

双向加窗技术下多普勒天气雷达回波信号识别系统设计

蒋锐¹, 杨泉林², 何建松², 舒康宁¹, 赵梅珠¹

(1. 云南省气象信息中心, 昆明 650034;

2. 云南省人工影响天气中心, 昆明 650034)

摘要: 多普勒天气雷达是一种利用多普勒效应探测大气中粒子运动状态和速度的雷达系统; 由于距离分辨率的限制和目标反射的复杂性, 多普勒雷达在接收信号时会出现不同距离上回波信号的混叠问题, 难以捕捉到全面的频谱信息, 影响了对天气现象的监测效果; 为此, 对双向加窗技术下多普勒天气雷达回波信号识别系统进行了研究; 通过改装设计天线/馈线、雷达发射机、雷达接收机等元件, 优化多普勒天气雷达回波信号生成器, 增设信号滤波器, 优化信号处理器的工作方式, 完成系统硬件部分的优化设计; 通过同步采样技术和编码技术, 构建系统数据库表和逻辑连接, 完成识别系统回波信号低延时采集和高效存储; 采用矩形窗和汉宁窗双向加窗技术抑制背景噪声和杂音, 提高信号的清晰度, 完成对初始回波信号的处理, 基于蝶形运算从时域和频域两个方面综合提取信号特征; 根据不同气象条件下回波信号特征, 设置多普勒天气雷达回波信号识别标准, 根据标准特征匹配结果得出识别结果, 完成多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统设计; 通过系统测试得出结论: 优化设计系统的误识率降低了 2.55%, 系统误识率波动幅值能够控制在 0.5% 以下, 即优化设计系统在识别功能和运行性能两个方面具有明显优势。

关键词: 多普勒天气; 雷达回波信号; 双向加窗; 信号识别; 矩形窗; 汉宁窗

Doppler Weather Radar Echo Signal Recognition System Based on Bidirectional Windowing Technology

JIANG Rui¹, YANG Quanlin², HE Jiansong², SHU Kangning¹, ZHAO Meizhu¹

(1. Yunnan Meteorological Information Center, Kunming 650034, China;

2. Yunnan Weather Modification Center, Kunming 650034, China)

Abstract: Doppler weather radar is a radar system that uses the Doppler effect to detect the motion state and velocity of particles in the atmosphere. Due to the limitation of distance resolution and the complexity of target reflection, There is the aliasing of echo signals in Doppler radars at different distances when receiving signals, making it difficult to capture comprehensive spectral information, which affects the monitoring effect of weather phenomena. For this purpose, research was conducted on a Doppler weather radar echo signal recognition system using bidirectional windowing technology. Modify components such as antennas/feeders, radar transmitters, radar receivers, etc., optimize Doppler weather radar echo signal generator, add signal filters, optimize the working mode of signal processor, and complete the optimization design of the system hardware. Adopt synchronous sampling and coding techniques, construct system database tables and logical connections, low latency acquisition and efficient storage of echo signals in the recognition system are completed, apply rectangular and Hanning window bidirectional windowing techniques to suppress background noise and noise, improve signal clarity, and complete the processing of the initial echo signal, and comprehensively extract signal features based on butterfly operation from both time and frequency domains. Set Doppler weather radar echo signal recognition standards according to the characteristics of echo signals under different meteorological conditions, obtain recognition results based on standard feature matching results,

收稿日期:2024-03-04; 修回日期:2024-05-08。

基金项目:云南省气象局科研项目(YZ202213)。

作者简介:蒋锐(1982-),男,工程师,大学本科。

通讯作者:杨泉林(1972-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:蒋锐,杨泉林,何建松,等. 双向加窗技术下多普勒天气雷达回波信号识别系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5):262-270.

and complete the design of a bidirectional windowed Doppler weather radar echo signal recognition system. The conclusion drawn from system testing shows that the optimized design system reduces the error recognition rate by 2.55%, and the fluctuation amplitude of the system error recognition rate can be controlled below 0.5%, indicating that the optimized system has obvious advantages in recognition function and operational performance.

Keywords: Doppler weather; radar echo signal; bidirectional windowing; signal identification; rectangular window; Hanning window

0 引言

多普勒天气雷达是一种基于多普勒效应的主动式遥感技术,能够获取云、雨和多种强对流天气的内部要素信息,其工作原理是利用该技术测量散射物体的运动速度,并能够反演特定条件下的大气风场、气流的垂直速度和紊流等。多普勒天气雷达对于提高强对流天气的监测和预警效果起到重要的作用。多普勒天气雷达是监测、预警突发灾害性天气最有效的手段,而多普勒天气雷达回波信号反映了天气雷达的监测结果,是多普勒天气雷达探测的直接体现。但多普勒天气雷达在实际运用过程中会接收到不同距离上返回的回波信号,容易造成信号混叠问题,难以准确判断不同距离上的回波来源,影响对天气现象的定量分析。为了实现对天气的精准雷达探测,并得出相应的探测结果,有必要研究一种精准的多普勒天气雷达信号识别系统。

多普勒天气雷达回波信号识别是多普勒天气雷达探测工作中的重要环节之一,现阶段发展较为成熟的信号识别系统主要包括:文献[1]提出的基于卷积双向长短时记忆网络的雷达信号识别系统。为放大不同信号间的差异,建立一种基于卷积神经网络的二维时频图模型,以此作为神经网络的输入;设计卷积神经网络来挖掘二维时频图的特征信息,搭建双向长短时记忆网络对提取到的特征进行分类识别。然而卷积神经网络和双向长短时记忆网络具有较大的网络复杂性,需要大量的计算资源进行训练和推理,应用过程较复杂。文献[2]提出的基于双通道卷积神经网络的雷达信号识别系统。在对雷达信号进行CWD和MSST时频分析的过程中,分别获得了二维时频图像;利用两通道卷积神经网络,进行深度特征提取与融合;利用卷积神经网络分类器,实现了对雷达信号的分类识别。虽然双通道卷积神经网络在特定训练数据上表现良好,但在面对未知或变化的信号类型时可能出现泛化能力不足的问题。文献[3]提出了基于时频图像和高次频谱特征的雷达信号识别系统。首先利用Choi-Williams分布变换得到信号的时频图像,对时频图像进行预处理,利用灰度共生矩阵法进行纹理特征的提取;然后利用对称Holder系数提取信号的高次频谱特征;再将纹理特征和高次频谱特征构成一组联合特征向量;最后通过支持向量机实现雷达信号的分类识别。但Choi-Williams分布变换和特征提取过

