可以将数据进行裁剪，只选取有效数据（本章在权衡信息保留以及计算量的情况下，保留了频率范围为 $[-5\text{Hz}, +5\text{Hz}]$ 的区域），在一定程度上减小计算量。

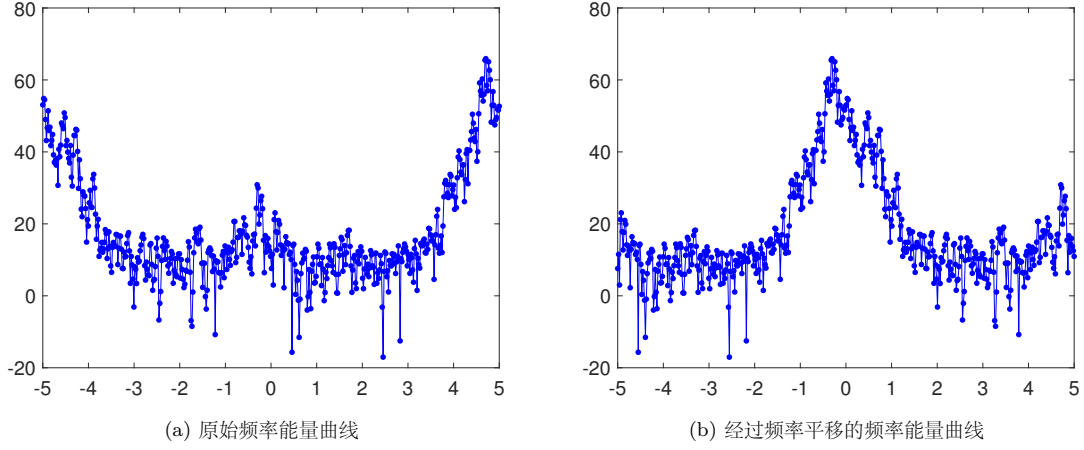


图 3-5 频谱数据平移变换示意图

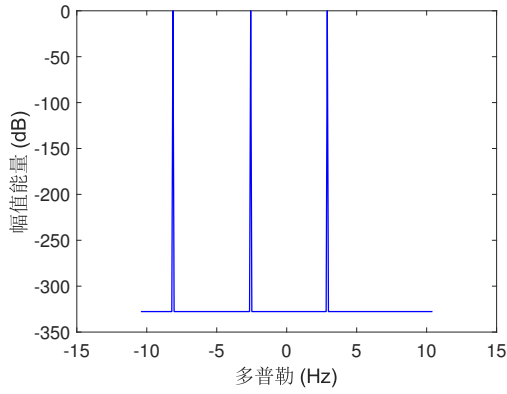


图 3-6 需要被清洗掉的数据

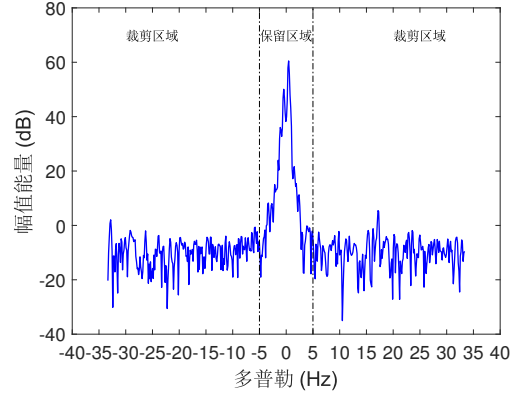


图 3-7 数据裁剪示意图

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，本章采用滑窗融合的方法对输入数据进行预处理。其主要思想是将连续窗长时间 N 内的相邻杂波数据 x_1, x_2, \dots, x_N 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：

$$x = \sum_{i=1}^N w_i x_i \quad (3-1)$$

其中 w_i 为频谱数据 x_i 的权重，后面仿真验证小节详细讨论了窗长及权重的选择。从图 3-8可以看出，融合后的毛刺明显变少，更利于最终的分类识别。

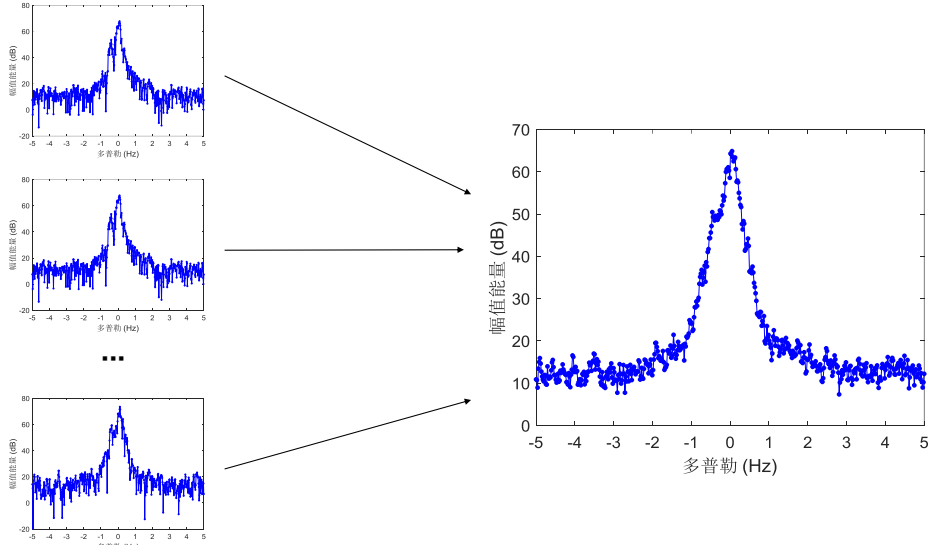


图 3-8 数据融合示意图

3.3.2 分类算法设计

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。本章利用深度学习中的深度卷积神经网络算法，避免了地海杂波建模，从根本上克服了传统方法所面对的困难。如图 3-9 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训练深度卷积神经网络；利用模型对新得到的雷达频谱数据进行识别，获得当前频谱数据的识别结果。

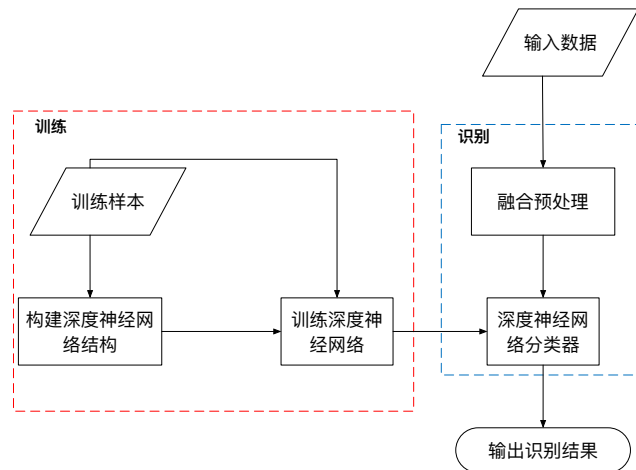


图 3-9 地海杂波识别技术结构图

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的主要挑战与难点在于

网络模型的设计。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层，以及输出层。如图 3-10所示，本章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。

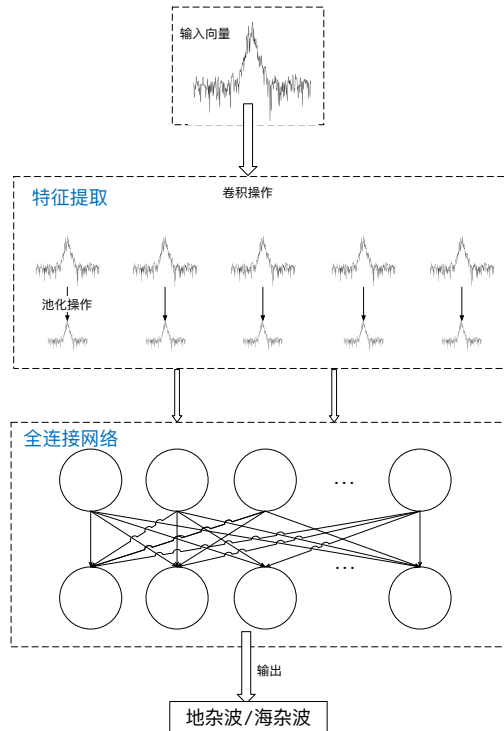


图 3-10 特征提取和全连接网络

本章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关于零频对称的 Bragg 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，这种基于深度卷积神经网络的方法很适合本章的问题。

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。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，构建了一个具有六层的深度卷积神经网络，如图 3-11所示，每层从提取输入的卷积滤波器的特征导出多个特征向量，每个特征向量具有多个神经元。构建神经网络结构的基本步骤

为：

步骤 1: 输入地海杂波频谱数据（此处以大小为 $1 \times N$ 的输入序列为例），对其进行卷积运算，得到第一个卷积层。本章经过不同参数的试验对比结果，最终确定使用 32 个大小为 1×3 的卷积核，故特征向量中每个神经元与输入中的 1×3 的邻域相连，这样此卷积层中的特征大小就为 $1 \times (N - 3)$ 。又因为该卷积层有 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 $(1 \times 3 + 1) = 128$ 个参数），共 $128 \times (N - 3)$ 个连接，将连接通过 ReLU 激活函数。

步骤 2: 对卷积层进行最大池化处理，该操作采用一个特征代替相邻的多个特征。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，可以得到一个六层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 dropout 参数，然后添加第二层全连接并通过激活函数 Sigmoid，输出识别结果。

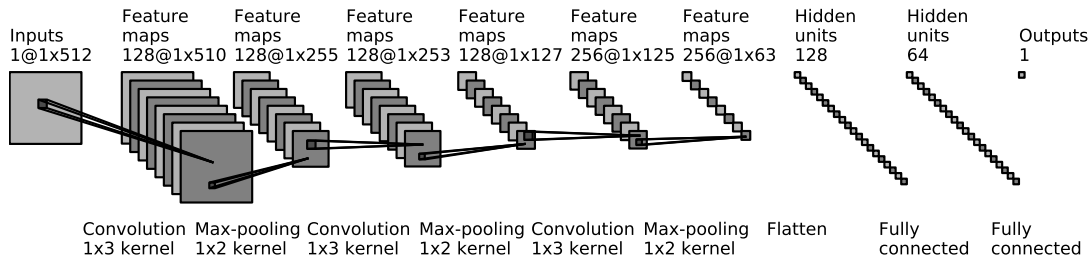


图 3-11 卷积神经网络结构

训练算法

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。地海杂波识别问题由于分开训练不同相干积累点数和多普勒频率范围的数据，故首先需要对不同的数据进行分类处理并标注其地海杂波类型，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。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。这其中一个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。

传统的神经网络优化方法是随机梯度下降，通过计算每次迭代的梯度更新参数。然而，这种方法有两个缺点：一个是学习率的选择比较困难，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。

