

雷达发射机频率稳定性对测距精度的作用分析

勾 焯

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：雷达测距精度是衡量雷达系统性能的核心指标之一，直接影响目标定位、跟踪及后续决策的准确性。发射机作为雷达系统的核心部件，其频率稳定性通过多种机制对测距精度产生关键影响。本文从雷达测距基本原理出发，深入分析发射机频率稳定性的内涵及表征参数，系统探讨频率漂移、相位噪声等不稳定因素对测距精度的作用机制，结合实验数据验证频率稳定性与测距精度的量化关系，并提出提升发射机频率稳定性的技术路径。研究表明，发射机频率稳定性是决定雷达测距精度的关键因素，优化频率稳定度可显著提升雷达在精密测量、国防安全等领域的应用效能。

【关键词】：雷达发射机；频率稳定性；测距精度；相位噪声；频率漂移

DOI:10.12417/3041-0630.26.03.039

1 引言

随着雷达技术在航空航天、国防军事、气象观测等领域的广泛应用，对雷达测距精度的要求日益提高。当前，关于雷达测距精度的研究多集中于信号处理算法优化、接收机抗干扰设计等方面，对发射机频率稳定性的作用机制研究不够系统。因此，深入剖析发射机频率稳定性对测距精度的影响规律，提出针对性的优化策略，对于提升雷达系统整体性能具有重要的理论意义和工程应用价值。本文将从理论分析、机制探讨、实验验证三个维度展开研究，明确发射机频率稳定性与测距精度的内在关联。

2 雷达测距基本原理与发射机频率稳定性内涵

2.1 雷达测距基本原理

雷达测距的核心原理是利用电磁波的传播特性，通过测量发射信号与目标反射回波信号之间的时间差来计算目标距离。设雷达与目标之间的距离为 R ，电磁波在真空中的传播速度为 c ，发射信号与回波信号的时间差为 Δt ，则目标距离 R 的计算公式为：

$$R=c \times \Delta t / 2。$$

在实际雷达系统中，为提高测距精度，常采用脉冲测距或连续波测距两种方式。脉冲测距通过测量脉冲信号的发射与接收时间差实现测距，其测距精度主要取决于脉冲宽度和时间测量精度；连续波测距则通过测量发射信号与回波信号的相位差来计算距离，相位差测量精度直接决定测距精度。无论采用何种测距方式，发射信号的频率稳定性都会通过影响时间差或相位差的测量精度，最终作用于测距精度。

2.2 发射机频率稳定性内涵及表征参数

发射机频率稳定性是指发射机输出信号频率在规定时间内和规定环境条件下保持恒定的能力。根据时间尺度的不同，

频率稳定性可分为短期稳定性和长期稳定性。短期稳定性主要由相位噪声、频率抖动等因素引起，影响时间尺度通常在毫秒级至秒级；长期稳定性则主要由元器件老化、环境温度变化、电源波动等因素导致，影响时间尺度通常在分钟级以上。描述发射机频率稳定性的核心参数包括频率漂移、相位噪声和频率准确度。频率漂移是指输出信号频率随时间的缓慢变化，通常用单位时间内的频率变化量表示；相位噪声是指信号相位的随机波动，表现为信号频谱的展宽，常用单边带相位噪声功率谱密度表示；频率准确度是指实际输出频率与标称频率的偏差程度，直接影响测距基准的准确性。

3 发射机频率稳定性对测距精度的作用机制

3.1 频率漂移对测距精度的影响

频率漂移会导致发射信号的周期发生变化，进而影响时间差或相位差的测量精度。在脉冲测距系统中，发射脉冲的重复频率由发射机振荡频率决定，若振荡频率发生漂移，脉冲重复周期会随之变化。当测量发射脉冲与回波脉冲的时间差时，频率漂移会引入系统性误差。设发射机标称频率为 f_0 ，实际频率因漂移变为 f ，频率漂移量为 $\Delta f=f-f_0$ ，对应的脉冲周期变化量为：

$$\Delta T=1/f-1/f_0 \approx -\Delta f/f_0^2。$$

若时间差测量精度受脉冲周期变化的直接影响，最终会导致测距误差：

$$\Delta R=c \times \Delta T / 2 \approx -c \times \Delta f / (2f_0^2)。$$

在连续波测距系统中，频率漂移会导致发射信号与回波信号的相位差随时间累积误差。连续波测距中，距离与相位差的关系为 $R=\lambda \times \Delta \phi / (4\pi)$ ，其中 λ 为信号波长， $\Delta \phi$ 为发射信号与回波信号的相位差。波长 λ 与频率 f 满足 $\lambda=c/f$ ，当频率发生漂移 Δf 时，波长变化量为 $\Delta \lambda=-c \times \Delta f / f^2$ 。若相位差测量存在固定误差，