程需要较长的计算时间,在实际应用过程中还需提高识别效率。

矩形窗在数字信号处理中是最常见的窗函数之一,其主要特点是具有均匀幅度,频谱性能良好,矩形窗的窗口函数为常数,相当于不进行任何加窗处理。汉宁窗是一种常用的平滑窗函数,可以有效抑制边界效应、减少频谱泄漏。通过汉宁窗可以有效减小信号的副瓣,提高信号的频谱分辨率。双向加窗耦合技术结合了矩形窗和汉宁窗两种窗函数的优势,利用前向矩形窗和后向汉宁窗两次加窗处理可以有效减小噪声、提高信噪比及信号的清晰度。为此文章根据双向加窗原理,对多普勒天气雷达回波信号识别系统进行优化设计。硬件上改装优化设计多普勒天气雷达回波信号生成器、信号滤波器、信号处理器,创新性地在天线两端加装双定向耦合器,通过自带同轴连接器与天线连接,提升样本信号发射效率和功率。加装LINAC 50 MW脉冲SCR调制器提高触发脉冲发射信号的速度,保证雷达发射机的发射信号质量。软件上基于同步采样和编码数据库实现回波信号低延时采集和高效存储。采用矩形窗和汉宁窗双向加窗耦合技术,提高多普勒天气雷达回波信号的处理效果,降低外界的噪声和杂音干扰;基于蝶形运算控制器提取信号的时域和频域综合特征,通过特征匹配实现回波信号识别,提升对天气的探测精度。

1 多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统硬件设计

优化设计的多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统主要是通过对雷达回波信号的分析确定当前信号对应的多普勒天气类型。为了便于后续识别优化,对多普勒天气雷达回波信号产生和处理的主要硬件设备信号生成器、信号滤波器、信号处理器进行改装优化设计,从而满足双向加窗程序与信号识别程序运行对硬件设备的需求。

1.1 多普勒天气雷达回波信号生成器改装设计

多普勒天气雷达回波信号生成器由频率合成器、放大链式速调管发射机、天线/馈线、接收机、电源模块等部分组成。多普勒天气雷达回波信号生成器的内部组成结构,如图1所示。

如图1所示,多普勒天气雷达回波信号生成器元件可以分为回波信号发射和接收两个模块。信号生成器首

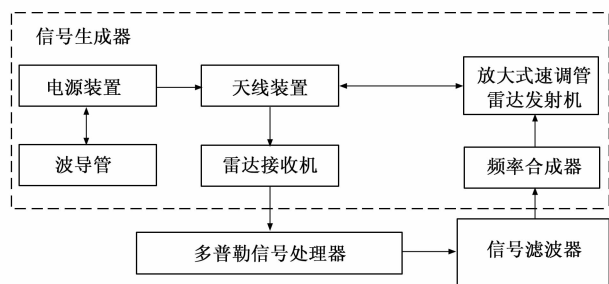


图 1 多普勒天气雷达回波信号生成器内部组成结构图

先将雷达信号发送到发射机。发射机再将其放大，再通过馈线传输至馈电源，最后遭遇云雾、雨水或地面杂波时，会发生一次反射后传输至雷达接收机，实现多普勒气象雷达回波信号的接收。由上述组成结构可知，信号生成器中的天线/馈线、雷达发射机、雷达接收机是影响回波信号发射和接收质量的关键器件，因此为了给回波信号的识别提供满足质量要求的信号样本，对多普勒天气雷达回波信号生成器中的天线/馈线、雷达发射机、雷达接收机元件进行改装优化设计。

1.1.1 天线/馈线优化设计

多普勒气象雷达回波信号发生器通过天线/馈线将雷达发射器的高功率脉冲信号向外辐射^[4]。设计系统采用科信 ipex U. FL MHF 天线/馈线通过遥控器优化信号辐射效果，同时进行回波信号的同发同收、单发单线偏振，也可进行横向、纵向偏振的接收。设计系统在常规天线/馈线的基础上，创新性地天线两端加装设计 D10B003180 Rev. A 0.5—18GHz 10dB 双定向耦合器。双定向耦合器自带同轴连接器与天线连接，通过信号定向耦合提升样本信号发射效率和功率。

1.1.2 雷达发射机优化设计

优化设计的雷达发射机采用 KJH-D-J 型号，该发射机为固态化形式，它包括一个发射总成和一个向发射总成提供电力的发射电源，使用了线性 FM 和非线性 FM。在雷达发射机中使用了脉冲压缩技术，提升雷达的检测能力和较高的距离分辨能力。雷达发射机通过发射总成 RF 技术将输入功率信号进行射频放大并输出。在常规多普勒天气雷达回波信号发射机中，加装设计 LINAC 50 MW 脉冲 SCR 调制器。加装后，当发射机发出一个触发脉冲时，SCR 调制器立即会启动，存储在人工线上的电能经 SCR 释放到脉冲变压器上，并根据人工线的要求，形成速调管所需要的脉冲波形，从而提升触发脉冲发射信号的速度。由于负失配的存在，雷达发射机在每一次放电之后，人造线路上都会产生一个高电压，该电压通过连接到调制器上的倒峰电路将逆向带电磁场释放出来，会干扰发射波^[5]，因此设计系统优化设计康明斯 5.9 电磁减震器来消除逆向带电磁场，从而

