

脉冲多普勒雷达速度模糊问题的工程解决方法分析

赵文焘

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：脉冲多普勒雷达凭借高测速精度和强杂波抑制能力，广泛应用于防空、导航、气象等领域。速度模糊是其核心技术瓶颈，源于多普勒频率超出奈奎斯特采样极限导致的测量缠绕。本文先阐述速度模糊的形成机理，再从工程实现角度，系统分析高重频设计多重频解模糊查表法及改进算法等主流解决方法，对比各方法的技术特性适用场景及实施难点，结合实际应用案例验证方法有效性，为雷达系统设计及优化提供技术参考。

【关键词】：脉冲多普勒雷达；速度模糊；多重频；查表法；工程实现

DOI:10.12417/3041-0630.26.03.026

1 引言

脉冲多普勒雷达通过提取回波信号的多普勒频率实现目标径向速度测量，在军事侦察民用监测等场景中发挥关键作用。然而受脉冲重复频率限制，当目标速度超过最大不模糊速度时，会出现速度模糊现象，导致测量值与真实值偏差较大，严重影响雷达系统的探测性能。如何在工程中高效解决速度模糊问题，平衡测速范围精度及系统复杂度，成为雷达技术研究的重点方向。本文基于速度模糊的物理本质，梳理各类工程解决方法的核心逻辑与实现路径，为相关技术研发及工程应用提供支撑。

2 脉冲多普勒雷达速度模糊的形成机理

速度模糊的本质是多普勒频率采样过程中的频谱混叠，其形成与多普勒效应及奈奎斯特采样定理直接相关。当雷达发射信号照射运动目标时，回波信号频率会发生偏移，该偏移量即为多普勒频率，其与目标径向速度满足线性关系。在脉冲多普勒雷达中，信号采样频率等于脉冲重复频率，根据奈奎斯特采样定理，要无失真恢复多普勒信号，脉冲重复频率需至少为多普勒频率的两倍。当目标径向速度产生的多普勒频率超出脉冲重复频率的一半时，频谱会以脉冲重复频率为周期发生折叠，测量得到的多普勒频率并非真实值，而是真实值减去脉冲重复频率整数倍后的结果。

3 脉冲多普勒雷达速度模糊的主流工程解决方法

3.1 高重频设计方法

高重频设计方法是最直接的解模糊方案，其核心逻辑是通过提高脉冲重复频率扩展最大不模糊速度，确保目标产生的多普勒频率处于奈奎斯特采样范围内。根据最大不模糊速度计算公式，当脉冲重复频率提升一倍时，最大不模糊速度也会提升一倍，从而从根本上避免速度模糊的发生。在工程实现中，高重频设计需重点解决两个问题。一是发射机功率与散热问题，脉冲重复频率提高意味着单位时间内发射脉冲数量增加，发射

机平均功率上升，需优化发射链路设计，选用高功率器件并配备高效散热系统。二是距离模糊问题，提高脉冲重复频率会导致最大不模糊距离减小，可能出现距离模糊与速度模糊的权衡矛盾。该方法适用于对测速范围要求高且对测距范围要求宽松的场景，如部分机载火控雷达的近距离目标探测模式。高重频设计方法的优点是原理简单实现难度低，无需复杂的数据处理算法，能有效保证测速精度。其缺点是受硬件性能限制明显，脉冲重复频率的提升存在上限，且会引发距离模糊等衍生问题，适用场景具有局限性。

3.2 多重频解模糊方法

多重频解模糊方法通过采用两组及以上不同脉冲重复频率的信号进行探测，利用不同脉冲重复频率下速度测量值的差异，结合中国余数定理推算出目标真实速度。该方法无需大幅提高脉冲重复频率，可在保证测距性能的前提下解决速度模糊问题，是中重频脉冲多普勒雷达的主流解模糊方案。其核心原理是，对于同一目标，不同脉冲重复频率下的测量速度满足特定的余数关系。设两组脉冲重复频率分别为 PRF1 和 PRF2，对应的最大不模糊速度分别为 V_{max1} 和 V_{max2} ，测量速度分别为 $V1$ 和 $V2$ ，则目标真实速度 V 满足 $V \equiv V1 \pmod{V_{max1}}$ 且 $V \equiv V2 \pmod{V_{max2}}$ 。通过中国余数定理求解该同余方程组，即可得到唯一的真实速度值。为确保解的唯一性，各组脉冲重复频率需满足互质或存在特定的比例关系。

