

Characteristics and Causes of Data Interruptions in the Wind Profiler at Xi'an Airport

Yukai Wang

Meteorological Center, Air Traffic Control Center, Civil Aviation Northwest Air Traffic Management Bureau of China, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The CFL-03 boundary layer wind profile radar frequently experiences interruptions in vertical wind data and frequent triggering of the transmitter's power-off protection during operation. To address these issues, this study conducted a systematic diagnostic and quantitative analysis. Through phased troubleshooting tests, the primary causes of the malfunctions were ultimately identified: failure of the transmission channel in the frequency synthesis module and burnout of the power combiner due to a fault. In-depth analysis indicates that internal impedance mismatch in the power combiner is the core cause. This issue leads to a significant increase in reflected power during high-power operation, which in turn triggers the overheating protection mechanism, resulting in the equipment shutting down. Additionally, this study utilized an attenuation compensation method to verify the transmitter's peak power, confirming that it meets performance requirements in high-power mode and that the excitation signal amplitude reaches the specified level.

Keywords

Wind-profile radar; data interruption diagnosis; power combiner failure; civil aviation meteorological support.

西安机场风廓线雷达数据中断的特征与成因

王昱凯

中国民用航空西北地区空中交通管理局空管中心气象中心, 中国·陕西 西安 710000

摘要

CFL-03型边界层风廓线雷达在运行中时常面临垂直风数据中断以及发射机断电保护频繁触发的问题。针对这些现象,本研究进行了系统的诊断与量化分析。通过分阶段的排查测试,最终确定了故障的主要来源:频率合成模块的发射通道失效与功率合成器因故障导致烧蚀。深入分析表明,功率合成器内部阻抗失配是核心诱因,该问题会在高功率运行模式下引发反射功率大幅上升,进而触发过热保护机制,致使设备断电。此外,本研究利用衰减补偿方法对发射机的峰值功率进行了验证,结果确认其在高功率模式下满足指标要求,激励信号幅值也达到了规定水平。

关键词

风廓线雷达; 数据中断诊断; 功率合成器故障; 民航气象保障

1 引言

随着我国国民经济快速发展,风廓线雷达应用正进入高速发展期,目前该技术已广泛应用于局地天气预报、航空管制及大气污染防治。CFL-03型风廓线雷达已入选中国气象局全国布网工程,加之地方环保部门、机场空管等用户需求,总部署量已逾80套。系统总结该型雷达的典型故障现象,对故障的快速定位与排除至关重要。风廓线雷达天线增益随阵面平整度增加呈指数下降,旁瓣电平随之上升,因此需在探测高度要求与工艺可实现性之间权衡,制定合理的阵面平整度技术指标[1]。CFL-03雷达夏季数据获取率显著高于冬季,240米以上高度测得风速普遍偏低,风向误差随高度

递增;其观测数据可有效反映大气环境变化,具备监测天气过程演变的能力[2]。通过对风廓线雷达降水回波双峰型功率谱中大气与降水信号的分离,成功反演出雨滴谱指数分布参数,据此估算的云中液态水含量垂直分布,相比多普勒天气雷达更精细地反映了雨滴谱变化的影响[3]。基于风廓线雷达实测信号与噪声的高斯分布特性,利用高斯随机函数成功模拟了探测信号谱分布,验证了该方法可为评估雷达信息处理算法精度提供有效手段[4-5]。基于EOF分析的风廓线雷达资料质量控制方法有效滤除了小尺度噪声并保留关键尺度信息,显著改善数据同化效果,提升了对强降水落区及强度的短期预报能力;批量试验证实该方法可系统性优化降水预报[6]。功率谱重识别可修正降水初期风场反演偏差;联合多源数据反演大气比湿廓线误差;湍流/降水谱分离法有效提高了降水条件下水平风场反演精度,验证一致性显著

【作者简介】王昱凯(1997-),男,中国甘肃庆城县人,硕士,助理工程师,从事气象探测设施应用维护研究。

提升 [7-9]。风廓线雷达设计及应用研究成果丰富,但聚焦其故障诊断的技术文献相对较少。深入分析风廓线雷达故障诊断问题,对于实现故障快速定位、提升设备维修效率具有关键意义。

2 CFL-03 廓线雷达工作原理

风廓线雷达向空中发射射频脉冲调制信号,接收大气湍流后向散射回波。该散射源于湍流中尺度满足布拉格条件的涡旋结构。湍流随大气平流运动,通过对回波信号多普勒频移的分析可反演三维风矢量。观测时雷达波束需指向天顶方向及与其成 15° 夹角的东、西、南、北四方位。

各方向雷达发射 N 个重复周期脉冲,接收以空间分辨率为单位的分层湍流散射信号。回波经接收机放大、模数转换和数字下变频后生成基带 IQ 信号;通过时频域积累、去直流、加窗及 FFT 处理,最终获取对应波束不同距离的功率谱。经谱矩运算提取功率谱的零阶矩(总功率)、一阶矩(平均多普勒速度)及二阶矩(谱宽),完成序列处理后获得三波束各高度的矩数据集;最终经风场合成算法估算不同高度层的 u 、 v 、 w 三维风场分量。