保证雷达发射机的发射信号质量。

1.1.3 雷达接收机优化设计

接收机将雷达频率合成器输出的本地信号进行混频、滤波，得到中频信号，实现多普勒气象雷达回波信号的接收^[6]。采用射频增益控制电路和变频超外差式接收机对雷达接收机性能进行加装优化。优化设计雷达接收机的加装优化设计如图 2 所示。

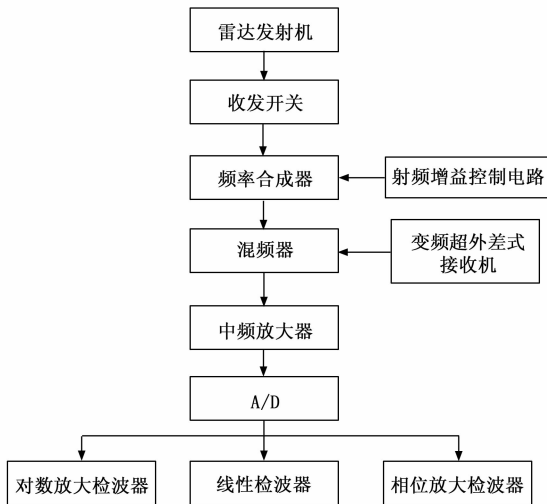


图 2 雷达接收机加装优化设计

图 2 表示的雷达接收机中，通过射频增益控制电路和施瓦茨 ESCS30 变频超外差式接收机提高频率源的高稳定性。其中，射频增益控制电路设计如图 3 所示。

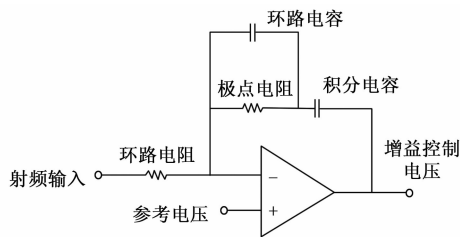


图 3 射频增益控制电路设计

如图 3 所示，通过增益控制技术抑制射频电压波动，使电压尽可能达到参考电压，稳定接收信号。然后，通过主通道前端的混频器将回波信号传输到次通道，通过 A/D 光纤接口将信号传输到信号检波器中，在相位放大检波器中优化加装虹科 PHMT 恒温晶体振荡器，通过锁相加直接技术获得低相位噪声、低杂散的信号，并将其传输到信号滤波器中，优化接收信号质量。

1.2 信号滤波器

为了降低实际接收多普勒天气雷达回波信号中的噪声含量，在硬件系统中优化设计信号滤波器。设计的信号滤波器基本工作电路图如图 4 所示。

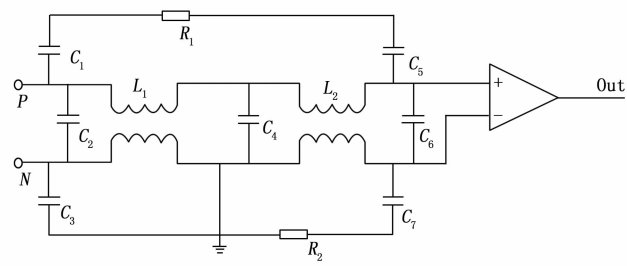


图 4 信号滤波器工作电路图

图 4 表示的信号滤波器为华新科 RFLPF20120G9D3T Walsin FIR 滤波器，该滤波器采用非递归结构，具有更高的稳定性，在有限精度上，噪声滤波误差也比较小。

1.3 信号处理器优化设计

多普勒天气雷达回波信号处理器是双向加窗程序的执行环境，同时也为信号的识别工作提供硬件支持^[7]。优化设计的信号处理器结构，如图 5 所示。

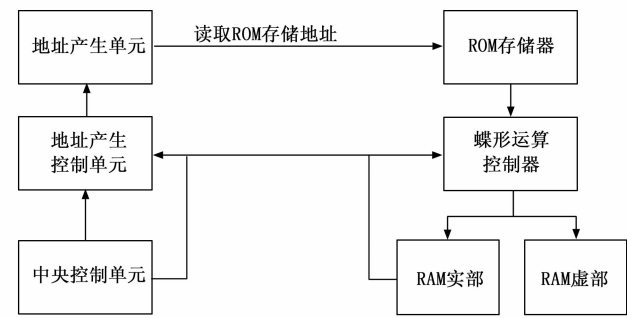


图 5 多普勒天气雷达回波信号处理器组成结构图

如图 5 所示，多普勒天气雷达回波信号接收完成后，将数据通过 AD 进行转换后，利用 RAM 接收数据并存储。一旦 RAM 中的数据量达到饱和状态，系统会立即发出一个结束标志信号。接收到这一信号后，总状态机将启动双向加窗处理流程。首先，它向地址产生单元控制器发送一个脉冲信号，该控制器在接收到中央控制单元的使能信号后，会生成 3 个关键地址：具体为旋转因子查找表地址、蝶形运算数据 1 的入口地址，以及蝶形运算数据 2 的入口地址。经过数个脉冲周期后，ROM 中的旋转因子表数据就可以被地址产生单元控制器读取，在对数据进行锁存后，会给中央控制单元发出结束标志信号，告知其可以成功进入下一个状态^[8]。然后，利用上一步骤中得出的数据和旋转系数进行蝶形运算，依据锁存的地址，采用蝶形运算控制器，优化信号的处理效果。当蝶形运算处在第 0 级运算时，控制器会自动开启统计程序，统计蝶形运算行进的次数。最后，当每个阶段的任务都完成后，从 RAM2 中提取数据，输入到地址生成装置中，即可得到下一阶段的地址。重复以上操作，当所有的蝶形运算均完成后，控制器会自动形成一个结束标志发送到中央控制单元，中央控制单

元在接收后，对处理完毕的数据进行锁存，结束双向加窗处理状态，进入 D/A 处理状态，将蝴蝶操作后得到的数据在 RAM 控制器控制下存入对应的存储器。将加装蝶形运算控制器优化设计的信号处理器与信号生成器的接收机相连，保证实时接收的雷达回波信号能够直接输入到信号处理器中。