本章不仅考虑梯度，同时考虑包含梯度变化的信息，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，使得参数更加平稳。传统的梯度下降更新规则为 $\theta \leftarrow \theta' = \theta - \eta \nabla C$ ， θ 表示需要学习的参数， η 为学习速率， ∇C 为损失函数的梯度，则变为：

$$v \leftarrow v' = \mu v - \eta \nabla C \quad (3-2)$$

$$\theta \leftarrow \theta' = \theta + v' \quad (3-3)$$

其中， μ 是用来控制梯度变化的超参数。据此可以得到算法流程 3-1。

算法 3-1 Adam 训练算法

输入： 训练样本 X ，样本标签 Y ，最大迭代次数 K ，步长 ε ，初始目标参数 θ

输出： 学习后的参数 θ

- 1: 初始化矩估计的期望衰变率 $\rho_1 = 0.9, \rho_2 = 0.999$ ，一阶矩与二阶矩变量 $s = 0, r = 0$ ，迭代次数 $k = 0$
 - 2: **while** $k < K$ **do**
 - 3: 从训练集中获取对应于目标 $y^{(i)}$ 的 m 个采样样本 $\{x^{(1)}, \dots, x^{(m)}\}$ ，其中 m 为批处理中一批样本的个数。
 - 4: 计算梯度 $g \leftarrow \frac{1}{m} \nabla_{\theta} \sum_i L(f(x^{(i)}; \theta), y^{(i)})$ ，其中 L 为对数损失函数，其定义为 $L(P(Y|X), Y) = -\log P(Y|X)$ 。
 - 5: 更新迭代次数 $k \leftarrow k + 1$
 - 6: 更新有偏一阶矩估计 $s \leftarrow \rho_1 s + (1 - \rho_1)g$ ，有偏二阶矩估计 $r \leftarrow \rho_2 r + (1 - \rho_2)g \odot g$ ，其中 $g \odot g$ 表示对应元素的乘积。
 - 7: 修正一阶矩估计 $\hat{s} \leftarrow \frac{s}{1 - \rho_1^k}$ ，二阶矩估计 $\hat{r} \leftarrow \frac{r}{1 - \rho_2^k}$ 。
 - 8: 更新参数 $\theta \leftarrow \theta + \Delta\theta = \theta - \varepsilon \frac{\hat{s}}{\sqrt{\hat{r} + \delta}}$ ，其中 $\delta = 10^{-8}$ 用来保持稳定性。
 - 9: **end while**
-

针对地海杂波识别这个二分类问题，本章选择逻辑损失函数来训练本章的模型：

$$L(z_i) = \log(1 + e^{-z_i}) \quad (3-4)$$

其中， $z_i = y_i(w^T x_i + b)$ ， y_i 是采样样本 x_i 的标签，其为 1 代表地杂波，0 为海杂波。

3.3.3 分类阈值设计

本章分类器的输出结果为给定回波频谱数据来自于海洋或者陆地的概率，一般使用 0.5 作为概率阈值来进行分类。但是，本章结合海洋的变化远远大于陆地导致的海洋容易被误判为陆地以及海洋或者陆地均应该是连续的这两个实际情况，对分类的概率阈值进行了设计，这将在第 3.4 节通过仿真实验进行讨论。此外，还需要根据某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，设初步结果为 $y_{m,n}$ ，其中， m 表示方位角的第 m 个单元， n 表示第 n 个径向距单元，那么，最终结果 $y_{i,j}$ 可以表示为：

$$y_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot y_{m,n} \quad (3-5)$$

其中， $w_{m,n}$ 是 (m,n) 单元处识别结果 $y_{m,n}$ 的权重， M 为利用的方位上区域单元的个数， N 为利用的径向距上区域单元的个数。

3.4 仿真验证

在本节中，本章利用实际数据评估了所提出的基于深度学习的地海杂波识别算法的性能，并与基于 LMS^[15] 的根据多普勒频谱进行分类的算法和基于支持向量机进行分类的算法^[16] 进行了对比。

3.4.1 算法实现

基于 LMS 的算法

该方法主要基于文献 [15]，其主要思想是利用加权最小均方算法来求解区域的模糊度，其中区域模糊度的定义如下：

$$f_D = f_I + f_{cur} + f_B \begin{cases} 1/2 & \text{前向海} \\ 0 & \text{陆地} \\ -1/2 & \text{后向海} \end{cases} \quad (3-6)$$

其中， f_B 是前向 Bragg 回波与后向之差， f_I 和 f_{cur} 分别是电离层动力过程和海流产生的多普勒频偏。

基于 SVM 的方法

参照文献 [16]，本章选择了如下三个特征作为分类器的特征向量：

- 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。

并利用网格搜索法对参数进行了调优。为了确保有足够的用来训练和测试的数据，本章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），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，该数据集同样被应用于基于深度卷积神经网络的分类器。

本章算法参数设置

根据图 3-11所示的结构搭建了本章的深度卷积神经网络分类器。前两个卷积层具有 32 个滤波器，第三个卷积层有 64 个滤波器。全连接层添加 dropout 参数为 0.5。利用 Adam 优化算法来训练网络，初始的学习率为 0.001，学习迭代次数为 20 次。

评估方法

分类问题的算法性能评估指标主要是分类的准确度。然而，由于此处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。由于在实际的地图中可以得到地海交界处也即海岸线处的地理位置坐标，也即可以得到该区域的形状。因此，本章设计与地图的匹配程度的评估方法来分析不同识别算法海岸线部分杂波识别的性能，其定义如下：

$$g_{C_1, C_2} = \frac{area(C_1 \cap C_2)}{\max(area(C_1), area(C_2))} \quad (3-7)$$

用 0 和 1 来二值化地图区域，如图 3-12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 的匹配度。

3.4.2 仿真结果分析

首先利用四组数据对三种算法进行对比分析，实验结果如表 3-1所示，可以明显的看到，本章提出的基于 CNN 的算法的识别正确率最优。



图 3-12 二值化地图

表 3-1 三种算法的识别精度对比

数据集	CNN	SVM	LMS
组 A	96.97%	85.69%	81.85%
组 B	97.14%	88.57%	81.93%
组 C	99.04%	89.03%	88.57%
组 D	99.69%	91.61%	90.33%

选取 CNN 识别错误的结果进行分析，发现大部分识别错误的结果数据特征十分不明显，即使是人工也无法很准确地判定，如图 3-13 所示。

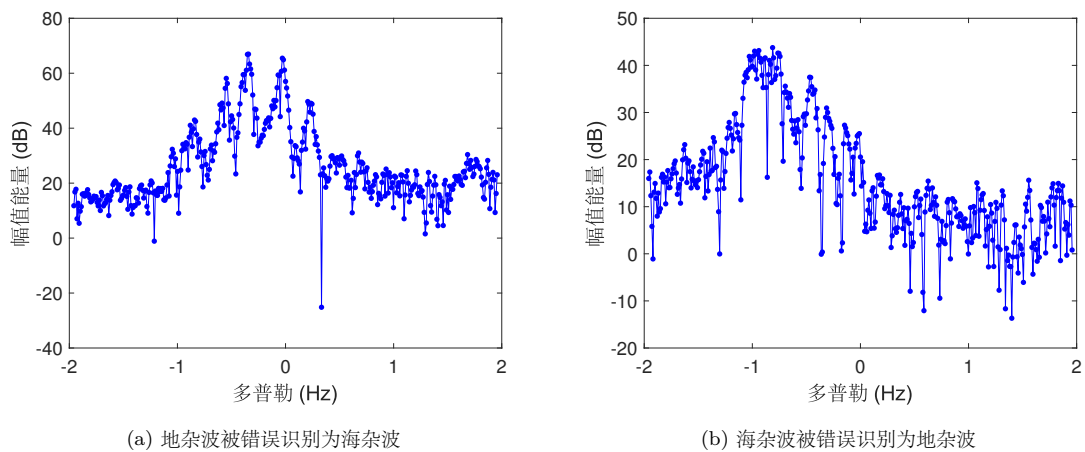


图 3-13 识别错误的结果

由于数据集自身的一些限制条件，本章选择在组 D 所在的数据集进行了地图匹配

度的比较实验。从表 3-2可以看出，基于 CNN 的算法在匹配度方面要远高于其余两种方法，证明了本章算法在地海边界处仍然可以保持很高的精度。

表 3-2 匹配度对比

	CNN	SVM	LMS
匹配度	0.92	0.23	0.21

为了验证迭代次数对本章基于深度卷积网络算法的影响，本章对不同组数据在不同迭代次数下进行了实验，结果如图 3-14所示，结果表明本章提出的算法可以在不同的数据集组中均可以较快的收敛。组 A 的数据集由于频率和相干累计点的比例最小导致其所包含特征最小，而需要较多的迭代次数。图 3-15表明即使在数据量很小的情况下，本章的算法仍保持着很高的准确率。

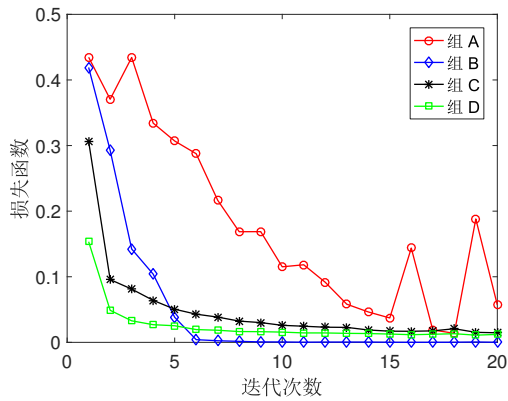


图 3-14 不同数据集损失函数随迭代次数变化图

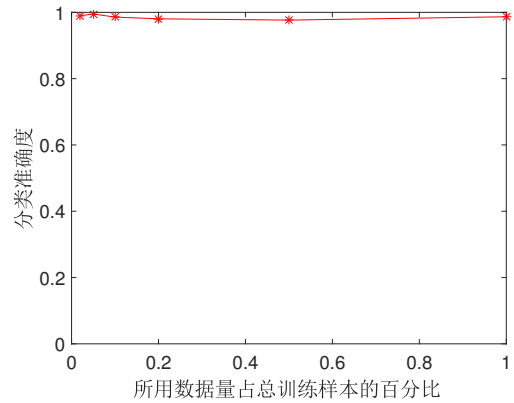


图 3-15 不同数量数据集的分类准确度曲线图

由于卷积神经网络的参数对最终分类识别的准确率起着重要的作用，本章对参数的选择进行一些分析。首先分析了批长度（Batch Size）和迭代次数变化时，验证集数据的分类准确度。图 3-16表明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。

本章在预处理阶段利用了滑窗算法对输入数据进行融合处理来减少由于某一帧数据中某距离方位单元上的随机噪声对识别结果的影响，此处对窗长参数变化对结果的影响进行测试比较。本章主要考虑到电离层会随时间发生变化且天波雷达的采样周期较长，过长的窗长无法及时响应电离层的变化，影响识别准确率及与地图的匹配度。为了选取一个合适的窗长，本章首先利用不同窗长平均融合后的数据进行测试，得到图 3-17的结果，该结果证明了在窗长过长时，匹配度会下降的结论，当窗长过大时匹配度

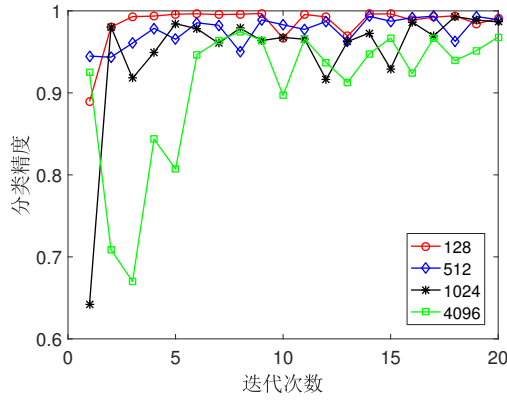


图 3-16 不同批长度下，分类准确度与迭代次数曲线图

会降到比窗长为 1 时还要低。为了进一步比较权重的变化对识别结果的影响，选取公式 (3-1) 中的权重为 $w_N = \frac{1}{2}$, $w_k = \frac{1}{2(N-1)}$, $k = 1, 2, \dots, N-1$ ，得到如图 3-18所示的结果。由于增加了主单元的权重，故在窗长增加时，匹配度没有明显下降。