CFL-03 型风廓线雷达通过硬件系统协同控制与气象反演算法实现大气参数的垂直探测。其工作流程可概括为:主控计算机依据预设探测模式驱动频率合成模块生成高频脉冲信号,经发射机功率放大环节调制增强后,由天馈系统定向辐射电磁波。电磁波在大气传播过程中,基于 Bragg 散射原理与半波长尺度湍流相互作用,产生的后向散射回波由同一天线系统捕获。接收信号经 TR 组件低噪声放大后,在接收通道依次完成混频、滤波及中频放大处理,最终输出 60MHz 中频信号至数字化中频接收机。该信号通过多级带通滤波器抑制带外干扰,经 ADC 采样与数字正交解调转换为基带 I/Q 数据,最终利用可编程 FIR 滤波器组及信号抽取模块实现数据降维处理,为气象反演算法提供优化输入。

3 数据中断诊断工作过程

3.1 故障现象

12月5日00:00,西安咸阳国际机场观测站的 CFL-03 型边界层风廓线雷达处于高功率标准运行模式。执行前向波束大气扫描期间,机务人员巡检发现系统性异常:垂直剖面 2000 米以上高度的垂直风速分量数据完全丢失。观测数据显示,该故障在特定高度层以上呈现系统性截断特征。

该状态维持至当日 00:40 许,2000 米以下高度层的水平风与垂直风数据流保持完整,接收机噪声电平波动范围正常。随后系统故障恶化,全高度垂直风分量数据流突发中断(包含先前正常区域)。终端界面显示所有垂直风速通道持续输出无效值,标志着系统关键功能全面停止。

机务员立即启动一级故障预案重启发射机子系统。监控数据显示重启后发射机高压、电流等关键参数恢复建立,终端界面 2000 米以下垂直风数据恢复连续输出;2000 米以

上数据短暂显示"扫描中"状态后再次丢失,系统转入局部功能受限模式。该响应现象表明故障源存在于对供电状态敏感的发射链路或控制环节。

缓解效果呈现暂时性特征。持续运行数小时后,当日下午全高度垂直风数据再度中断。二次重启发射机期间,功率恢复过程中触发紧急断电保护机制——此为设备针对过流、过温或驻波异常等严重故障的强制性安全响应,系统随即进入保护性关机状态。

故障升级后,系统日志与监控界面显示核心报警信息多集中于接收机与频综单元:频综模块发出"发射故障"报警(该模块负责生成高稳定性射频激励信号及相位基准)。报警表明其输出功率、频率稳定度或相位噪声等核心参数劣化已超出容限阈值。

设备处于特定工作状态:高功率模式提供最大功率输出(用于高空目标探测),前波束系该模式主发射通道。该组合工况使得系统承受最大功率负载与最高强度通道使用压力。

3.2 排查过程

CFL-03 型边界层风廓线雷达系统配置 $3.6\text{m} \times 3.6\text{m}$ 平面相控阵天线,具备电子扫描多波束探测能力。其 60m 垂直空间分辨率可满足大气边界层精细化观测需求。主控平台采用工业级 Win7 工控机,除核心信号处理单元外集成三大功能模块:系统参数标定组件(用于响应特性校准)、声散射测温系统(RASS)以及双发射机主备冗余架构,该设计显著增强了系统的持续运行可靠性。

在发射机告警停测及断电保护故障发生后,依据发射子系统工作原理制定了分级排查策略。该子系统包含前级功放模块、双路发射机功放模块、控保电路、电源模块、单刀双掷开关及风冷系统。首阶段基础结构检查过程中,开启设备机柜后重点检测功率合成器 I/O 射频线缆连接状态、控制信号接口以及接地端子状况。操作时全程佩戴防静电手环,使用扭矩扳手验证 N 型连接器螺纹紧固度,并借助光纤内窥镜对线缆弯折处护套完整性进行显微探查。结果显示所有连接器锁紧机构到位,线体物理形态完好,最终确认物理连接状态正常。

鉴于故障触发了硬件级断电保护机制,需重点检测发射机本体工作状态。将功放组合后板 X2 射频端口通过专用测试电缆接入衰减链路系统,该链路前端配置 30dB 定向耦合器(峰值功率容量 $> 10\text{kW}$),后端设置 20dB 衰减器以实现功率计量程匹配。计入测试电缆在 2.9GHz 工作频点 0.5dB 的插入损耗(经实测确定),总衰减补偿量设定为 50.5dB。功率计选用峰值保持模式,其占空比参数严格依据雷达发射时序设定——根据发射脉宽 ($4\mu\text{s}$) 与周期 ($100\mu\text{s}$) 关系计算确定。