2 天气雷达回波信号双向加窗识别系统软件功能设计

通过对多普勒天气雷达硬件进行改装和优化设计，系统的各个组件如回波信号生成器、信号滤波器、信号处理器等将得到优化，增强了整个系统的性能和稳定性。结合上述硬件设计内容，利用同步采样技术降低多普勒天气雷达回波信号的采集时延，确保对信号的准确采集，在信号处理器的数据接收 RAM 中构建编码数据库，为回波信号提供高效存储的空间。采用双向加窗处理技术在时域上通过两个窗口互相补偿，有效抑制背景噪声和杂音，提高信号清晰度和可听性。通过时域和频域综合特征提取，全面描述多普勒天气雷达回波信号的动态行为和频率特性，提供更详尽的信号信息。根据多普勒冰雹天气雷达回波原理，设定各类型天气下的标准特征，作为系统识别的比对标准，包括多普勒变换值、时段长度、传输时间、速度谱分布密度和回波信号频率等特征，根据设定的标准特征，使用特征匹配度计算公式，对提取的信号特征与各类型标准特征进行匹配度计算，最终判断信号的所属类型。

2.1 基于同步采样技术和编码技术的回波信号低延时采集和高效存储

以多普勒效应为支持，模拟多普勒天气雷达探测过程，通过硬件系统中接收机进行信号接收，通过同步采样技术低延时采集多普勒天气雷达回波信号，并利用编码技术在信号处理器的数据接收 RAM 中建立编码数据库进行高效存储。

假设多普勒雷达工作频率为 f_0 ，雷达发射器与目标天气探测目标之间的距离为 d ，则生成的雷达回波信号为^[9-11]：

$$x = q \times \frac{P_{\text{echo}} \kappa_{\text{gain}} (A_{\text{antenna}} + A_{\text{radar}})}{(4\pi)^2 d^4} \times f_0 \tag{1}$$

其中： P_{echo} 为回波信号功率， κ_{gain} 表示的是天线增益系数， A_{antenna} 和 A_{radar} 分别对应的是天线有效接收面积和雷达截面积， q 为多普勒天气的雷达探测强度，上述参数中 q 的计算公式为：

$$q = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \times \frac{P_{\text{transmit}} H v_{\text{ele}} (R_{\text{level}} + R_{\text{vertical}}) \kappa_{\text{attenuation}}}{\lambda^2} \tag{2}$$

式中， P_{transmit} 为雷达信号的发射功率， H 表示的是发射雷达脉冲宽度， v_{ele} 为雷达信号的传输速度， R_{level} 和 R_{vertical} 分别对应的是雷达天线的水平和竖直波束宽度值，

$\kappa_{\text{attenuation}}$ 为雷达信号在空间传播时的衰减因子, λ 为雷达回波信号工作波长^[12-15]。将公式 (2) 的计算结果代入到公式 (1) 中, 得出多普勒天气雷达回波信号的生成结果。以上述生成的回波信号作为采集对象, 采用同步采样技术降低多普勒天气雷达回波信号的采集时延, 回波信号的同步采样方程如下:

$$\frac{T_{\text{signal}} x}{T_{\text{sampling}}} = \frac{Nx}{M} \quad (3)$$

式中, T_{signal} 和 T_{sampling} 分别为信号周期和采样周期, N 和 M 对应的是数据窗及其内部的采样点数^[16]。在上述采集条件的支持下, 得出多普勒天气雷达回波信号的采集结果。

在信号处理器的数据接收 RAM 中构建数据库为采集的回波信号提供存储的空间, 同时也用来存储回波信号的识别标准^[17]。系统软件设计通过自底向上构建编码数据库对数据进行高效存储。自底向上编码技术内容是对每个应用程序中的各个部分进行编码字段定义, 再对各个部分进行综合, 得出整体的编码字段结构, 形成编码数据库, 为后续数据处理提供高效的取存基础。系统数据库由多个数据库表组成, 其中天气雷达回波信号数据库表的编码构建结构如表 1 所示。

表 1 天气雷达回波信号数据库表

字段名称	字段说明	数据类型	是否为空
model	雷达型号	int(10)	否
wavelength	雷达波长	float(10)	是
scan	扫描层数	int(5)	是
strength	强度回波性质	int(20)	是
speed	速度回波模式	int(20)	是
shape	回波信号形状	int(20)	是
semaphore	回波信号量	int(50)	否
weather	天气过程	int(50)	否

基于表 1 所示的数据库表的字段构建结果, 根据数据之间的逻辑关系, 实现数据库表之间的连接, 提升数据存储和交互提取的效率。为防止系统数据库中的信息被非法用户访问与使用, 会对数据库中的用户设定一定的限制条件, 只有合法使用者才能使用, 以保障数据库的安全性。由此完成多普勒天气雷达回波信号的高效采集和存储。

2.2 基于矩形窗和汉宁窗的多普勒天气雷达回波信号双向加窗处理技术

基于同步采样技术降低回波信号的采集时延, 准确采集所需信号, 通过给出采样周期和信号周期, 构建回波信号的同步采样方程, 提高数据获取的精度和效率; 在此基础上, 构建编码数据库, 增加回波信号的存储空间, 采用自底向上编码技术对数据进行高效存储, 提升数据存储和处理效率。由于采集的信号中含有噪声干

扰, 而传统单窗技术只能在一个方向上进行处理, 无法捕捉到全部的频谱信息。设计的双向加窗技术在时域上采用两个窗口, 分别对音频信号进行前向和后向处理, 更好地抑制噪声和杂音。它利用两个窗口的互补优势, 有效消除背景噪声, 提高语音的清晰度和可听性。矩形窗和汉宁窗的窗函数频率响应示意图如图 6 所示。