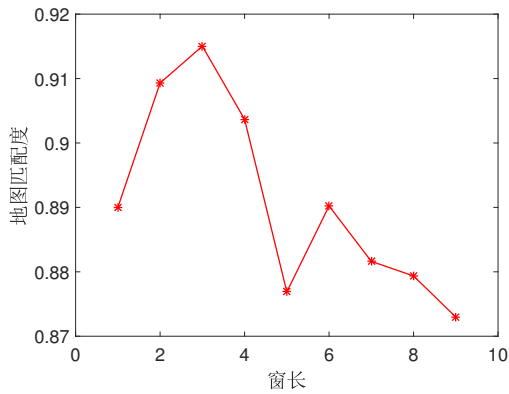


图 3-17 匹配度与融合窗长对比曲线图

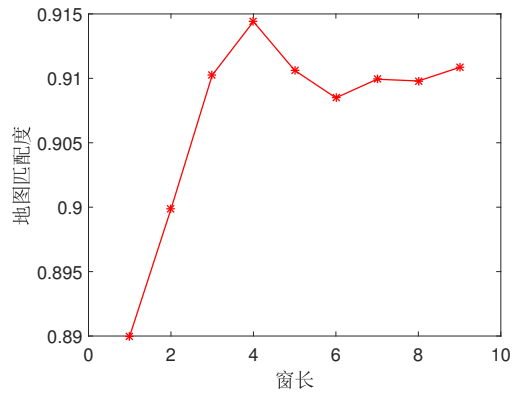


图 3-18 更改权重后不同窗长匹配度结果对比曲线图

为了找出区分识别结果中海洋与陆地的最佳概率阈值，本章使用不同的概率阈值计算相同测试数据的正确率。图 3-19显示，当阈值增大时，分类识别精度也随之提高，但精度的提高速度越来越慢，直至平稳。另一方面，当阈值仅为 0.01 时，识别率仍高于 0.86。这说明本章方法的分类结果的概率值均处于较高的水平，如 3-20所示。

为了验证本章提出的深度卷积神经网络地海杂波识别算法是否具有实时识别的能力，在 CPU 为 i5-3.30GHz、运存为 1GB 的 Linux 虚拟机运行本章的算法程序，对整帧的实际雷达数据（共 20400 个分辨单元，每个分辨单元的相干积累点数为 1024），其识别过程中占用内存峰值为 178.5MB，识别时间为 0.494141 秒，其具备实时运行的能力。

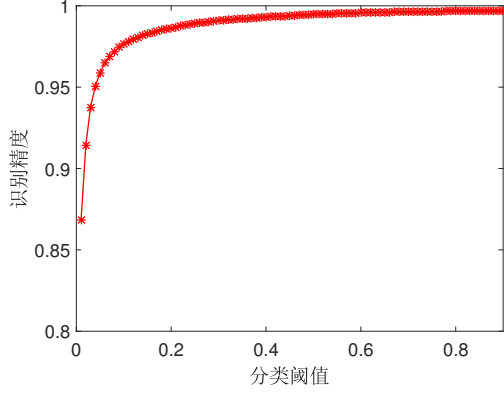


图 3-19 识别率与概率阈值曲线图

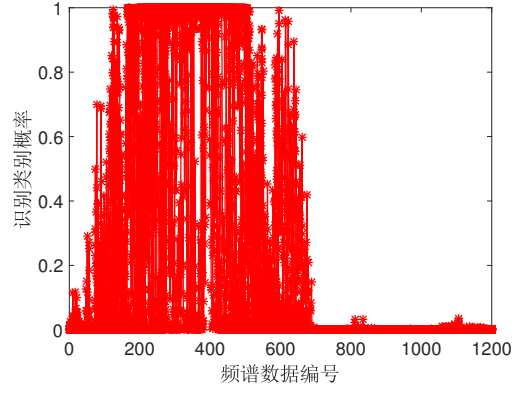


图 3-20 不同帧数据识别结果概率值

3.4.3 特征可视化

上一节利用大量测试数据的识别结果以及地图匹配结果对基于卷积神经网络的算法进行了验证，但是卷积神经网络方法有一个问题是其是黑盒操作，无法直观地看到其用于分类的特征。因此，为了在理论上对本章算法的有效性进行分析。本节使用基于梯度变化的可视化方法，其思想为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输出梯度的影响，从而得到该频谱数据热力图。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，可以得到公式 (3-8)：

$$p(S) = w^T S + b \quad (3-8)$$

其中 w 和 b 分别是模型的权重和偏差。实际上，权重 w 表示对应点的重要性。在本章提出的模型中，类概率函数 $p(S)$ 是高度非线性函数，可以使用泰勒方法近似 $p(S)$ 。为了简化计算，使用一阶泰勒展开：

$$w = \frac{\partial p}{\partial S} \Big|_{s_i} \quad (3-9)$$

因此，可以通过反向传播计算得到 w 的公式 (3-9)。图 3-21 显示，特征点主要集中在预期的数据上。

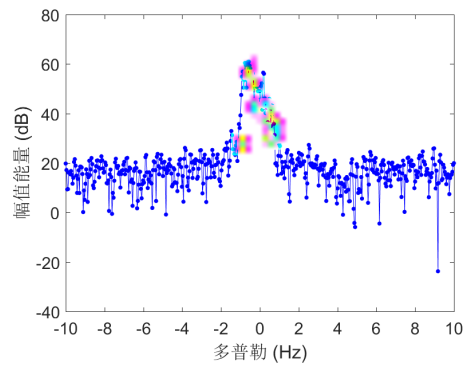


图 3-21 特征重要程度热力图

3.5 小结

本章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。该方法主要克服了基于 LMS 的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的操作复杂度高、分类精度低等缺点。通过与这两种算法进行了对比实验，结果表明本章提出的方法在地海杂波识别问题上更加有效且具有更强的抗干扰性能，且在地图匹配结果方面显著优于其余两种方法。在更高精度的识别结果的帮助下，可以得到更加精确的修正系数，从而为目标定位问题提供更大的帮助。

4 基于深度嵌入卷积聚类方法的地海杂波无监督分类

4.1 引言

聚类方法如今已经在各个领域得到了广泛应用,但是传统的聚类算法的性能受数据维数以及样本数据量的影响,会产生维数灾难的问题。对数据集规模较大的情形,有一些研究只选择数据集的一个子集来加速聚类过程^[88]。为了解决计算复杂度的问题,以往的研究往往首先将高维度的数据映射到低维,然后将嵌入数据聚类到这个新的子空间中^[89]。这类算法可以分为两个阶段:特征学习和聚类,其主要思想是向目标函数中添加表征稀疏性或者是图形约束的先验知识进行训练学习^[90]。

特征学习指的是一类试图利用一组通常稀疏的特征向量来描述一个数据集的学习方法。在实践中,有很多不同的算法可以进行特征学习,包括自编码器、高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)和受限玻尔兹曼机。这些方法主要学习一个近似局部滤波器字典^[91],例如用于自然图像的 Gabor 类边缘滤波器或者用于 MNIST 数字数据集的书写笔划。

后来,文献 [92] 提出了共同完成特征学习和聚类的算法,深度嵌入聚类算法(Deep Embedding Clustering, DEC)。该算法以自学习的方式定义了一个用于同时更新网络和聚类中心参数的聚类损失函数。但是,深度嵌入聚类算法中使用最广泛的神经网络是堆栈自编码器。堆栈自编码器需要逐层预训练,然后以端到端(end-to-end)训练的方式进行微调。当层次增加时,预训练过程所需时间也急剧增加。此外,堆栈自编码器是建立在全连接的层次上,对处理局部信息是无效的。

本章安排如下:4.2节对卷积自编码网络进行了介绍,4.3节构建了本章利用的深度嵌入卷积聚类器,通过利用卷积自编码器对输入地海杂波进行重构,然后利用本章提出的聚类损失函数进行训练,最终获得聚类结果,4.4节利用实际数据对本章提出的算法性能进行了分析讨论,4.5节进行本章总结。

4.2 卷积自编码网络

4.2.1 自编码器

自编码器是一种利用隐层重构输入的神经网络。其模型如图 4-1所示,它由编码器(Encoder)和解码器(Decoder)两部分组成,本质上是对输入信号的某种变换。对一组

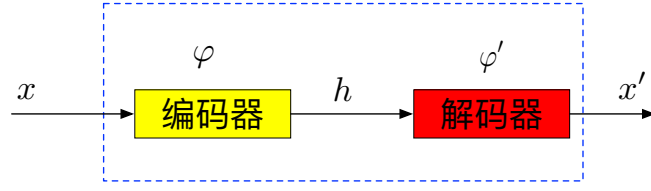


图 4-1 自编码器模型

具有 N 个输入向量的给定输入数据集，编码器将第 i 个输入信号 $x^{(i)} \in \mathbb{R}^{d_x}$ 编码到某个隐层的表示 $h^{(j)} \in \mathbb{R}^{d_h}$ ， d_x 和 d_h 分别为输入表示和隐层表示的维数，然后解码器再将 $h^{(j)}$ 解码为输出 $x'^{(i)} \in \mathbb{R}^{d_x}$ 。通过最小化 $x^{(i)}$ 与 $x'^{(i)}$ 之间的差距，可以训练得到一个用来重构输入特征的映射。

编码和解码公式如下：

$$h_n^{(j)} = f(b_n + \sum_{m=1}^{d_x} w_{mn} x_m^{(i)}) \quad (4-1)$$

$$x_m'^{(i)} = f(b'_m + \sum_{n=1}^{d_h} w'_{mn} h_n^{(j)}) \quad (4-2)$$

其中， f 是激活函数函数， $W = [w_{mn}]$ 和 $W' = [w'_{mn}]$ 分别为编码器和解码器的权重矩阵， $b = [b_n]$ 和 $b' = [b'_m]$ 分别为编码器和解码器的偏置向量。

在此基础上，国内外广大学者对自编码器进行了各种改进，提出了可以学习输入空间中扰动不变的特征的压缩自编码器^[93]、利用高效的变分方法进行训练和生成推理的变分自编码器^[94] 以及可以基于连续的数据流在运行中添加或合并隐层单元的在线增量自编码器^[95]。

4.2.2 卷积自编码器

传统的自编码网络只有一个隐层，只能学习出一种特征变化，于是 Bengio^[96] 等人在 2007 年的仿照 stacked RBM 构成的 DBN，提出堆栈自编码器（Stacked Autoencoders, SAE），为非监督学习在深度网络的应用又增加了一种重要的思路方法。堆栈自编码器模型可以参看图 4-2，其通过逐层非监督学习的预训练，也即逐层初始化（Layer-wise Pre-training），来初始化深度网络的参数，替代传统的随机初始化的方法。预训练完毕后，利用训练参数，再进行监督学习训练。

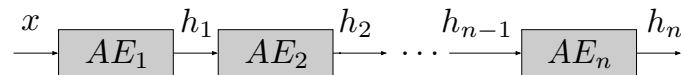


图 4-2 堆栈自编码器模型

全连接自编码器和深度自编码器都忽略了数据的局部结构信息。这在处理实际大小的输入时不仅是一个问题，而且在参数中引入冗余，迫使每个特征是全局的。然而，在视觉和对象识别领域最成功的模型^[97] 均主要利用了在整个输入空间发生重复的局部特征。基于此，文献 [98] 提出了一种卷积自编码器 (Convolutional Autoencoders, CAE)。卷积自编码器不同于传统的自编码器，它们的权重在输入向量中的所有位置之间共享，从而可以保持空间局部性。因此重构结果是隐层局部特征的线性组合。从结构的角度看，CAE 类似于 SAE，但是将 SAE 中的全连接神经网络变为了卷积神经网络。参考第 2 章公式 (2-16)，设输入为 x ，第 k 个特征映射的隐层表示则由公式 (4-3) 给出：

$$h^k = f(x * W^k + b^k) \quad (4-3)$$

其中 b^k 是全局共享的偏置， f 是激活函数， $*$ 表示卷积操作。公式 (4-3) 生成的隐层表示是输入 x 在低维空间中的编码，由于自编码器的目标是从所生成的特征映射重构输入 x ，因此需要相应的解码操作。卷积自编码器是完全卷积网络，因此解码操作也是一个卷积操作，一般称为反卷积操作 (Deconvolution) 或者转置卷积 (Transposed Convolution)。