高功率运行模式下,功率计实测数据稳定维持在 2.11kW (技术规范阈值为 2kW)。对比低功率模式测试数据(模

式 1: 1.708kW; 模式 2: 1.842kW) 可知, 发射机功放单元在两种低功率工况下均未达到技术指标要求。

针对双发射系统组合 2 单元开展深度检测发现: 更换功率合成器后, 两种低功率模式的输出功率均恢复至 2kW 标称值以上。故障合成器拆解检测显示, 其内部多级耦合腔体存在大面积碳化现象, 高频磁芯表面呈现熔融金属溅射痕迹。经分析, 此典型过流烧蚀源于阻抗匹配网络失效导致的射频能量异常聚集。高功率运行时, 局部功率密度临界值触发过温保护机制, 进而引发强制断电。

维修后系统监测表明: 0-6000m 高度范围内垂直风数据获取率达 98.7%, 三波束湍流谱结构完整。中频模块告警消除, 接收机噪声系数稳定在 3.2dB (技术标称值 \leq 3.5dB)。经 72 小时连续观测验证, 系统性能符合《边界层风廓线雷达观测规范》要求, 故障确认排除。本案例证实功率合成器作为大功率射频核心无源器件, 其状态劣化将引发系统性保护机制动作; 定期检测该器件的电压驻波比参数可有效预防此类故障, 具有较高的工程应用价值。

4 其他常见问题

4.1 天线系统电磁性能评估

基于矢量网络分析仪实测各波束端口电压驻波比 (VSWR)。测试结果表明: 前向波束 (1.256)、后向波束 (1.091) 及右向波束 (1.163) 符合 \leq 1.3 的技术规范; 而中 1 波束 (1.472) 和左向波束 (1.520) 严重超标。左向波束反射系数达 22.3%, 意味着 23.8% 的发射功率因阻抗失配被反射, 该现象不仅导致辐射场型畸变, 同时加剧功率器件老化。建议更换天线阵列以消除介质基板受潮或阵元形变引发的辐射特性退化风险。

4.2 接收机链路性能检测

系统呈现显著性能衰减: 低模式一 (-0.63dBm)、模式二 (4.46dBm) 及高模式 (12.43dBm) 的激励信号幅度均低于 \geq 13dBm 的标称值。该衰减源于混频器本振泄露或中频增益下降, 造成信噪比恶化 5-7dB。系统灵敏度为 -148dBm (设计目标 -150dBm), 结合接收通道总增益 61.41dB (标称 \geq 60dB), 证实噪声系数劣化至 6.2dB。高频头增益

29.97dB 虽满足要求, 但采样时钟引入 $\pm 0.3^\circ$ 测角误差。

激励功率不足显著削弱弱信号检测能力, 相位抖动引发频谱泄露问题, 导致整机动态范围缩减 15dB (当前无法稳定探测典型值 -145dBm 湍流回波)。系统性能已逼近失效临界点, 建议实施接收系统整体更换以保障探测精度

5 结语

本研究针对 CFL-03 型边界层风廓线雷达的系统性故障问题, 系统实施故障诊断、参数化测试及维修验证的全流程研究。基于分层故障树分析方法, 准确识别出三大核心缺陷: 功率合成器烧蚀、频综发射通道失效以及天线多波束驻波比超标。通过衰减补偿功率测试、多端口驻波扫描和接收链路动态范围解耦测量, 定量揭示了发射机功率合规性与接收机性能衰退之间的矛盾关联; 研究进一步验证了射频-数字系统耦合衰退的作用机制, 为同类设备的预防性维护构建了具有普适性的工程指导框架。

参考文献

- [1] 李喆, 李春化, 何平, 等. 风廓线雷达天线阵面不平整度对探测性能影响分析 [J]. 气象科技, 2015, 43(3): 349-354.
- [2] 李霞, 王磊, 任泉. 乌鲁木齐风廓线雷达探测能力评估 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 9-18.
- [3] 王晓蕾, 阮征, 葛润生, 等. 风廓线雷达探测降水云中雨滴谱的试验研究 [J]. 高原气象, 2010, 29(2): 498-505.
- [4] 卢小云, 邹鹏, 王雨. 荆门固定式边界层风廓线雷达系统介绍 [J]. 科技风, 2013(6): 42.
- [5] 王莎, 阮征, 葛润生. 风廓线雷达探测大气返回信号谱的仿真模拟 [J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 20-29.
- [6] 张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用 [J]. 气象学报, 2015, 73(1): 159-176.
- [7] 陈浩君, 黄兴友, 孙婧, 等. 基于径向功率谱的风廓线雷达错误风数据处理 [J]. 应用气象学报, 2015, 26(4): 460-471.
- [8] 孙康远, 阮征, 魏鸣, 等. 风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验 [J]. 应用气象学报, 2013, 24(4): 407-415.
- [9] 林晓萌, 何平, 黄兴友. 一种抑制降水对风廓线雷达水平风干扰的方法 [J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 66-75.