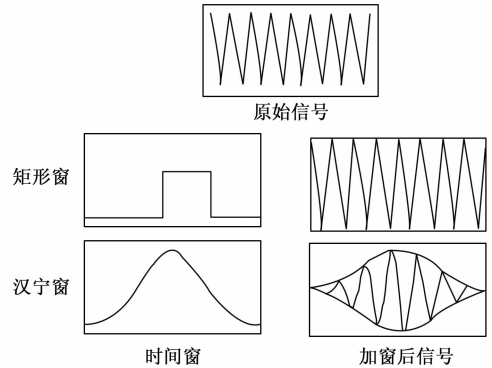


图 6 基于矩形窗和汉宁窗的双加窗技术示意图

为此, 分别选择矩形窗和汉宁窗作为双向加窗技术的窗函数, 矩形窗是数字处理中使用频率最多的函数, 信号加矩形窗的效果与不加窗的效果相同, 而汉宁窗则是针对边界效应, 将 3 个矩形窗口在频谱上进行平移重叠, 使得它们的副瓣相互抵消, 从而消除高频分量的影响, 降低能量泄漏^[18]。矩形窗和汉宁窗的函数表达式为:

$$\begin{cases} \vartheta_{\text{rectangle}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq R_{\text{Transitional zone}} - 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ \vartheta_{\text{Hanning}} = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{R_{\text{Transitional zone}} + 1} \right) \right], \\ 1 \leq x \leq R_{\text{Transitional zone}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{Transitional zone}}$ 为过渡带宽度。利用上述公式表示的窗函数, 采用双向加窗的方式对初始采集的多普勒天气雷达回波信号进行处理, 处理结果如下:

$$\begin{cases} x_{\text{forward}} = \vartheta_{\text{rectangle}} \otimes x \\ x_{\text{reverse}} = \vartheta_{\text{Hanning}} \otimes x^{-1} \\ x' = x_{\text{forward}} + x_{\text{reverse}} \end{cases} \quad (5)$$

其中: x^{-1} 和 x 互为逆信号, 输出的信号处理结果 x_{forward} 和 x_{reverse} 分别为前向加窗处理结果和反向加窗处理结果。根据系统对初始雷达回波信号的需求, 确定双向加窗的处理次数, 通过双向加窗操作的反复执行, 输出多普勒天气雷达回波信号的处理结果 x' , 完成多普勒天气雷达回波信号双向加窗处理, 为后续特征提取和信号识别提供良好的数据基础。

2.3 提取多普勒天气雷达回波信号的时域和频域综合特征

将矩形窗和汉宁窗作为窗函数, 采用双向加窗技术

对音频信号进行前向和后向处理, 抑制噪声和杂音, 有效保留信号频谱信息, 提高信号的清晰度。以上节双向加窗处理完成的雷达回波信号为操作对象, 基于蝶形运算控制器硬件从时域和频域两个方面提取信号特征。时域特征包括信号的振幅、持续时间、过零率等, 可以用于分析信号的强度、变化率和时序关系等。这些特征可以揭示信号的动态行为和时域结构。频域特征包括信号的频率成分、频谱形状、功率谱密度等, 可以描述信号在不同频率上的分布情况。结合时域和频域特征, 可以获得更全面和准确的信号信息。时域和频域特征具有互补的优势, 通过蝶形运算控制器硬件提取这两类特征, 可以综合考虑信号的动态行为和频率特性, 从而更好地理解和分析信号。时域特征中均值特征向量和波形因子特征分量的提取结果为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\text{mean value}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{signal}}} x_i'^2}{n_{\text{signal}}} \\ \tau_{\text{wave form}} = \frac{\left(\frac{1}{n_{\text{signal}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{signal}}} \sqrt{|x_i'|} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n_{\text{signal}}} |x_i'|} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, n_{signal} 为多普勒天气雷达回波信号的采集量, x_i' 为 x' 的 i 时刻分量。另外回波信号的频域特征中, 功率谱特征分量的提取结果为:

$$\tau_{\text{Power spectrum}} = -\ln(1-\alpha)x' \exp\left(-\frac{v_x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (7)$$

式中, α 为区间 $[0, 1]$ 内的随机常数, v_x 和 σ_x 分别为回波信号 x' 的平均速度和速度谱宽^[19]。按照上述方式得出时域和频域环境下的所有特征向量, 并对提取特征进行融合输出, 最终得出的回波信号综合特征为:

$$\tau = \omega_1 \tau_{\text{Power spectrum}} + \omega_2 \tau_{\text{mean value}} + \omega_3 \tau_{\text{wave form}} \quad (8)$$

其中: ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为特征分量的融合权重值。通过下述内容选取特征分量的融合权重值: 邀请具有雷达信号处理、气象学或相关领域经验的专家, 对提取的时域和频域特征进行评估。专家根据自身的知识和经验, 判断每个特征分量在信号识别中的重要性和贡献程度。根据专家的评估结果, 对每个特征分量进行重要性排序, 并初步分配权重值。结合专家的建议和实验结果, 综合评估各特征分量的权重值。确定最终的权重值, 应用于特征分量的融合过程中。将提取的特征分量代入到公式 (8) 中, 输出结果即为多普勒天气雷达回波信号特征的综合提取结果, 作为信号识别的依据。

2.4 特征匹配下实现多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别

通过蝶形运算控制器硬件结合时域和频域的特征提

取, 获取信号的综合特征, 包括均值特征向量、波形因子特征分量和功率谱特征分量等, 将时域和频域提取的特征融合输出, 得出多普勒天气雷达回波信号的综合特征, 作为信号识别的依据。基于此, 设定回波信号标准特征, 然后根据上节提取的信号特征通过特征匹配判断信号类别。特征匹配方法可以通过算法自动进行信号识别, 不需要依赖人工干预。这样能够实现信号识别的自动化处理, 有效节约时间和人力资源成本。特征匹配方法可以根据需求灵活调整特征提取和匹配的算法和参数。这使得它对不同类型和条件下的雷达信号具有一定的适应性, 并且可以根据实际情况进行优化和改进, 最后完成精确识别。在识别前, 需要先分析多普勒天气雷达回波原理, 如图 7 所示。

