

风廓线雷达的原理及维护

祁 珊

民航新疆空中交通管理局空管中心气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年3月5日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年6月4日

摘要

风廓线雷达作为前沿的大气探测设备, 在气象及相关领域的重要性与日俱增。本文深入剖析风廓线雷达的工作原理, 在气象预报、航空安全保障等多方面的应用, 同时从日常定期维护、维护方法与要点, 为提升风廓线雷达运行稳定性与数据准确性提供参考。

关键词

风廓线雷达, 散射, 应用, 维护

Principle and Maintenance of Wind Profiler Radar

Shan Qi

Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Administration of Civil Aviation, Urumqi Xinjiang

Received: Mar. 5th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: Jun. 4th, 2025

Abstract

As a cutting-edge atmospheric detection equipment, wind profile radar is becoming more and more important in meteorology and related fields. This paper deeply analyzes the working principle of wind profile radar and its application in weather forecast, aviation safety and other aspects, and provides reference for improving the operation stability and data accuracy of wind profile radar from daily regular maintenance, maintenance methods and key points.

Keywords

Wind Profile Radar, Scattering, Application, Maintenance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风廓线雷达能够精确探测大气风场垂直分布，获取丰富气象信息。相比传统气象探测手段，具有时空分辨率高、实时性强等显著优势。近年来，风廓线雷达在全球广泛应用，应用领域不断扩展，对其维护工作要求也日益严苛。深入探究风廓线雷达的应用与维护，对充分发挥其性能、保障气象业务及相关领域稳定运行意义重大。

2. 风廓线雷达工作原理

风廓线雷达是利用大气湍流对电磁波的散射作用对大气风场等物理量进行探测的遥感设备。采用相控阵天线体制。发射机为全固态低压功率组件，无大功率电源设备，相对采用机械扫描天线体制，大功率发射管的雷达，可靠性高，故障率低配备有无线电声探测系统的风廓线雷达还可以通过发射的电磁波与声波的相互作用遥感大气虚温。探测方式为连续的无人值守的遥感方式探测资料种类多、时空分辨率高、准确度高连续获取资料、自动化程度高、业务运行成本低。

风廓线雷达通常采用多个不同指向的天线波束进行探测。一般采用垂直波束测量垂直方向的速度分量，而采用倾斜波束测量水平方向速度分量在不同方向上的投影，通过矢量合成的方法最终得到水平风速和风向。

3. 环境和模式对风廓线雷达探测性能的影响

3.1. 天气情况

(1) 风廓线雷达是基于风场均匀的假设条件进行风场探测的。因此，在不稳定的天气条件的探测经常会得到比较差的结果。

(2) 大风天气，如果地杂波处理的不好，也会导致探测错误。

(3) 降水天气下，如果模式运用不当，可能会造成测速距离模糊。工作参数应用不当，也可能造成测速模糊。

3.2. 探测模式

大多数风廓线雷达采用了高低模式组合测风，但由于低模式在某些天气情况下探测威力太低，因此不能完全弥补高模式探测的盲区，造成某些高度层的探测不到可信风场。这种情况可以通过增加一个中模式来解决[1]。

3.3. 杂波干扰

- (1) 地杂波干扰处理；
- (2) RF 干扰处理；
- (3) 飞机等干扰。

4. 风廓线雷达算法

4.1. VAD 算法

VAD 算法假设在一定高度范围内风场是均匀的。风廓线雷达通过多个不同方位角的倾斜波束测量径

向速度，利用三角函数关系求解水平风速和风向。其基本原理是将不同方位角的径向速度数据拟合成一条曲线，曲线的特征参数与水平风场相关。例如，曲线的最大值和最小值对应的方向角与风向有关，通过特定公式可计算出水平风速和风向。优点是算法相对简单，计算速度快，在风场均匀性较好的情况下能得到较为准确的结果。缺点是对风场均匀性假设依赖较强，当实际风场存在较大垂直切变或不均匀性时，反演精度会下降。

4.2. 最小二乘反演算法

最小二乘反演算法通过建立目标函数，使测量得到的径向速度与根据假设风场模型计算得到的理论径向速度之间的误差平方和最小。在风廓线雷达中，通常假设风场满足一定的模型，如均匀风场模型、线性风切变模型等。根据模型建立理论径向速度与风场参数(水平风速、风向、垂直速度等)的关系，通过最小二乘法求解风场参数，使理论值与测量值的误差达到最小。优点是能够适应更复杂的风场情况，反演精度较高，对风场不均匀性有较好的适应性。缺点是计算复杂度较高，需要较多的计算资源和时间，且对测量数据的质量要求较高，数据噪声可能会影响反演结果的准确性。

4.3. 信号处理算法

4.3.1. 脉冲压缩算法

为提高雷达的距离分辨率，风廓线雷达通常采用脉冲压缩技术。通过发射具有特殊编码的脉冲信号，如线性调频(LFM)脉冲信号，其频率在脉冲持续时间内线性变化。在接收端，利用匹配滤波器对回波信号进行处理。匹配滤波器的冲激响应与发射信号的共轭匹配，经过匹配滤波后，宽脉冲信号被压缩成窄脉冲信号，从而提高距离分辨率。

4.3.2. 相干积累算法

相干积累是提高信号信噪比的重要手段。风廓线雷达接收到的回波信号非常微弱，夹杂着大量噪声。通过对多个脉冲的回波信号进行相干叠加，信号的相位保持一致，能量得到增强，而噪声由于是随机的，在叠加过程中相互抵消。相干积累的脉冲数越多，信噪比提高的效果越明显。

4.3.3. 相干积累算法频谱分析算法

频谱分析用于从回波信号中提取多普勒频移信息。常用的频谱分析方法是快速傅里叶变换(FFT)。FFT将时域信号转换为频域信号，通过分析频域信号的频谱特性，找到多普勒频移对应的频率成分，从而确定散射体的径向速度。

