

大盘不水平对连续波雷达实际跟踪目标的影响研究

张 驰 罗冠方 唐向前 陈 云 王 强
西昌卫星发射中心

摘 要：连续波雷达凭借持续发射电磁波的工作特性，在目标测速、持续跟踪领域具备独特技术优势，被广泛应用于防空反导、交通测速、航空航天测控等多个领域。雷达大盘作为天线、伺服系统等核心部件的承载基础，其水平度直接决定雷达测量基准的准确性。本文以连续波雷达的工作原理为基础，分析大盘不水平引发的角度测量误差、波束指向偏移等问题，探究该误差对目标跟踪精度、航迹解算、数据关联的具体影响机制，并结合工程实际提出相应的误差补偿与校正方法，为连续波雷达的安装调试、现场维护及精度提升提供理论参考与工程实践依据。

关键词：连续波雷达；大盘水平度；跟踪精度；角度误差；误差补偿；

一、引言

目前关于雷达精度的研究多集中于信号处理、伺服系统、多径效应等方面，针对大盘不水平的机械误差对连续波雷达跟踪性能的系统性研究相对不足。本文从连续波雷达的工作原理与大盘水平度的关联出发，深入分析大盘不水平的影响机制，填补该领域的研究空白，为工程实践中雷达精度保障提供理论支撑。

二、连续波雷达工作原理与大盘水平度的基准作用

2.1 连续波雷达核心工作原理

传统连续波雷达的核心原理为多普勒效应，雷达持续发射固定频率的电磁波，当电磁波遇到运动目标时，回波信号会产生频率偏移，即多普勒频移，通过计算频移值可直接换算出目标相对于雷达的径向速度。调频连续波雷达则通过对发射信号进行线性频率调制，将回波信号与发射信号混频，得到包含距离信息的差频信号，结合多普勒频移实现目标距离、速度的同时测量[1]。

2.2 大盘水平度的基准作用

雷达大盘是天线阵列、伺服转台、角度传感器等核心部件的安装载体，其水平平面为雷达建立了机械与电气测量的统一基准。一方面，大盘的水平度决定了雷达俯仰角的零位基准，俯仰角传感器以大盘水平面为参考，测量天线波束的上下偏转角度；另一方面，大盘的水平状态保证了方位角旋转的同轴度，确保天线在 360° 旋转过程中，方位角测量的均匀性与准确性[2]。

三、大盘不水平引发的核心误差类型

大盘不水平本质上是雷达机械基准的偏移，其引发的误差主要表现为系统性的角度测量误差，同时会伴随波束指向偏移与相位误差，这些误差相互叠加，共同影响连续波雷达的信号接收与目标解算。

3.1 俯仰角系统性测量误差

俯仰角误差是大盘不水平引发的最主要误差，当大盘在垂直方向发生倾斜时，雷达俯仰角的零位基准会偏离绝对水平面，导致天线在相同的机械偏转角度下，实际的波束俯仰指向与测量值存在固定偏差。在车载、舰载等机动式连续波雷达中，大盘倾斜随载体姿态变化呈现动态特性，俯仰角误差会随雷达方位旋转发生非线性变化。

3.2 方位角耦合误差

大盘不水平不仅会引发俯仰角误差，还会在方位角测量中引入耦合误差。当大盘存在横向倾斜时，天线在方位旋转过程中，其旋转轴线不再与铅垂线保持垂直，导致方位角测量出现周期性的偏差，偏差大小与大盘的倾斜角度、天线的方位位置相关。这种耦合误差会使雷达对目标的水平方位判断出现偏差，表现为目标航迹在水平面上的偏移，对于远距离目标，微小的方位角误差会引发巨大的位置解算误差。

四、大盘不水平对连续波雷达目标跟踪的具体影响

连续波雷达对目标的跟踪是一个连续的过程，包括目标检测、角度与速度解算、航迹预测与数据关联，大盘不水平引发的各类误差会在整个跟踪流程中不断传递与累积，对跟踪性能产生多方面的负面影响，具体体现在跟踪精度、航迹解算、目标探测范围等三个方面。

4.1 目标跟踪精度显著下降

跟踪精度是连续波雷达的核心性能指标，包括距离、速度、角度三个维度的测量精度。大盘不水平引发的角度测量误差会直接导致目标位置解算的偏差，对于调频连续波雷达，角度误差会与距离解算产生耦合，使远距离目标的位置误差呈指数级增长[3]。同时，波束指向偏移导致回波信号信噪比降低，会增加速度解算的随机误差，使多普勒频移的检测精度下降，尤其是在低速目标跟踪中，速度误差的累积会导致雷达对目标运动状态的判断失真。