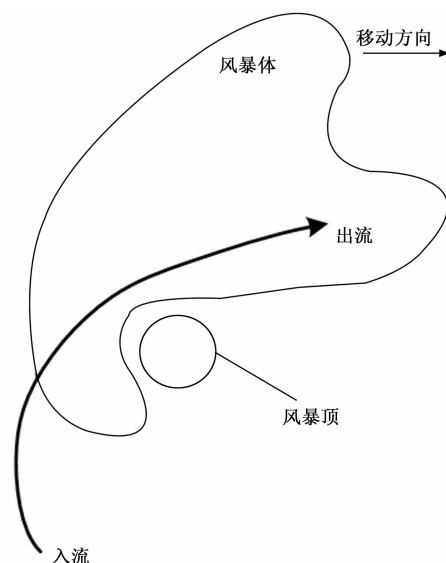


图 7 多普勒冰雹天气雷达回波示意图

图 7 中, 多普勒天气雷达探测的极端天气, 具体包括冰雹、龙卷风、风暴等, 其中冰雹是一种强对流天气, 通常由多个单体或超级单体形成。冰雹云的雷达回波信号强度是所有对流云回波中最强的, 内部强烈的上升或下沉气流, 冰雹天气对应的回波信号表现为: 有边界的弱回波区域、“V”形空隙、旁瓣回波、三体散射等虚幻回波、穹隆、壁墙、悬挂回波、旁瓣回波以及强冰雹云中的辉斑回波等。

根据以上多普勒冰雹天气雷达回波原理, 以多普勒天气中的冰雹天气回波信号为例, 对应回波信号的标准特征可以表示为:

$$\tau_P = \frac{1}{T_0} \int_{-T/2}^{T_0-T/2} (S(x') - S^*(x')) \psi(f) df x' \quad (9)$$

其中: $S(x')$ 和 $S^*(x')$ 分别表示的是冰雹天气下的雷达信号及其多普勒变换值; T_0 为时段长度; T 为多普勒天气雷达回波信号的传输时间; $\psi(f)$ 和 f 分别为速度

谱分布密度和回波信号频率。按照上述方式可以得出其他天气下多普勒天气雷达回波信号的标准特征,以此作为系统信号识别的比对标准。

采用特征匹配的方式,判断多普勒天气雷达回波信号的所属类型,特征匹配过程可以量化表示为:

$$\zeta = \sqrt{(\tau - \tau_p)^2} \quad (10)$$

其中: τ_p 为冰雹天气下雷达回波信号的标准特征,同理可以将其他类型天气雷达信号标准特征代入到公式(10)中,得出相应的特征匹配度计算结果^[20]。将公式(10)的计算结果与阈值 ζ_0 进行比对。若计算得出特征匹配度高于阈值,则说明当前回波信号属于特征标准对应类型,否则进行下一类型标准特征的匹配,直到得出满足阈值条件的计算结果为止。最终将信号类型的判断结果作为识别结果,通过硬件设备输出,完成多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统设计。

3 系统测试

为了测试优化设计多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统的识别功能和运行性能,采用白盒与黑盒相结合的方式设计系统测试实验。回波信号双向加窗识别系统识别功能的测试采用白盒测试的方式,即利用天气雷达设备模拟生成回波信号,通过对相关参数的设置确定回波信号的识别目标,对比识别目标与系统输出识别结果之间的差距,得出系统识别功能的测试结果。系统运行性能的测试主要采用黑盒测试方式,测试不同的实验次数对系统识别功能的影响,从而得出反映系统运行鲁棒性能的测试结果。

3.1 安装与调试多普勒天气雷达硬件设备

为了给雷达回波信号样本的生成提供硬件支持,按照硬件系统的优化设计结果,安装多普勒天气雷达设备,并对实验环境中的所有设备进行调试。选择某气象站所使用的 X 波段全固态多普勒双偏振气象雷达,如图 8 所示。



图 8 多普勒天气雷达实际使用场景

图 8 所示雷达中安装的硬件设备具体包括信号发生器、调制解调器、转换开关、接收显示器等。其中调制解调器需要脉宽对目标的检测范围、距离分辨率(雷达盲区)的大小有直接的影响。对于近场目标,一般采用窄脉宽调制的方法,而对于远场目标,一般采用宽脉宽调制的方法,以增加回波信号的强度。气象雷达的脉宽通常在 $0.1 \sim 4 \mu\text{s}$ 之间。设置识别硬件系统中雷达天线的增益值和波束宽度分别为 45 dB 和 1.0° ;发射支路馈线和接收支路馈线的损耗均为 2.5 dB;雷达信号发射机的工作频率为 5 500 MHz,接收频率为 9 400 MHz;脉冲峰值功率和重复频率分别为 250 kW 和 800 Hz;方位转动范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$;设定接收机的回波信号接收形式为一次变频形式,最小可测灵敏度为 -110 dBm 。在实验开始之前,为保证硬件设备能够在强对流天气环境下正常运行,需在设备安装过程中添加加固元件,启动雷达硬件设备,观察接收机是否能够成功接收回波信号,并将回波信号以可视化的形式输出,根据接收机的显示情况判断硬件设备的运行状态,针对异常运行设备需进行重新连接或替换处理。

3.2 生成多普勒天气雷达回波信号样本

在多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统硬件设备安装完成且调试成功的前提下,采用体积扫描的方式获取回波信号样本。体积扫描过程为:首先,利用多普勒天气雷达设备在给定的最小俯仰角度下,将天线沿纵轴 360 度转动一圈,得到这一扫描圆锥面上的回波信号;然后,将天线提升至下一个俯仰角度,再次转动一圈,如此循环,直至全部俯仰角度结束。图 9 表示的是冰雹天气场景下多普勒天气雷达的回波图。