5. 风廓线雷达产品

“垂直风廓线”实时风产品指的是本场上空连续实时探测到的实时垂直高度的风场信息。需要指出的是在软件界面上显示的实时风严格来说是 15 分钟内的平均风。半小时风产品是在时间轴上把一天时间按半小时分化成 48 段时间空间，在每个半点计算最近半小时内的垂直高度上的平均风信息。一小时风产品是在时间轴上把每天时间按小时分化成 24 段时间空间，在每个整点计算最近一小时内的垂直高度上的平均风信息。

“规定高度层风”是利用风廓线雷达探测的垂直高度上的风场来计算 300 米，600 米，900 米高度层的平均风。在计算 300 米规定高度层风时，采用了 150~450 米之间雷达探测的垂直风数据进行矢量平均。在计算 600 米规定高度层风时，采用了 450~750 米之间雷达探测的垂直风数据进行矢量平均。在计算 900 米规定高度层风时，采用了 750~1050 米之间雷达探测的垂直风数据进行矢量平均。

“合成风”是利用风廓线雷达探测的垂直风场来计算从地面到指定高度层的平均风。在计算高度 H

的合成风时，采用了从地面到高度 H 之间雷达探测的垂直风数据进行矢量平均。当前计算的合成风高度为 300、500、800、1000、1500、2000 米。

“滑动实时平均风”是利用风廓线雷达探测的垂直实时风场时间序列来计算指定时间平均风，它是对“实时风”的二次时间平均。

6. 风廓线雷达故障诊断与排除

6.1. 天线和馈线网络

风廓线雷达天线由多个子天线单元组成，均为无源微波辐射单元，正常不会损坏。存在因天线密封不好导致单元受潮损坏。雷达工作不正常时(威力不足)，在判断完所有其它系统均正常后，才会最后测试天线单元，通过矢量网络分析仪测试天线单元驻波判断是否正常。馈线网络中的移相器影响波束指向问题，自身带有故障检测，终端能够定位故障。(对于系统中有几十个移相器的，损坏 1~2 只对探测影响较小。)

6.2. 发射机

集中式发射机包括前级组件、末级组件、控保电路、电源等；分布式发射机包括多路 TR 组件、电源等。各类欠输入、欠输出、过工作比、过热等故障均有检测，在终端有显示。

6.3. 接收机

接收机主要包括频率源、激励源、标定源以及电源等，故障在模块面板和终端界面上都有显示，通道动态特性、频率特性、噪声系数标定等可通过机内信号源做标定，判断系统是否正常。对于接收系统前段最重要的低噪声放大器(场放)是否故障，有个简易判断方法：正常工作时的终端上单频道的噪声电平值是固定的，如发现噪声电平值较平时降低了，初步判断可能场放有问题，可以试着断开场放电源，如果噪声电平值不变，说明场放未起到放大作用，存在故障。

6.4. 信号处理

雷达终端软件上无噪声谱或报“上行连接错误”，数字接收机或信号处理卡工作指示灯不亮或不闪烁，检查数字接收机或信号处理卡的直流供电是否正常，检查数字接收机的采样时间是否正常，断开电源重新开机等操作。

6.5. 监控/波控系统

波控是否正常直接影响移相器工作状态，最终影响雷达发出的波束是否成型，关注面板和终端上故障指示灯确定波束控制是否正常。

7. 风廓线雷达维护要点

雷达维护是一项重要内容，维护的目的在于提高装备的使用可靠性，防止固有可靠性水平的降低，使装备在规定条件下和规定时间内保持完成规定功能的能力，始终处于良好的技术状态，顺利进行探测任务。

风廓线雷达维护分为定期维护和不定期维护两种。定期维护是按照规定的维护周期和维护内容实施维护，分为日维护、月维护和年维护。不定期维护是在上级下达临时性重要探测任务时，以及系统配置地域气候条件发生变化时实施的维护。日维护检查系统运行状态，检查各分机面板上面的表头和指示灯指示是否正常，检查室外通风分机的风扇运转是否正常；月维护每月进行一次。风廓线雷达连续开机 1 个

月后,建议停机4h,以便让系统内部温度彻底恢复到常温,并对室内、室外设备进行维护,重点是清洗环控设备防尘滤网和清除RASS声发射桶内杂草、树叶等。年维护每年进行一次。年维护主要是全面检查、保养雷达的各个单元,全面测量雷达的技术参数,并对雷达进行必要的整修。维护时间通常需1~2天。要检测雷达系统的主要技术指标,评估系统的技术状态和性能;发射功率、输出改善因子、灵敏度、噪声系数,对天线和机柜接地线进行检查维护,确保接地线连接可靠,雷达带有UPS电源,其电池组存在自放电现象,长时间放置不用会导致电池组损坏^[2]。若放置时间超过半年应对UPS电源进行充电。雷达经过年维护,应基本保持原有的,整机工作稳定。

8. 结论

风廓线雷达凭借其独特的工作原理和强大的探测能力,在气象预报、航空安全保障、环境监测等多个领域发挥着不可代替的作用。通过加强日常维护、定期进行安全检查和及时准确地处理故障,能够确保风廓线雷达的稳定运行,为用户提供高质量的气象数据支持,未来随着技术的不断进步,风廓线雷达在性能提升和应用拓展方面将有更大的潜力,提供更重要的保障。

参考文献

- [1] 马涛. 机场风廓线雷达维护与测试[J]. 中国新通信, 2018(8): 15-16.
- [2] 李鑫, 鲁霞, 操筠. 浅谈边界层风廓线雷达系统维护检修[C]//中国气象学会. 第32届中国气象学会年会论文集. 2015.