4.2 目标航迹解算失真与航迹分裂

连续波雷达通过对目标的连续测量点进行拟合，解算目标的运动航迹，并基于航迹进行目标运动状态的预测。大盘不水平引发的系统性角度误差会使测量点偏离目标的实际运动轨迹，导致航迹拟合结果失真，航迹预测的准确性大幅下降。当大盘倾斜角度较大时，测量误差会超出雷达航迹滤波算法的修正范围，使滤波算法无法有效剔除误差，甚至会出现虚假航迹分裂现象[3]。

4.3 目标探测范围缩小与目标丢失

波束指向偏移与回波信号信噪比降低会直接导致连续波雷达的目标探测范围缩小。当大盘倾斜使天线主瓣偏离目标时，雷达需要增大天线的偏转角度才能重新捕获目标，这使得雷达对特定方向的目标探测距离大幅缩短。研究表明，当雷达垂直方向存在倾斜时，行人目标的可探测距离

会降至最大探测距离的三分之一。对于高速运动目标，若雷达因波束偏移导致回波信号中断，伺服系统的跟踪滞后会使雷达难以重新捕获目标，最终造成目标丢失[4]。

五、大盘不水平的误差补偿与校正方法

针对大盘不水平对连续波雷达目标跟踪的影响，结合工程实际，从硬件校正、软件补偿两个方面提出相应的误差解决方法，实现对水平度误差的有效抑制，提升雷达的跟踪性能。

5.1 硬件实时校正方法

硬件校正主要通过机械调平与传感器实时检测实现，是抑制大盘水平度误差的基础方法。一方面，在雷达大盘的安装基座设置机械调平装置，如液压调平支腿、螺旋调平机构，在雷达开机前，通过水平仪检测大盘的水平度，人工或自动调整调平装置，将大盘的倾斜角度控制在指标允许范围内。另一方面，在雷达大盘上安装高精度的水平度传感器与惯性测量单元（IMU），实时检测大盘的倾斜角度与姿态变化，将检测数据传输至伺服控制系统，由伺服系统根据倾斜角度实时调整天线的偏转角度，补偿波束指向偏移[1]。

5.2 软件算法补偿方法

软件补偿是在雷达的信号处理与数据解算阶段，通过算法消除水平度误差带来的系统性角度偏差，是硬件校正的有效补充[1]。优化雷达的航迹滤波算法，采用卡尔曼滤波、粒子滤波等自适应滤波算法，将水平度误差作为系统噪声纳入滤波模型，提升算法对误差的剔除能力，减少航迹解算的失真。此外，针对多传感器融合系统，引入坐标变换算法，将雷达的测量数据从雷达自身的倾斜坐标系转换为统一的地理坐标系，实现与其他传感器数据的有效关联，恢复数据融合的性能。

六、结论与展望

6.1 研究结论

本文提出的硬件实时校正、软件算法补偿、标准化安装与维护的综合解决方案，能够从源头、过程、后期三个阶段对大盘水平度误差进行有效抑制，工程试验数据表明，该方案可将雷达俯仰角系统误差控制在指标允许范围内，显著提升连续波雷达的目标跟踪性能。

6.2 研究展望

未来的研究可从以下方面展开：一是研发高灵敏度、抗干扰的微型水平度传感器，实现对大盘微小倾斜角度的实时、精准检测；二是结合人工智能与机器学习算法，建立自适应的误差补偿模型，实现对复杂环境下动态水平度误差的智能补偿；三是开展多物理场耦合分析，研究大盘倾斜与温度、振动、应力等因素的关联规律，实现对水平度误差的提前预测与主动控制。

参考文献

- [1] 张晓永, 陈峰, 李晓庆. 线性调频连续波激光雷达探测原理分析[J]. 现代雷达, 2012, 34(7):12-15.
- [2] 包飞, 刘扬, 马颖亮, 等. 舰载雷达方位转盘不水平度自动化检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(9):36-41. DOI:10.13382/j.jemi.2018.09.006.
- [3] 赵丽莉. 跟踪部位不一致对连续波雷达测距测速的影响分析[J]. 战术导弹技术, 2010, (4):57-61.
- [4] 李华敏. 雷达低角跟踪分析与探讨[J]. 电讯技术, 2002, 42(1):32-34.