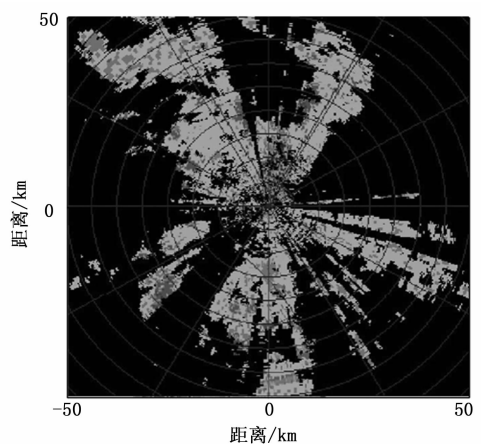


图 9 冰雹天气场景下多普勒天气雷达的回波图

根据雷达扫描角度对图 9 表示的回波探测结果进行信号拆分,得出多普勒天气雷达回波信号样本。图 10 为扫描角度为 0° 时的回波信号样本生成结果。

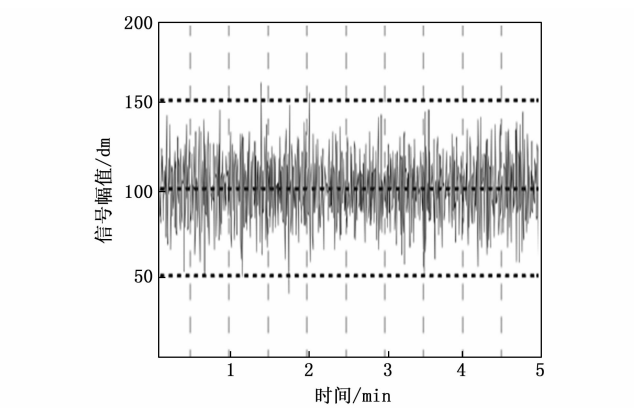


图 10 多普勒天气雷达回波信号波形图

重复上述操作可以得出多个不同气象场景下, 多普勒天气雷达回波信号的生成结果, 并在数据库中对生成的信号样本进行字段编号, 将其作为双向加窗识别系统的输出项。

3.3 描述信号识别性能测试实验过程

利用 Jenkins 工具作为多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统的软件部分进行开发。Jenkins 工具是一个用 Java 编写的开源工具, 该工具能够满足单元测试、集成测试、远程存储等功能, 满足双向加窗识别系统软件的运行与测试要求。利用上述编程工具, 将双向加窗识别系统的软件部分转换为运行程序, 并将生成的多普勒天气雷达回波信号导入到运行程序中, 得出相应的信号识别结果。图 11 为 1 号回波信号样本的识别结果。

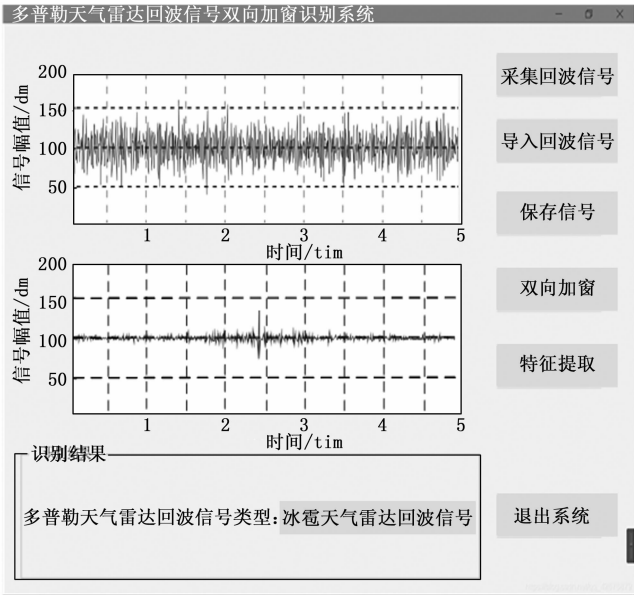


图 11 天气雷达回波信号双向加窗识别系统输出结果

按照上述方式可以得出实验中所有回波信号样本的双向加窗识别结果。为测试出设计系统在识别功能和运

行性能方面的优势, 设置传统的基于卷积双向长短时记忆网络的雷达信号识别系统 (文献 [1]) 和基于双通道卷积神经网络的雷达信号识别系统 (文献 [2]) 作为实验的对比系统, 在相同的开发环境下完成对比系统的开发, 并得出相应的信号识别结果。

3.4 设置信号识别性能测试指标

根据实验目的, 从识别功能和运行性能两个方面设置具体的测试指标, 设置误识率作为系统识别功能的测试指标, 该指标的数值结果为:

$$\eta_{\text{mistake}} = \frac{Num_{\text{error}}}{Num_{\text{Signal samples}}} \times 100\%$$
 (11)

其中: Num_{error} 和 $Num_{\text{Signal samples}}$ 分别表示系统识别错误的回波信号数量和实验设置的回波信号样本总数量。通过系统输出识别结果与设置目标之间的比对, 获得变量 Num_{error} 的具体取值。系统运行性能的测试指标为误识率波动幅值, 该指标的测试结果如下:

$$\epsilon = \eta_{\text{mistake}}(Num_{100}) - \eta_{\text{mistake}}(Num_{200})$$
 (12)

式中, $\eta_{\text{mistake}}(Num_{100})$ 和 $\eta_{\text{mistake}}(Num_{200})$ 分别对应的是回波信号样本为 100 和 200 时对应的信号误识率。计算得出的误识率波动幅值越小, 证明对应系统的运行鲁棒性能越优。

3.5 信号识别性能测试结果与分析

3.5.1 回波信号识别功能测试

系统识别性能的测试采用多次实验取平均值的方式, 通过相关数据的统计, 得出系统识别功能的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 雷达回波信号识别系统识别功能测试结果

实验次数	多普勒天气雷达回波信号样本总数量/GB	基于卷积双向长短时记忆网络的雷达信号识别系统识别错误的回波信号数量/GB	基于双通道卷积神经网络的雷达信号识别系统识别错误的回波信号数量/GB	多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统识别错误的回波信号数量/GB
1	250	242.3	248.5	249.6
2	250	241.6	246.7	250.0
3	250	237.4	245.4	249.6
4	250	235.5	247.7	249.7
5	250	241.4	245.9	250.0
6	250	243.0	246.8	250.0
7	250	242.7	245.2	249.9
8	250	238.7	246.6	250.0