3.3 查表法及改进算法

查表法是基于多重频原理的工程化优化方案，其核心是通过预先建立余数差值查找表，简化真实速度的解算过程，提高实时性。该方法适用于脉冲重复频率固定的雷达系统，尤其适合对实时性要求高的工程场景。查表法的实现流程分为离线建表与在线解算两个阶段。离线建表阶段，先确定一组基准脉冲重复频率，再计算其他各脉冲重复频率相对于基准脉冲重复频率在不同距离单元上的余数差值，将这些差值按特定规则存储形成查找表。在线解算阶段，雷达通过多组脉冲重复频率测量

得到模糊速度后，计算测量值与基准值的余数差值，在查找表中搜索匹配的差值，即可快速得到真实速度。

针对传统查表法受测量误差影响较大的问题，工程中常采用改进型查表法。一是引入多普勒插值技术，通过对多普勒频谱进行插值处理，减小通道量化误差，提高模糊速度测量精度；二是设置合理的最大允许偏差阈值，对查找过程进行约束，避免因微小误差导致的匹配错误；三是优化查找表结构，采用分层存储与快速检索算法，提升解算效率。某工程实例表明，改进型查表法的解模糊正确率较传统方法提升了15%以上，且解算延迟控制在微秒级。

4 不同解决方法的性能对比及工程应用建议

4.1 性能对比

为清晰对比各方法的优劣，从测速范围、实时性、硬件成本、适用场景等关键指标进行量化分析，具体如下表所示。

表1 性能对比

解决方法	测速范围	实时性	硬件成本	复杂度	适用场景
高重频设计	取决于PRF上限	优	高	低	近距离高速度目标探测
多重频解模糊	宽	中	中	中	中距离兼顾测距测速
改进型查表法	宽	优	中低	中	固定参数实时测速场景

参考文献：

- [1] 金毅仁,张晓飞.脉冲多普勒天气雷达解距离模糊和解速度模糊方法设计[J].科技与创新,2024,(18):1-4+10.
- [2] 崔念,张江华,万红进,等.基于查表法解雷达导引头速度模糊算法的分析和仿真[J].火控雷达技术,2015,44(02):52-54+59.
- [3] 王建强,黄金杰.一种针对机动目标的解速度模糊新算法[J].现代信息科技,2024,8(12):61-65.

多传感器融合	宽	差	高	高	高精度高可靠性需求场景
--------	---	---	---	---	-------------

4.2 工程应用建议

在工程实践中，需根据雷达系统的具体应用场景性能指标及成本预算，选择合适的解模糊方案。对于近距离高速度目标探测场景，如机载近距格斗雷达，可优先采用高重频设计方法，以简单可靠的方式保证测速精度；对于中距离探测且需兼顾测距与测速性能的场景，如地面防空雷达，多重频解模糊方法是最优选择，能在避免速度模糊的同时保证足够的测距范围。

对于固定工作参数且对实时性要求高的场景，如气象雷达的风速测量，改进型查表法性价比最高，通过离线建表与在线快速检索，可实现高效解模糊；对于对测速精度与可靠性要求极高的场景，如精密制导雷达，可采用多重频解模糊结合多传感器融合的方案，通过多源数据交叉验证，进一步提升解模糊的正确率。此外，无论选择哪种方案，都需重视硬件性能与算法优化的协同设计。高重频设计需重点提升发射机的功率与散热能力，多重频及查表法需优化信号同步与数据处理链路，确保各环节性能匹配，最大限度发挥解模糊方案的效果。

5 结论

速度模糊问题直接影响脉冲多普勒雷达的测速精度与探测性能，是雷达系统设计中的核心技术难点。本文分析的高重频设计多重频解模糊及改进型查表法等工程解决方法，各有优劣且适用场景不同。高重频设计简单可靠但受硬件限制，多重频方法兼顾多性能指标但复杂度适中，改进型查表法实时性优且成本可控，需结合实际需求合理选择。