隐层表示 h^k 被用来作为解码器的输入，为了使得解码器的输出和原始的输入数据具有相同的结构，解码器反卷积的超参数由编码器的结构确定，因此，解码器的重构过程的计算公式为：

$$x'^k = f\left(\sum_{k \in H} h^k * \tilde{W}^k + b'^k\right) \quad (4-4)$$

同样的，每一个输入通道只有一个偏置 b'^k ， H 表示所有特征图的集合， \tilde{W} 表示在两个维度上进行翻转操作后的权重。

正如第 2 章介绍，一般的分层网络特别是卷积神经网络，通常引入池化层来获得平移不变性。因此本章的卷积自编码器在编码器阶段添加了池化层，相应的在解码器阶段需要添加上采样来进行处理，如图 4-3 所示。

模型参数 $\Theta = \{W, b, b'\}$ 通过最小化其损失函数进行求取，一般利用均方误差损失函数 (mean squared error, MSE)：

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - x'_i\|_2^2 \quad (4-5)$$

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \mathcal{L} \quad (4-6)$$

就像标准的神经网络一样，反向传播算法被用来计算相对于参数的误差函数的梯度，则可以得到：

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W^k} = x * \Delta h^k + \tilde{h}^k * \Delta x' \quad (4-7)$$

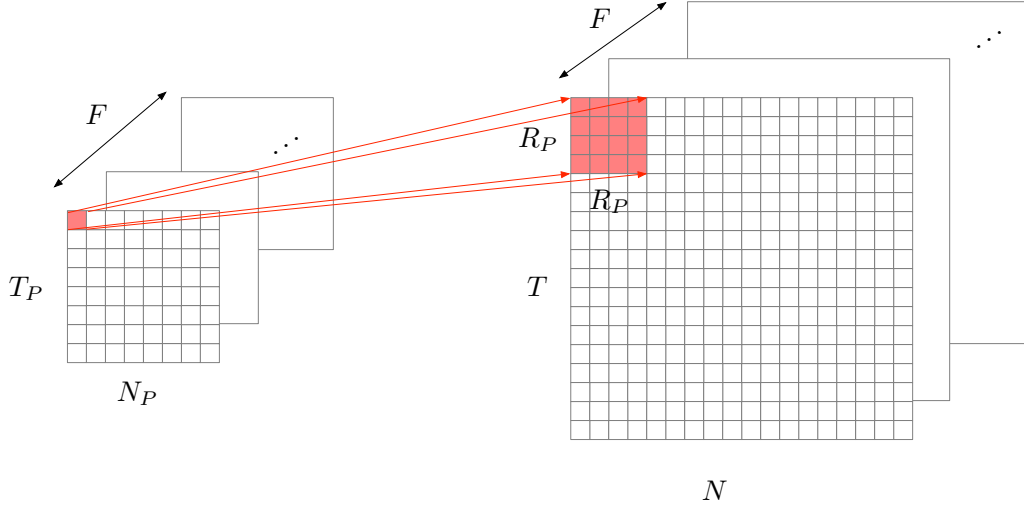


图 4-3 上采样示意图

Δh 和 $\Delta x'$ 分别是隐层状态和重构结果的变化量，然后可以使用随机梯度下降（SGD）等基于梯度的优化算法来更新权重。

本节介绍了一种用于分层特征提取的无监督方法，卷积自编码器。相比于传统自编码器，其更有利于学习数据的局部结构，避免特征空间的失真。虽然卷积自编码器的过完备隐层表示使得其学习比标准自编码器更难，但是可以通过添加池化层加强其稀疏性来在一定程度上降低计算量。

4.3 深度嵌入卷积聚类方法

深度嵌入聚类算法^[92]提供了一种以无监督的方式学习特征表示并聚类的思路，通过联合优化神经网络和聚类中心提高了聚类算法的性能和鲁棒性。但是，该算法由于利用了堆栈自编码器，无法利用数据的局部特征信息，因此本章在此基础上利用卷积自编码器代替传统的堆栈自编码器，提出了深度嵌入卷积聚类方法（Deep Embedding Convolution Clustering, DECC）。

4.3.1 深度嵌入卷积聚类方法结构

首先进行问题描述，假设需要将 N 个样本 $X = [x_1, \dots, x_N]$ 聚为 K 个类别，其聚类中心点为 μ_1, \dots, μ_K ，其中每一个样本 $x_i \in \mathbb{R}^{d_x}$ ，由于当样本维数增大时会产生维数灾难的问题，因此需要引入一个嵌入函数 $\varphi_W: X \rightarrow Z$ ，可以将原始样本映射到嵌入子空间 $Z = [z_1, \dots, z_N]$ ，其中 $z_i \in \mathbb{R}^{d_z}$ 的维数远小于原始样本的维数，也即 $d_z \ll d_x$ 。然后，利用 K-均值聚类算法，将子空间 Z 进行聚类，得到初始聚类中心 μ_k 。

本章利用卷积自编码器作为嵌入函数对原始样本进行降维，其结构如图 4-4 所示。通过三次卷积操作充分提取输入样本的特征，同时也在所有层添加 ReLU 激活函数，并且在编码器后以相反的顺序放置反卷积解码器。在编码器与解码器中间添加嵌入层（图 4-4 中绿色标记的全连接层），该层的结果被用于进行聚类操作。DECC 的结构如图 4-5 所示。

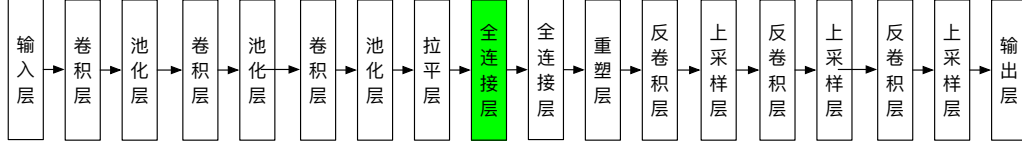


图 4-4 卷积自编码器结构图

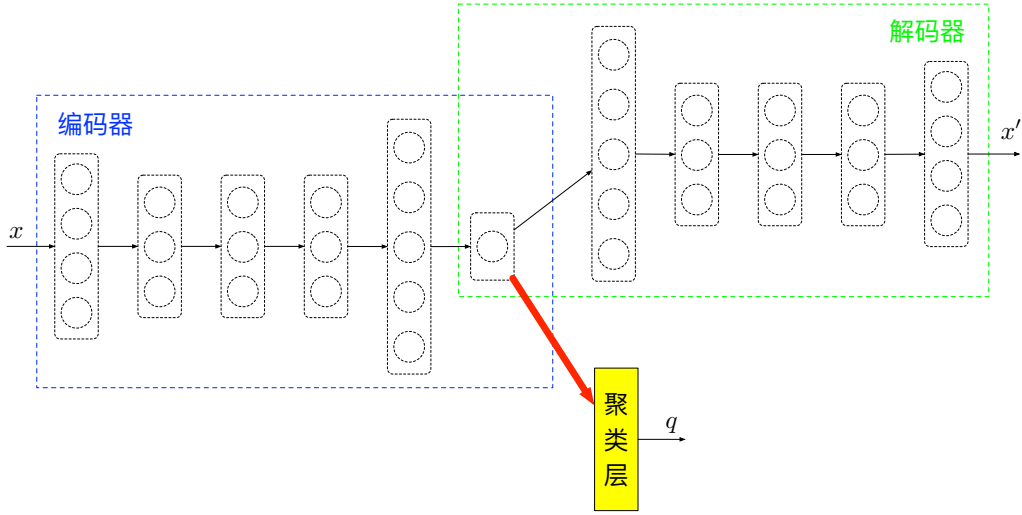


图 4-5 深度嵌入卷积自编码器结构图

4.3.2 KL 散度聚类方法

文献 [99] 利用学生 t 分布来衡量嵌入点 z_i 与聚类中心点 μ_k 的相似度：

$$p_{ik} = \frac{(1 + \|z_i - \mu_k\|^2/\alpha)^{-\frac{\alpha+1}{2}}}{\sum_{k'} (1 + \|z_i - \mu_{k'}\|^2/\alpha)^{-\frac{\alpha+1}{2}}} \quad (4-8)$$

其中， α 为学生 t 分布的自由度， p_{ik} 可以看作样本 i 到类别 k 的概率。

为了定义本章的聚类目标函数，可以使用辅助目标变量（auxiliary target variable） Q 来迭代地改进模型预测。首先用 Kullback-Leibler (KL) 散度来减小模型预测 P 和目标分布 Q 之间的距离。

$$\mathcal{L}_{kl} = KL(Q||P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K q_{ik} \log \frac{q_{ik}}{p_{ik}} \quad (4-9)$$

根据文献 [92]，目标分布 Q 的定义如下：

$$q_{ik} = \frac{p_{ik}^2 / f_k}{\sum_k (p_{ik}^2 / f_k)} \quad (4-10)$$

其中 f_k 的定义为

$$f_k = \sum_i q_{ik} \quad (4-11)$$

公式 (4-6) 给出了自编码器重构的损失函数，故最终的损失函数为：

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{mse} + \beta \mathcal{L}_{kld} \quad (4-12)$$

其中， $\beta > 0$ 为调节两部分损失函数的权重。

4.3.3 学习算法

本章利用随机梯度下降和反向传播对公式 (4-12) 中的损失函数进行学习。根据上一节的描述可知，总共有三类参数需要学习：卷积自编码器的权重、聚类中心以及目标分布 Q 。

更新卷积自编码器的权重和聚类中心

对一个给定的目标分布 Q ，那么聚类损失 \mathcal{L}_{kld} 相对于嵌入点 z_i 和聚类中心点 μ_k 的梯度计算公式如下：

$$\frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial z_i} = 2 \sum_{k=1}^K (1 + \|z_i - \mu_k\|^2)^{-1} (q_{ik} - p_{ik}) (z_i - \mu_k) \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial \mu_k} = 2 \sum_{i=1}^N (1 + \|z_i - \mu_k\|^2)^{-1} (p_{ik} - q_{ik}) (z_i - \mu_k) \quad (4-14)$$

$$(4-15)$$

那么对于一个小的批次 m 和学习率 λ ， μ_k 的更新公式为：

$$\mu_k = \mu_k - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial \mu_k} \quad (4-16)$$

编码器的权重更新公式为：

$$W = W - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial \mathcal{L}_{mse}}{\partial W} + \beta \frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial W} \right) \quad (4-17)$$

解码器的权重更新公式为：

$$W' = W' - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathcal{L}_{mse}}{\partial W'} \quad (4-18)$$

更新目标分布

根据公式 (4-10) 可知, 目标分布 Q 依赖于先验的软指派 (soft assignment) P 。因此, 为了提升结果的鲁棒性, 本章利用全部嵌入点每隔 T 次迭代对目标分布进行更新, 其更新主要利用公式 (4-8) 和公式 (4-10)。并且每次完成更新后, 重新计算样本 x_i 的指派:

$$s_i = \arg \max_k p_{ik} \quad (4-19)$$

当相邻两次更新的指派变化小于一个阈值 δ 时, 停止迭代, 那么则可以得到整个算法流程图。

算法 4-2 DECC 算法学习过程

输入: 训练样本 X , 聚类结果个数 K , 最大迭代次数 $iter_{max}$, 目标分布更新间隔 T , 初始目标参数 θ , 学习率 η

输出: 卷积自编码器编码器的权重 W 和解码器的权重 W' , 聚类中心 μ , 指派标签 s

```

1: 初始化迭代次数  $iter = 1$ 
2: 只利用重构损失函数对卷积自编码器进行训练, 获得初始权重  $W$  和  $W'$ 
3: 利用 K-均值聚类算法获得初始聚类中心  $\mu$ 
4: while  $iter < iter_{max}$  do
5:   if  $iter \bmod T = 0$  then
6:     计算所有嵌入点  $z_i = \varphi_W(x_i), i = 1, \dots, N$ 
7:     将公式 (4-8) 代入公式 (4-10) 更新目标分布  $Q$ 
8:     保存上一次指派  $s_{last} = s$ 
9:     计算新的指派  $s_i = \arg \max_k p_{ik}, i = 1, \dots, N$ 
10:    if  $sum(s_{last} \neq s)/N < \delta$  then
11:      停止学习
12:    end if
13:  end if
14:  从训练集中获取  $m$  个采样样本  $\{x^{(1)}, \dots, x^{(m)}\}$ , 其中  $m$  为批处理中一批样本的个数。
15:  更新聚类中心  $\mu_k = \mu_k - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial \mu_k}$ 
16:  更新编码器权重  $W = W - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m (\frac{\partial \mathcal{L}_{mse}}{\partial W} + \beta \frac{\partial \mathcal{L}_{kld}}{\partial W})$ 
17:  更新解码器权重  $W' = W' - \frac{\lambda}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathcal{L}_{mse}}{\partial W'}$ 
18: end while