将表 2 中的数据代入到公式 (11) 中, 得出两种传统系统误识率的平均值为 96.1% 和 98.6%, 而优化设计多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统的平均误识率为 99.9%, 证明所提方法的信号识别性能较优。

3.5.2 识别系统运行性能测试

将不同数量的多普勒天气雷达回波信号样本输入到

3 种识别系统中, 重复识别功能测试过程, 得出不同实验次数下误识率的测试结果, 从而反映识别系统的运行性能。通过相关数据的统计与公式 (12) 的计算, 得出 3 种识别系统运行性能的测试结果, 如图 12 所示。

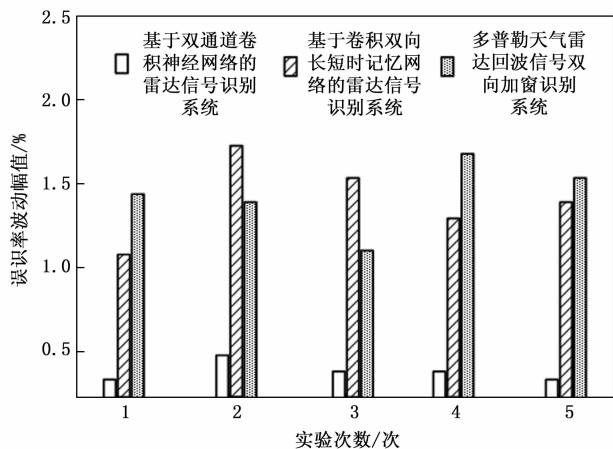


图 12 回波信号识别系统运行性能测试结果

从图 12 中可以直观地看出, 在不同实验次数下, 与两种传统识别系统相比, 优化设计系统的误识率波动幅值更低, 且能够控制在 0.5% 以下, 由此证明优化设计系统具有更高的鲁棒运行性能。

4 结束语

多普勒天气雷达回波的识别过程十分复杂, 仅凭预报人员和雷达数据很难对地面与降雨回波进行精确区分。因此为了给天气探测工作提供技术支持, 设计了多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别系统。多普勒天气雷达回波信号的双向加窗识别系统基于多普勒天气雷达回波信号生成器、信号滤波器、信号处理器等硬件设备对多普勒天气雷达回波信号进行采集和存储, 通过对雷达回波信号的双向加窗处理提升初始采集回波信号质量; 从时域和频域两个方面提取多普勒天气雷达回波信号特征, 根据信号特征与识别标准之间的匹配度, 通过与阈值的比对, 得出多普勒天气雷达回波信号双向加窗识别结果。测试结果表明该方法的识别性能和运行性能均较好, 能够为天气预报以及气象灾害的预警工作提供技术支持, 因此具有较高的应用意义。

参考文献:

[1] 普运伟, 刘涛涛, 吴海潇, 等. 基于卷积双向长短时记忆网络的雷达辐射源信号识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (22): 361-368.

[2] 全大英, 陈 赞, 唐泽雨, 等. 基于双通道卷积神经网络的雷达信号识别 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56 (7): 877-885.

[3] 李世通, 全大英, 唐泽雨, 等. 基于时频图像和高次频谱

特征的雷达信号识别 [J]. 电信科学, 2022, 38 (2): 84-91.

[4] 项 阳, 吴林林. 一次超级单体龙卷双偏振多普勒天气雷达分析 [J]. 气象科技, 2021, 49 (4): 579-588.

[5] 宋海凌, 孙宇航, 何 良, 等. 雷达回波信号的深度学习目标检测识别方法研究 [J]. 战术导弹技术, 2021 (2): 117-126.

[6] 王 博. 激光雷达能见度回波信号去噪算法 [J]. 气象科技, 2021, 49 (3): 322-327.

[7] 李宝林, 杨 冬, 王 露, 等. 1 550 nm 相干激光测风雷达微弱回波信号处理 [J]. 压电与声光, 2022, 44 (2): 333-338.

[8] 曹鹏宇, 杨承志, 陈泽盛, 等. 基于深度残差收缩注意力网络的雷达信号识别方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (3): 717-725.

[9] 高敬鹏, 毛新蕊, 吴若无, 等. 混合滤波器优化的雷达信号调制识别算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43 (10): 1522-1531.

[10] 徐 帅, 刘鲁涛. P-Net 框架下的小样本雷达信号识别算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43 (5): 739-744.

[11] 韩晶晶, 王树红. 基于 CEEMD 的压缩感知降噪在雷达信号识别中的应用研究 [J]. 电子器件, 2022, 45 (5): 1094-1099.

[12] 颜 康, 金炜东, 黄颖坤, 等. 基于元学习的畸变雷达电磁信号识别 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (4): 1351-1357.

[13] 于浩洋, 尹 良, 李书芳, 等. 生成对抗网络小样本雷达调制信号识别算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48 (6): 96-104.

[14] 王红卫, 董鹏宇, 陈 游, 等. 半监督条件下基于朴素贝叶斯和 Choi-Williams 时频分布能量积累的雷达信号识别 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (3): 589-597.

[15] 何重航, 刘佳琪, 王宪栋, 等. 基于卷积网络和对抗式学习的雷达信号识别算法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021 (2): 121-126.

[16] 卓 健, 廖胜石, 周冬静, 等. 基于数据特征的雷达径向干扰回波识别方法 [J]. 热带气象学报, 2022, 38 (6): 787-799.

[17] 谢存祥, 张立民, 钟兆根. 基于时频特征提取和残差神经网络的雷达信号识别 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (4): 917-926.

[18] 苏琮智, 王美玲, 杨承志, 等. 基于改进 EfficientNet 的雷达信号调制方式识别 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (1): 93-100.

[19] 何伟婧, 潘明海. 宽带运动目标回波的多普勒特性模拟方法 [J]. 雷达科学与技术, 2021, 19 (4): 403-408.

[20] 张志斌. 基于序贯思想的高阶无迹变换多普勒雷达跟踪算法 [J]. 电视技术, 2022, 46 (4): 39-42.