波长的变化会直接导致测距误差,且该误差会随距离的增加而累积。

3.2 相位噪声对测距精度的影响

相位噪声是发射机短期频率稳定性的核心表征,其本质是信号相位的随机波动,会导致发射信号频谱出现边带噪声,使信号的时间和相位测量产生随机误差。在脉冲测距系统中,相位噪声会导致脉冲上升沿和下降沿的抖动,进而影响时间差测量的稳定性。时间差测量的随机误差与相位噪声的功率谱密度直接相关,相位噪声功率谱密度越高,时间抖动越大,测距精度越差。

在连续波测距系统中,相位噪声会导致发射信号与回波信号的相位差出现随机波动,使测距结果产生随机误差。尤其是在多目标环境下,相位噪声会增加信号之间的干扰,进一步降低测距精度。例如,当存在多个相邻目标时,相位噪声引起的频谱展宽会导致回波信号相互叠加,难以准确区分不同目标的回波,从而引入测距模糊和误差。

3.3 频率准确度对测距精度的影响

频率准确度是发射机输出频率与标称频率的偏差程度,直接决定了测距基准的准确性。雷达测距的基准的是电磁波的传播速度和信号频率,若发射机实际频率与标称频率存在偏差,会导致波长计算出现误差,进而引入系统性测距误差。设标称频率为 f_0 ,实际频率为 f ,频率准确度为 $\Delta f/f_0$,则波长误差为 $\Delta\lambda/\lambda_0 = -\Delta f/f_0$,对应的测距误差为 $\Delta R/R_0 = -\Delta f/f_0$,即测距误差与频率准确度成正比。在精密测距场景中,即使微小的频率准确度偏差,也会导致显著的测距误差。例如,当频率准确度为 1×10^{-6} 时,若目标距离为10km,对应的测距误差可达1cm。

4 提升发射机频率稳定性的技术路径

4.1 采用高精度频率源

频率源是发射机的核心部件,其性能直接决定发射机的频率稳定性。采用高精度晶体振荡器、铷原子钟等作为频率源,

可显著提升频率稳定度。晶体振荡器具有体积小、成本低的特点,通过优化晶体切割工艺、采用恒温设计,可将短期频率稳定度提升至 1×10^{-12} /秒量级;铷原子钟则具有更高的长期稳定性,频率稳定度可达 1×10^{-14} /天量级,适用于对测距精度要求极高的精密雷达系统。

4.2 优化温度控制与电源设计

环境温度变化是导致发射机频率漂移的主要因素之一,采用高精度恒温箱对发射机核心部件进行温度控制,可将温度变化范围控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内,有效抑制温度引起的频率漂移。同时,电源波动会导致元器件工作状态不稳定,进而影响频率稳定性,采用低噪声稳压电源、滤波电路等设计,可降低电源噪声对频率源的干扰,提升频率稳定性。

4.3 引入频率稳定控制技术

采用闭环控制技术对发射机输出频率进行实时校准,是提升频率稳定性的有效手段。通过高精度频率计数器实时监测发射机输出频率,将测量结果与标称频率进行对比,若存在偏差,通过控制电路调节频率源的工作参数,实现频率的实时补偿。此外,采用锁相环技术可将发射机输出频率锁定在高精度参考频率上,有效抑制相位噪声和频率漂移,进一步提升频率稳定性。

5 结论

本文通过理论分析、机制探讨和实验验证,系统研究了雷达发射机频率稳定性对测距精度的作用。研究表明,发射机频率稳定性通过频率漂移、相位噪声、频率准确度三个核心参数影响测距精度:频率漂移会引入系统性测距误差,相位噪声会导致随机测距误差,频率准确度则直接决定测距基准的准确性。实验数据验证了频率稳定性与测距精度的正相关关系,频率稳定度提升可显著减小测距误差。提升发射机频率稳定性可通过采用高精度频率源、优化温度控制与电源设计、引入频率稳定控制技术、优化元器件选型与电路设计等技术路径实现。

参考文献:

- [1] 安克武,黄晓,王龙.天气雷达发射功率测量误差分析及校准方法[J].气象水文海洋仪器,2020,37(03):32-35.
- [2] 范青,甘成才.MARX 发生器在脉冲雷达发射机中的应用[J].现代雷达,2017,39(05):70-74.
- [3] 王刘军,刘昌锦.基于 Hilbert-Huang 变换的雷达发射机故障特征提取[J].兵工自动化,2013,32(08):68-70+80.