```

4.4 仿真实验验证

本章利用第 3 章中组 C 的训练数据用于本章的实验, 考虑到地海杂波在时间与空间上的连续性, 本章选取了相邻 3 帧, 相邻 9 个单元供 27 个单元的杂波信号将其进行组合, 并进行随机重排复制得到一个 128×128 的二维数据, 其示意图参看图 4-6。本章根据图 4-4 设计的卷积自编码器进行特征的降维, 该部分进行 30 次迭代, 学习方法为 Adam, 嵌入层为 10 维, 也即利用 10 维的特征向量对原始输入信号进行表示。然后根据此特征向量, 随机进行 20 次 K-均值算法, 然后从中选取最优结果作为起始的聚类中心点, 此也作为本章的一个对比算法。损失函数的权重系数 $\beta = 0.1$, 学生 t 分布的

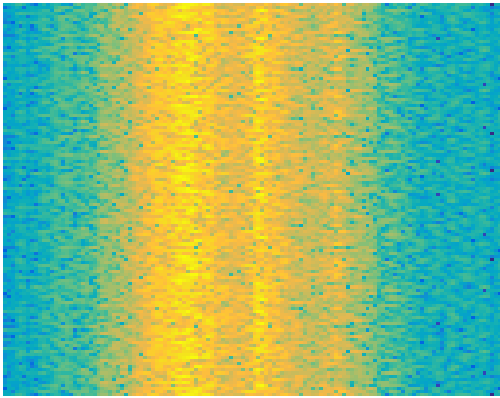


图 4-6 输入样本示意图

自由度 $\alpha = 1$ 。最终的优化问题通过小批量随机梯度下降和反向传播得到有效解决，其中批长度为 256，学习率为 0.01。

本章对比了不同算法的无监督聚类精度 (ACC)、归一化信息 (Normalized Mutual Information, NMI) 和调整兰德指数 (Adjusted Rand Index, ARI)，来比较不同算法的聚类结果的准确率、聚类结果与真实情况的相似程度及每个类内的纯度等信息，实验结果如表 4-1所示。实验结果证明本章提出的利用深度嵌入卷积算法的正确度相比于 K-均值算法有了显著的提高，而添加了重构损失函数后的结果又有了进一步的提高。但是由于卷积运算的计算量比较大以及多个损失函数共同作用导致聚类收敛迭代次数要大于仅利用全连接网络的 DEC 算法。DECC 与 DEC 的聚类收敛结果的对比，如图 4-7和 4-8所示，可以发现 DEC 算法的收敛速度很快，但是精度不如 DECC 算法。

表 4-1 无监督聚类精度对比表

方法	无监督聚类精度	归一化互信息	调整兰德指数
DEC	94.88%	0.73	0.81
CAE + K-均值	88.68	0.58	0.60
DECC ($\beta = 0$)	95.63% 0.78	0.83	
DECC	97.85%	0.86	0.92

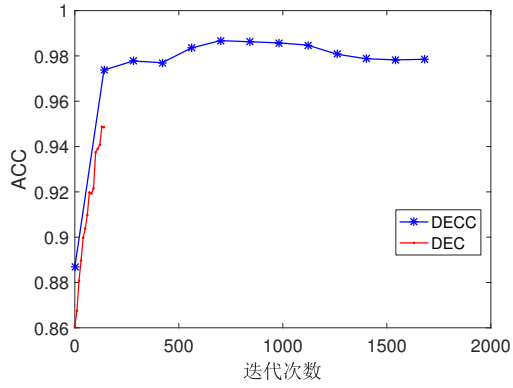


图 4-7 DECC 与 DEC 聚类精度对比图

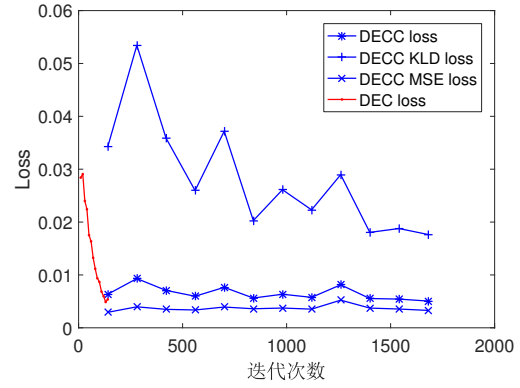


图 4-8 DECC 与 DEC 损失函数对比图

4.5 小结

本章结合卷积神经网络与自编码器提出了深度嵌入卷积聚类方法，其通过利用卷积自编码器进行提取并在损失函数中将 KL 散度与重构损失两部分结合，有效提高了聚类精度。虽然与有监督学习算法相比，本章的算法精度仍需进一步提高，但是无监督学习的特性使得其避免了繁琐的标定过程。

5 基于深度学习的辐射源识别

5.1 引言

辐射源识别算法需要在无法收集大量数据的前提下正确的对目标进行分类并准确区分出已知目标和未知目标。与传统利用已知类别的样本进行训练测试的机器学习算法不同，本站的问题是在 Open Set 的背景下，需要考虑输入未知分类样本的情况。由于在复杂电磁环境下传统的辐射源个体识别面临识别能力差和无法识别未知目标等问题与挑战，因此需要寻找一种新的方法解决该问题。

本章综合雷达信号处理、深度学习等多学科理论，通过对实际数据的分析，结合深度卷积神经网络与支持向量机方法，以雷达信号的模糊函数切片作为训练样本的特征向量，构建了一个可以对未知分类进行辨识的分类器。最后，利用实际数据进行验证，证明本章提出的分类器具有很高的准确性。

本章安排如下：5.2节对辐射源信号进行了分析，并对其进行预处理，求取其模糊函数切片，5.3节构建了本章的 Open Set 分类器，详细地阐述了深度卷积神经网络主分类器与支持向量机 Meta-Recognition 的设计过程，5.4节利用实际数据对分类器已知分类识别和未知分类辨别的性能进行了验证，5.5节进行本章总结。

5.2 辐射源信号分析

对辐射源信号的分析处理，本章主要考虑两方面：信号预处理、特征提取优化。本章所获得的信号为雷达辐射源的 I/Q 两路数据，这是一种在雷达信号处理领域常见的用来描述信号的方法。其中 I 表示 In-Phase，即同相；Q 表示 Quadrature，即正交，与 I 相位之差为 90 度。设需要表示的信号峰值幅度为 A 、相位角为 ϕ ，则有：

$$I = A \cos \phi \quad (5-1)$$

$$Q = A \sin \phi \quad (5-2)$$

也即可以利用公式 (5-3) 表示信号：

$$Ae^{i\phi} = A(\cos(\phi) + i \sin(\phi)) = I + Qi \quad (5-3)$$

从而可以根据公式 (5-1) 和公式 (5-2) 利用 I/Q 数据求取信号的峰值幅度和相位角：

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (5-4)$$

$$\phi = \tan^{-1}(Q/I) \quad (5-5)$$

在完成信号形式的转换后，首先需要对信号进行初步的预处理，剔除无用和错误的数据。在特征提取优化方面，合理的特征是分类识别的基础。由于存在相同型号的辐射源，利用简单的参数特征无法很好的完成辐射源的个体识别，但是在实际中辐射源自身存在相位噪声以及各类杂散输出，此部分特征可以用来区分出型号、参数均相同的辐射源，因此需要选取一种可以提取雷达辐射源这种无意调制产生的信号脉内细微特征的方法。模糊函数不仅能描述辐射源信号的分辨特性与模糊度，还能描述由雷达辐射源信号所决定的测量精度、杂波抑制特性等，通过模糊函数在时延和频偏这两个维度上的变换，可以多角度的刻画出无意调制对发射信号的影响，最终选取了利用雷达模糊函数挖掘辐射源的特征。

5.2.1 模糊函数

信号 $x(t)$ 的瞬时自相关函数为 $R_x(t, \tau) = x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)$ ，其中 τ 为时延，模糊函数的定义为，

$$A(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(t, \tau) e^{j2\pi\nu t} dt \quad (5-6)$$

即 $R_x(t, \tau)$ 关于时间 t 的傅里叶反变换。

为了方便在数字信号中使用，公式 (5-6) 可以经过变换等价于公式 (5-7) 的形式：

$$A(\tau, \nu) = \int_0^\tau x(t)x^*(t + \tau)e^{j2\pi\nu t} dt \quad (5-7)$$

对信号均匀采样，即对接收信号和参考信号离散化后，公式 (5-7) 可以表示为：

$$A(\tau_l, \nu_m) = A(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^*(n+l)e^{\frac{j2\pi mn}{N}} \quad (5-8)$$

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

此处以一个简单的单载频矩形脉冲信号来展示模糊函数特征提取的作用，图 5-1 为模糊函数图，可以发现模糊函数存在一定的冗余，其主要变化均处于 0 时偏和 0 频偏附近。为了减小计算量，本章在频偏为 0 附近取不同时间延迟的切片作为信号特征，可以有效地提取信号的相位噪声和杂散输出等个体特征，并且此处受噪声的干扰较小，更加稳定。图 5-2 即为在频偏为 0 处的单载频矩形脉冲信号模糊函数切片。

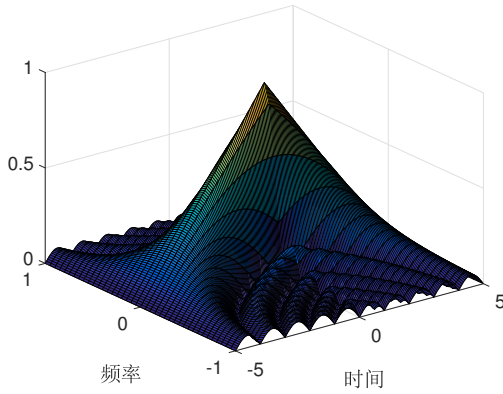


图 5-1 单载频矩形脉冲信号模糊函数图

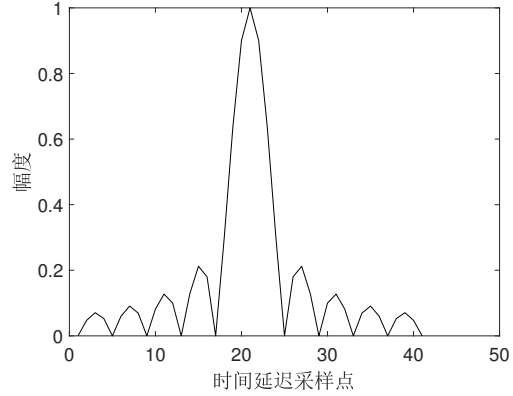


图 5-2 单载频矩形脉冲信号模糊函数切片

5.3 Open Set 分类器设计

通常的识别或者分类系统仅考虑的是一个闭集分类系统，然而在现实世界中，这种分类系统会遇到很大的问题。由于其最基本的假设是所有的类别均为先验已知，那么就会出现一些问题，例如在训练样本中不存在类别的样本就会被错误的分到某个类别中去。这种在训练过程提供不完整的信息，而在测试时添加未知分类的问题，称作 Open Set 识别^[100, 101]。该问题还可以描述为需要在测试过程中拒绝未知样本，Open Set 目标识别系统必须可以准确的处理以下三种类型的数据类：

- 已知的（目标）类，被标注为正训练样本的数据。
- 已知的未知（非目标）类，被标注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。

传统的机器学习算法均是针对闭集数据设计的，随着识别算法应用场景的增多和对精度要求的提高，许多学者开始了对 Open Set 识别的研究。Simonson^[102] 提出了一种称作概率融合 (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类别进行判断。Scheirer 等人^[103] 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。

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，另一方面是由于对未知辐射源无法很好的确定，无法很好的完成预警等任务。目前，学者对该问题的研究主要有两个思路：

- 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，然后对所有的输入数据进行类别的识别，将识别结果为该类别的数据作为未知分类数据。

- 针对多分类使用的 softmax 函数，可以设立阈值或者对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”），通过这种方式分辨出未知分类。

第一个思路最大的问题是实际工程中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，不适用于本章这个具有大量来自未知分类数据的问题。针对该问题，本章基于后一个思路设计了一个基于 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，然后将此类别作为一个输入，输入到一个支持向量机分类器 Meta-Recognition 中，然后利用该 Meta-Recognition 判断输入是否为未知分类。

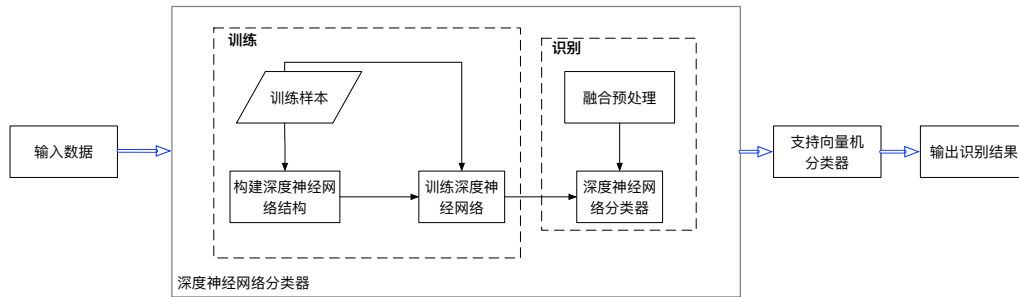


图 5-3 分类器设计结构图

5.3.1 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，设计了一个如图 5-4 所示具有 10 层的一维卷积神经网络。该分类器作为主分类器，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。

第一层是输入层，由于模糊函数切片为一个 1×1000 的向量，因此输入层大小是 1×1000 。

第二层是卷积层 $C1$ ， $C1$ 对输入向量进行一维卷积运算提取特征，卷积运算可以最大程度的提取原始信号的特征。此处利用了 256 个大小为 1×3 的卷积滤波器，其窗口移动步长为 1。

第三层是一个池化层 $S2$ ， $S2$ 层对上一层 $C1$ 做池化处理，池化的目的是在保留数据有用信息的同时，尽可能减少数据量。此处采用的是 1×2 的最大池化操作。

第四层是一个卷积层 $C3$ ， $C3$ 对 $S2$ 的特征进行卷积操作，此处利用了 128 个大小

为 1×3 的卷积滤波器。

第五层是一个卷积层 $C4$ ，其结构与 $C3$ 相同，128 个大小为 1×3 的卷积滤波器。

第六层是一个池化层 $S5$ ，其结构与 $S2$ 相同， 1×2 的最大池化操作。

第七层是一个卷积层 $C6$ ，其结构与 $C3$ 相同，128 个大小为 1×3 的卷积滤波器。

第八层是一个卷积层 $C7$ ，其结构与 $C3$ 相同，128 个大小为 1×3 的卷积滤波器。

第九层是一个池化层 $S8$ ，其结构与 $S2$ 相同， 1×2 的最大池化操作。

第十层是输出层，根据不同的类别个数选取相应的输出节点个数，首先将 $S8$ 的特征拉成一个一维向量，然后通过全连接网络与输出层进行连接，通过 Softmax 激活函数输出最终的结果。

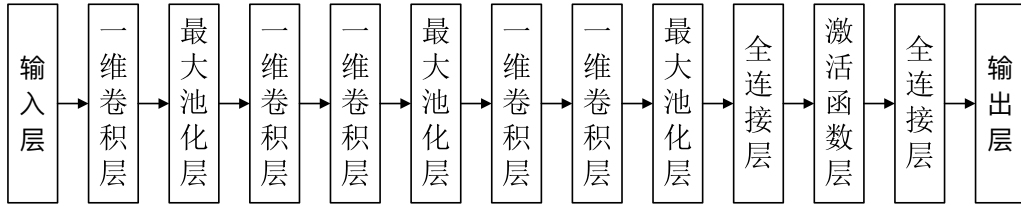


图 5-4 深度卷积神经网络框架图

5.3.2 支持向量机 Meta-Recognition 设计

支持向量机原理

支持向量机是一种流行的分类方法，它可以在不需要大量数据的情况下产生良好的结果。对于一个二分类问题，设 $((x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n))$ 为训练数据集，其中 x_i 为某样本的特征向量， $y_i \in \{-1, +1\}$ 为该样本的标签。支持向量机的思想为找到一个超平面将这些样本划分为正类（标签为 $+1$ ）和负类（标签为 -1 ），并且使得正类和负类之间的距离最大，该超平面的间隔被定义为正类与负类之间的最近距离。

对于一个线性分类问题，假设所有数据均满足约束：

$$\begin{aligned} w \cdot x_i + b &\geq +1 & y_i &= +1 \\ w \cdot x_i + b &\leq -1 & y_i &= -1 \end{aligned} \quad (5-9)$$

其中 w 为超平面的法向量， $\frac{|b|}{\|w\|}$ 是从超平面到原点的垂直距离， $\|w\|$ 是向量 w 的欧拉范数。将上述两个式子合并得到：

$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad \forall i \quad (5-10)$$

公式 (5-10) 中的训练样本构成了图 5-5 中的分类平面 H_1 与 H_2 ，间隔 ρ 可以通过计算

H_1 与 H_2 的距离得到:

$$\rho = \frac{|1-b|}{\|w\|} - \frac{|-1-b|}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|} \quad (5-11)$$

因此求解标准分类超平面的最大间隔的问题, 就转变为一个优化问题:

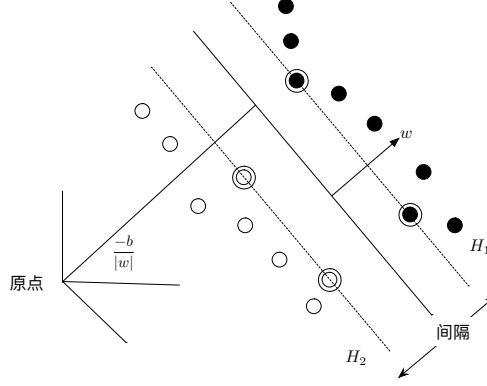


图 5-5 标准分类平面, 即具有最大间隔的超平面。被圈起来的样本组成超平面, 这些样本被称作支持向量。

$$\min_{w \in \mathcal{H}} \tau(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad s.t. \quad y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad \forall i \quad (5-12)$$

为了更好表示约束, 可以用拉格朗日优化算法对公式 (5-12) 重新表示:

$$\min_{w, b} L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i (x_i w + b) + \sum_{i=1}^l \alpha_i \quad (5-13)$$

其中 $\alpha_i \geq 0$ 为约束条件。

在实际计算过程中, 可以通过对偶定义求解优化方程式 (5-13), 通过最大化方程式 (5-13) 相对于 α 来求取其相对于 w 和 b 的最小值。利用 Karush-Kuhn-Tucker 条件, 公式 (5-13) 变为对偶形式:

$$\max_{\alpha} L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j \quad s.t. \quad \forall i \begin{cases} \sum_i \alpha_i y_i = 0 \\ \alpha_i \geq 0 \end{cases} \quad (5-14)$$

因此, 通过求解该对偶优化问题, 可以得到系数 α_i , 其中满足 $\alpha_i > 0$ 的解称作支持向量, 他们位于标准分类平面 H_1 或者 H_2 上。注意到, 仅有 $\alpha_i > 0$ 的解影响最终的支持向量的选择。因此, 可以得到决策函数:

$$f(x) = w^T x_i + b = \sum_{i=1}^M y_i \alpha_i (x_i^T x) + b \quad (5-15)$$

决策函数的符号取决于预测样本 x 。

此处讨论的情形的一个假设是可以把所有样本完全分为不同的类别。但是显然在大多数情况下，这种假设是不成立的。另外，这种假设也会导致过拟合现象的出现。因此，文献 [104] 提出了软间隔的支持向量机。其主要思想是通过引入正的松弛变量 ξ_i 放宽公式 (5-9) 的约束，从而得到：

$$\forall i \quad \begin{cases} w \cdot x_i + b \geq +1 - \xi_i & y_i = +1 \\ w \cdot x_i + b \leq -1 - \xi_i & y_i = -1 \\ \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad (5-16)$$

这允许一些样本在边缘内部，甚至在相反类别的情况下进一步交叉（见图 5-6）。虽然这种松弛使得支持向量机能够灵活地降低异常值的影响，但是从优化问题求解的角度来看，任意大的松弛变量 ξ_i 可能会导致 SVM 获得平凡解或次优解。因此，可以通过使松弛变量成为公式 (5-12) 的一部分，来限制松弛度：

$$\min_{w \in \mathcal{H}, \xi \in \mathbb{R}^m} \tau(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (5-17)$$

其约束条件为公式 (5-16)。超参数 $C > 0$ 是针对误分类的惩罚系数，该系数需要根据

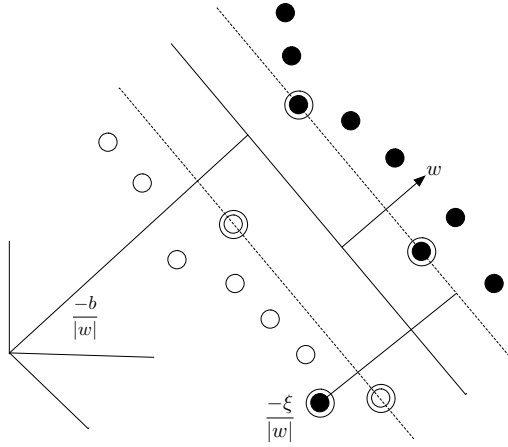


图 5-6 软间隔支持向量机

不同的分类任务和数据集进行调整，将其变为对偶形式：

$$\max_{\alpha} L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j \quad s.t. \quad \forall i \quad \begin{cases} \sum_i \alpha_i y_i = 0 \\ C \leq \alpha_i \leq 0 \end{cases} \quad (5-18)$$

目前只是分析了线性支持向量机的问题，为了应对非线性分类问题，引入了核函数的概念。将训练数据通过某函数 $\Phi: \mathbb{R}^d \mapsto \mathcal{H}$ ，经过该变换后，只需要将原来计算 \mathbb{R}^d 的 $x_i \cdot x_j$ 变为计算在 \mathcal{H} 域的向量积 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 。为了降低计算量，可以引入核函数 K

来避免数据 x_i 和 x_j 从 \mathbb{R}^d 映射到 \mathcal{H} :

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \quad (5-19)$$

因此, 可以将公式 (5-18) 变为:

$$\max_{\alpha} L_D = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad s.t. \quad \forall i \begin{cases} \sum_i \alpha_i y_i = 0 \\ C \leq \alpha_i \leq 0 \end{cases} \quad (5-20)$$

常用的核函数有下面几种:

- 线性核函数: $K(x, y) = x^T y + C$
- 多项式核函数: $K(x, y) = (x^T y + C)^d$
- RBF 核函数: $K(x, y) = e^{-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}}$
- Sigmoid 核函数: $K(x, y) = \tanh(\alpha x^T y + C)$

支持向量机设计

本章设计的支持向量机分类器以深度卷积神经网络的输出作为输入, 利用各类别的概率作为特征进行训练识别。由于在类别的识别过程中存在一定的波动性, 其会影响结果是否属于未知类别的辨别, 因此本章选取来自同一个辐射源连续 10 拍的识别结果平均作为最终的输入。

支持向量机分类器的设计主要分为核函数的选择和参数的选择两方面。核函数将输入空间映射到高维特征空间, 最终在高维特征空间中构造出最优分类超平面, 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径向基核函数 (Radial Basis Function, RBF)。在核函数的选择方面, 当特征数量很大时一般选用线性核函数, 而对本章这种特征数量比较小的问题, 一般选择径向基核函数。

具有径向基核的支持向量机具有两个关键参数, 惩罚参数 C 的和核参数 σ , 这两个参数的取值在很大程度上决定了 SVM 的性能的优劣。核参数 σ 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。因此只有选择合适的核参数得到合适的特征子空间, 才能得到泛化能力良好的 SVM 分类器。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 σ 很小, 径向基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 σ 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。当

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。因此，选择合适的惩罚参数也是非常重要的。

5.4 仿真实验与分析

5.4.1 实验环境

本章利用了来自 13 架民航飞机的气象雷达辐射源的数据，飞机信息参见表 5-1

表 5-1 辐射源信号数据

飞机地址码	飞机航班号	飞机型号
7BF014	CCA1416	Airbus A330 (twin-jet)
780DB3	TBA9881	Airbus A330 (twin-jet)
780E06	CSN3438	Airbus A330 (twin-jet)
780EBB	CES293	Airbus A321 (twin-jet)
780EBF	CES2342	Airbus A320 (twin-jet)
7804F2	ZH9164	Airbus A320 (twin-jet)
7804F4	CES5856	Boeing 737
7806FC	CSN6402	Airbus A320 (twin-jet)
7808F0	CES5373	Airbus A319 (twin-jet)
78057F	CCA4103	Airbus A321 (twin-jet)
780063	CCA4377	Airbus A319 (twin-jet)
780375	CSC8253	Airbus A319 (twin-jet)
781022	EU2731	Airbus A319 (twin-jet)

本章利用的数据是气象雷达辐射源信号，原始的雷达信号是如图 5-7 所示的 I/Q 信号，为了更好的捕捉到雷达辐射源回波的特征信息，本章对数据进行了一个变换，利用快速傅里叶变换求取其模糊函数，并取偏移为 0 附近的一个切片作为输入的特征向量，经过变换后的样本的特征如图 5-8所示。由于该变换后，数据之间的差距比较大，为了通过线性变换将原始数据映射到 [0, 1] 之间本章对数据利用离差标准化（Min-Max Normalization）方法进行归一化，转换函数如下：

$$x^* = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5-21)$$

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

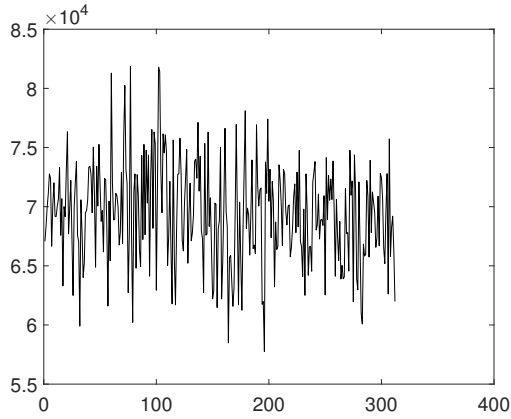


图 5-7 原始 I/Q 信号

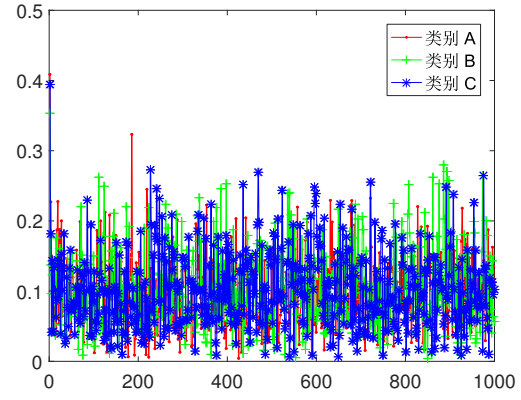


图 5-8 不同类别样本特征图

在数据的选择方面，本章从全部数据中选择出 2 至 8 个类别分别进行实验，每一个类别的原始信号为 100 次雷达扫描周期的信号。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，故本章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，最终每架飞机均有 10000 组信号。本章选择全部数据的 70% 作为训练样本，20% 用于交叉验证，10% 作为测试，同时在测试样本中添加与其等量的来自未训练类别也即未知类别的样本共同作为测试样本用来衡量其未知分类的识别率。本章采用网格搜索法对 SVM 参数进行调优，最终选择参数惩罚参数为 $C = 32$ ，核参数 $\sigma = 0.0312$ 。

5.4.2 实验结果分析

深度卷积神经网络识别结果

首先验证深度卷积算法的识别正确率，利用 8 个类别的数据进行训练和测试，迭代次数为 100 次，其分类结果如表 5-2 所示。从表格中容易看出，每一个单独类别的分类精度都很高。

同对迭代次数与识别准确率和损失函数进行了验证，其结果如图 5-9、图 5-10 和表 5-3 所示，无论是训练样本还是测试样本，其精度与损失函数均很快收敛到比较好的水平，不过相应的学习时间也成正比增长，故在实际工程中需要对精度和时间进行衡量选取一个最合适的迭代次数。

Open Set 分类器识别结果

在上述样本的情形下，可以通过选取不同的类别数目，进行实验得到表 5-4 的识别结果。从表中可以看出，随着样本类别数的增加，未知分类的识别准确率也随之有了大

表 5-2 深度卷积神经网络分类结果

	类别 A	类别 B	类别 C	类别 D	类别 E	类别 F	类别 G	类别 H
类别 A	100%	0	0	0	0	0	0	0
类别 B	7.42%	92.58%	0	0	0.13	0	0	0
类别 C	0	0	97.83%	0	0	2.17%	0	0
类别 D	0	0	3%	97%	0	0	0	0
类别 E	0	0	0	0	100%	0	0	0
类别 F	0	0	0.08%	0	0	99.92%	0	0
类别 G	0	0	1.08%	0	0	0	98.92%	0
类别 H	1.63%	0	0	0	0	0.63	0	98.37%

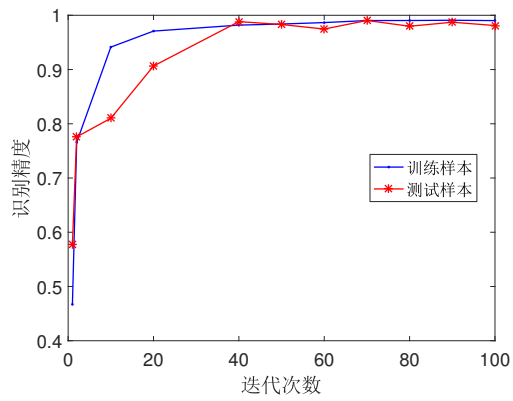


图 5-9 迭代次数与识别准确率曲线图

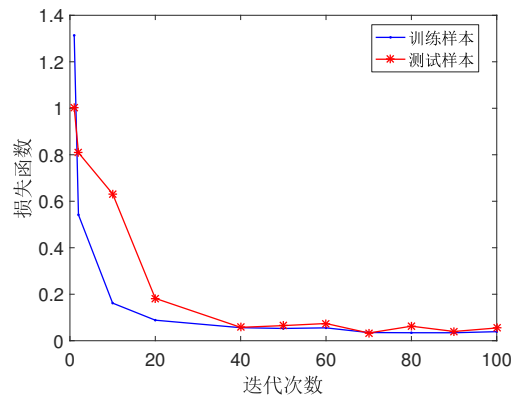


图 5-10 迭代次数与损失函数曲线图

幅度的增加，同时每个类别的识别准确率仍然维持在比较高的水平。

表 5-3 深度卷积神经网络分类结果

迭代次数	训练样本学习正确率	测试样本学习正确率	学习时间 (s)
1	0.4670	0.5782	1.0931×10^3
2	0.7658	0.7758	2.3572×10^3
10	0.9414	0.8102	1.1444×10^4
20	0.9709	0.9065	2.1370×10^4
40	0.9819	0.9883	4.3181×10^4
50	0.9839	0.9830	5.3437×10^4
60	0.9866	0.9746	6.4143×10^4
70	0.9903	0.9904	7.4849×10^4
80	0.9904	0.9798	8.5597×10^4
90	0.9908	0.9872	9.6328×10^4
100	0.9902	0.9811	1.0711×10^5

表 5-4 不同已知类别个数数据识别结果

已知类别数目	已知类别识别正确率	未知类别分辨正确率
2	99.55%	84.32%
3	99.59%	93.10%
4	99.00%	97.81%
5	99.75%	98.42%
6	98.63%	98.85%
7	99.28%	99.22%
8	97.86%	99.14%

5.5 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，并基于民航机载气象雷达数据进行初步验证。本章的主要贡献如下：

(1) 本章设计了 Meta-Recognition，实现了对辐射源中未知分类的辨别。

(2) 本章提出的方法具有较强的抗噪声、抗干扰能力以及较好的鲁棒性。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。通过对现有辐射源信号进行分析，深度学习方法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。

6 总结

6.1 本文的主要贡献

雷达信号分类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分类识别，可以更好的了解战场形势。在电子科技迅猛发展的今天，电磁环境急剧变化，雷达信号分类在军事侦查、目标识别、电子对抗等领域有着广阔的应用前景。而深度学习方法由于其在识别分类等领域的优势，引起了国内外越来越多学者的重视。本文对雷达信号分类中的天波雷达地海杂波识别和辐射源识别这两个方面进行了研究，通过对雷达信号数据的分析，构建合理的卷积神经网络模型，实现了雷达信号类别的识别，并尝试使用无监督方法进行聚类识别。另一方面，针对辐射源识别过程中存在未知类别的情况，构建了一个支持向量机分类器作为 Meta-Recognition 对深度卷积神经网络的识别结果进行二次处理，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：

本文首先叙述了深度学习的研究现状和发展及与传统神经网络方法相比的优点所在，同时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。

针对天波超视距雷达中由于电离层的变化无法确定其坐标配准系数的问题，本文通过地海杂波识别结果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。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的结果进行对比，证明了本文算法的优越性。

针对天波超视距雷达地海杂波识别过程中人工标定复杂且无法准确标定的情况，本文提出了一种深度嵌入卷积聚类方法。利用卷积自编码器提取深度特征，然后通过 K-均值算法获得初始聚类中心，通过本文设计的损失函数使用小批量随机梯度下降算法优化聚类中心。

针对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，并针对不同的参数对结果进行了分析。

6.2 后续的研究进展

本文利用实际数据测试验证了深度学习方法在地海杂波识别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，利用深度学习进行雷达信号分类还有很多工作需要完成。结合本文所研究的问题，希望未来可以在以下方面做进一步研究：

- 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。本文拟进一步优化网络结构、相关参数的选取、训练方法或者尝试其他深度学习的方法或者思想来解决本文的问题，以降低计算量、提高训练速度。
- 进一步加强对深度学习理论知识的研究。本文目前的工作更偏重于工程应用，对深度学习相关理论知识的研究不足，后续需要增强理论知识的研究，实现在理论层面的创新。

参考文献

- [1] Matuszewski J. Specific emitter identification[C]. In Radar Symposium, 2008 International. IEEE2008:1–4.
- [2] Headrick JM, Skolnik MI. Over-the-horizon radar in the HF band[J]. Proceedings of the IEEE. 1974, 62(6):664–673.
- [3] Fabrizio G. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications[M]. New York, USA: McGraw Hill Professional. 2013.
- [4] Krolik JL, Anderson RH. Maximum likelihood coordinate registration for over-the-horizon radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing. 1997, 45(4):945–959.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Barnum JR, Simpson EE. Over-the-horizon radar target registration improvement by terrain feature localization[J]. Radio Science. 1998, 33(4):1077–1093.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

-
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Turley M, Gardiner-Garden R, Holdsworth D. High-resolution wide area remote sensing for HF radar track registration[C]. In Radar (Radar), 2013 International Conference on. IEEE2013:128–133.
- [16] Jin ZL et al. SVM Based Land/Sea Clutter Classification Algorithm[C]. In Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publvol. 2362012:1156–1162.
- [17] Talbot KI, Duley PR, Hyatt MH. Specific emitter identification and verification[J]. Technology Review. 2003.
- [18] Danev B, Zanetti D, Capkun S. On physical-layer identification of wireless devices[J]. ACM Computing Surveys (CSUR). 2012, 45(1):6.
- [19] Kim K et al. Specific emitter identification for cognitive radio with application to IEEE 802.11[C]. In Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBE-COM 2008. IEEE. IEEE2008:1–5.
- [20] Zhang Z, Long K, Wang J. Self-organization paradigms and optimization approaches for cognitive radio technologies: a survey[J]. IEEE Wireless Communications. 2013, 20(2):36–42.
- [21] Zanetti D. Exploring the Physical-layer Identification of GSM Devices[J]. Zurich Eth Department of Computer Science. 2012.

-
- [22] Therrien C et al. Application of feature extraction to radar signature classification[C]. In Proc. 2nd Int. Joint Conf. Pattern Recognition. 1974.
- [23] 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.
- [24] Choe HC et al. Novel identification of intercepted signals from unknown radio transmitters[C]. In Wavelet Applications II. International Society for Optics and Photonics vol. 24911995:504–518.
- [25] Ureten O, Serinken N. Bayesian detection of Wi-Fi transmitter RF fingerprints[J]. Electronics Letters. 2005, 41(6):373–374.
- [26] Huang Y, Djuric PM. Bayesian detection of transient signals in colored noise[C]. In Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on. IEEE vol. 22000:II725–II728.
- [27] Xu S. On the identification technique of individual transmitter based on signal prints[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. 2007.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Kawalec A, Owczarek R. Radar emitter recognition using intrapulse data[C]. In Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004. MIKON-2004. 15th International Conference on. IEEE vol. 22004:435–438.
- [32] 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.

- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Chen VC, Ling H. Joint time-frequency analysis for radar signal and image processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine. 1999, 16(2):81–93.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] López-Risueño G, Grajal J, Sanz-Osorio A. Digital channelized receiver based on time-frequency analysis for signal interception[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005, 41(3):879–898.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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]. 电路與系統學報. 2010, 15(1):129–134.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Dudczyk J, Kawalec A. Fractal features of specific emitter identification[J]. Acta Physica Polonica A. 2013, 124(3):406–409.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Lyden D et al. Id1 and Id3 are required for neurogenesis, angiogenesis and vascularization of tumour xenografts[J]. Nature. 1999, 401(6754):670–677.
- [55] Quinlan JR et al. Bagging, boosting, and C4. 5[C]. In AAAI/IAAI, Vol. 1. 1996:725–730.
- [56] 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.

- [57] Dudczyk J. Applying the radiated emission to the radioelectronic devices identification[D]. Dissertation Thesis. 2004.
- [58] Cover T, Hart P. Nearest neighbor pattern classification[J]. IEEE transactions on information theory. 1967, 13(1):21–27.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Shieh CS, Lin CT. A vector neural network for emitter identification[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2002, 50(8):1120–1127.
- [63] Willson GB. Radar classification using a neural network[C]. In Applications of Artificial Neural Networks. International Society for Optics and Photonicsvol. 12941990:200–211.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] LeCun Y et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE. 1998, 86(11):2278–2324.
- [67] LeCun Y et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition[J]. Neural computation. 1989, 1(4):541–551.

-
- [68] Behnke S. Hierarchical neural networks for image interpretation[M]vol. 2766. Springer Science & Business Media. 2003.
- [69] Simard PY et al. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis.[C]. In ICDAR. Citeseervol. 32003:958–962.
- [70] Ciresan DC et al. Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification[C]. In Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2011.
- [71] Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning internal representations by error propagation[R]. Tech. rep.California Univ San Diego La Jolla Inst for Cognitive Science1985.
- [72] Hebb DO. The organization of behavior: A neuropsychological theory[M]. Psychology Press. 2005.
- [73] Hinton GE, Salakhutdinov RR. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. science. 2006, 313(5786):504–507.
- [74] Hinton GE, Osindero S, Teh YW. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural computation. 2006, 18(7):1527–1554.
- [75] Bengio Y, LeCun Y et al. Scaling learning algorithms towards AI[J]. Large-scale kernel machines. 2007, 34(5):1–41.
- [76] Erhan D et al. Why does unsupervised pre-training help deep learning?[J]. Journal of Machine Learning Research. 2010, 11(Feb):625–660.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.

-
- [80] Rohman BPA, Kurniawan D. Classification of Radar Environment Using Ensemble Neural Network with Variation of Hidden Neuron Number[J]. Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi. 2017, 17(1):19–24.
- [81] Kim Y, Moon T. Human detection and activity classification based on micro-Doppler signatures using deep convolutional neural networks[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016, 13(1):8–12.
- [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] 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.
- [84] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]. In Advances in neural information processing systems. 2012:1097–1105.
- [85] Collobert R et al. Natural language processing (almost) from scratch[J]. Journal of Machine Learning Research. 2011, 12(Aug):2493–2537.
- [86] Jouppi NP et al. In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit[J]. arXiv preprint arXiv:1704.04760. 2017.
- [87] Silver D et al. Mastering the game of go without human knowledge[J]. Nature. 2017, 550(7676):354–359.
- [88] Shinnou H, Sasaki M. Spectral Clustering for a Large Data Set by Reducing the Similarity Matrix Size.[C]. In LREC. 2008.
- [89] Roth V, Lange T. Feature selection in clustering problems[C]. In Advances in neural information processing systems. 2004:473–480.
- [90] Tian F et al. Learning Deep Representations for Graph Clustering.[C]. In AAAI. 2014:1293–1299.

-
- [91] Coates A, Ng A, Lee H. An analysis of single-layer networks in unsupervised feature learning[C]. In Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics. 2011:215–223.
- [92] Xie J, Girshick R, Farhadi A. Unsupervised deep embedding for clustering analysis[C]. In International Conference on Machine Learning. 2016:478–487.
- [93] Rifai S et al. Contractive auto-encoders: Explicit invariance during feature extraction[C]. In Proceedings of the 28th International Conference on International Conference on Machine Learning. Omnipress2011:833–840.
- [94] Kingma DP, Welling M. Auto-encoding variational bayes[J]. arXiv preprint arXiv:1312.6114. 2013.
- [95] Zhou G, Sohn K, Lee H. Online incremental feature learning with denoising autoencoders[C]. In Artificial Intelligence and Statistics. 2012:1453–1461.
- [96] Bengio Y et al. Greedy layer-wise training of deep networks[C]. In Advances in neural information processing systems. 2007:153–160.
- [97] Lowe DG. Object recognition from local scale-invariant features[C]. In Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on. Ieeeol. 21999:1150–1157.
- [98] Masci J et al. Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction[J]. Artificial Neural Networks and Machine Learning–ICANN 2011. 2011, :52–59.
- [99] Maaten Lvd, Hinton G. Visualizing data using t-SNE[J]. Journal of Machine Learning Research. 2008, 9(Nov):2579–2605.
- [100] Scheirer WJ et al. Toward open set recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2013, 35(7):1757–1772.
- [101] Jain LP, Scheirer WJ, Boulton TE. Multi-class open set recognition using probability of inclusion[C]. In European Conference on Computer Vision. Springer2014:393–409.
- [102] Simonson K. Probabilistic fusion of ATR results[R]. Tech. rep.Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM1998.

- [103] 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.
- [104] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine learning. 1995, 20(3):273–297.

致谢

时光荏苒，光阴似箭。两年多的研究生生涯即将结束，我的校园生活也即将画上句号。研究生阶段的生活和本科时候，发生了很大的变化，实验室给提供了更加优异的环境，让我可以学习到更多的知识。

首先，我要感谢我的导师潘泉老师。虽然和潘老师接触的时间有限，但是每次和潘老师交流都给我很大的帮助。潘老师宽广的视野总是能一针见血的发现问题所在，让我深受启发。潘老师对学术的热情和认真的态度一直鼓励着我用最严谨的态度进行学习和工作，他渊博的学识、开阔的思维以及循循善诱的教学方法让我深受裨益。

在硕士期间，王增福老师和兰华老师对我的指导十分重要。两位老师在学术研究与工程实践方面都给予了我很多帮助和指导。两位老师渊博的学识、严谨的治学态度、活跃的学术思想以及温厚的为人，让我受益匪浅。两位老师谆谆的教诲和一丝不苟的指导，是我终身受益的宝贵财富。同时还要感谢实验室杨峰老师、焦连猛老师等众位老师的无私帮助和辛勤栽培。

感谢实验室给予了一个温暖的环境，感谢史志远博士、胡玉梅博士、孙帅硕士、戴安东硕士、张婷婷硕士、祝志勇硕士、马季容硕士、孙藏安硕士、王家琦硕士等实验室的各位师兄、师姐、师弟、师妹，可以帮助我解决各种学术与生活中的问题，与大家的讨论使得我可以更加深入的理解问题，而科研之余的丰富多彩的活动也帮助我劳逸结合。

其次，感谢含辛茹苦的父母多年来对我学业和生活上的关心、支持和理解，没有你们就没有我的今天。感谢李毅兰同学，多年的陪伴使得我成长为一个更加优秀的人。

最后还要感谢对我的论文进行评审和指导的各位专家老师！

攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况

作者硕士期间完成的文章及其他研究成果

1. 第一作者, 发明专利, 一种基于深度学习的雷达辐射源类别识别方法, 受理号: 201711145195.9
2. 第二作者, 发明专利, 一种天波超视距雷达地海杂波类型识别方法, 受理号: 201718003477.X
3. 第二作者, 发明专利, 一种天波超视距雷达多目标自动跟踪方法, 受理号: 201618010431.6
4. 第二作者, Controller design for anti-heeling system in container ships[C]. In Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese. IEEE2016:5798–5803.
5. 第二作者, Random sample consensus algorithm for multiple target tracking in over-the-horizon radar[C]. In Radar Symposium (IRS), 2017 18th International. IEEE2017:1–10.
6. 第二作者, Sea/Land Clutter Recognition for Over-The-Horizon Radar via Deep Convolution Neural Network[J]. *Waiting to Submit*
7. 第三作者, 发明专利, 一种天波超视距雷达多目标跟踪联合检测与跟踪方法, 受理号: 201618001893.1
8. 第二作者, 软件著作权: LIFT_ 基于变分贝叶斯的多目标联合检测与跟踪软件, 登记号: 2016R11S233158
9. 第五作者, 发明专利, 一种基于置信传播的多路径数据关联方法, 受理号: 201618001088.9
10. 第五作者, Joint Detection and Tracking for Multipath Targets: A Variational Bayesian Approachs[J]. *Submitted to IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, *Under Review*

作者硕士期间参与的项目

1. 地海杂波识别与舰船目标跟踪性能提升技术研究, 中电 14 所合作项目
2. 基于子模优化的远程预警传感器管理研究, 青年科学基金项目, 基金编号: 61503305

3. 高维未知参数下的天波超视距雷达目标跟踪算法研究，国家自然科学基金青年科学项目，基金编号：61501378

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：_____

指导教师签名：_____

年 月 日

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