

提升毫米波雷达低速测速精度的信号处理方法探讨

郝宗杰

乌兰察布市产品质量计量检验检测中心 内蒙古 乌兰察布 012000

摘要：本文聚焦提升毫米波雷达低速测速精度的信号处理方法。先阐述毫米波雷达测速原理与低速测速挑战，介绍了信号预处理、clutter抑制、频谱分析等关键技术。分析系统参数、信号处理算法、环境因素对测速精度的影响。详细探讨基于多周期信号融合、压缩感知、深度学习、多传感器融合等提升测速精度的方法，为毫米波雷达低速测速提供多种技术思路。

关键词：毫米波雷达；测速精度；信号处理

1 毫米波雷达测速基本原理

1.1 毫米波雷达工作原理

毫米波雷达是利用毫米波频段（通常为30GHz-300GHz）的电磁波来工作的。它主要由发射机、接收机、天线以及信号处理模块等部分构成。发射机产生特定频率和调制方式的毫米波信号，通过天线向空间辐射出去。这些信号在传播过程中遇到目标后会反射回来，被接收天线接收。接收机将接收到的微弱信号进行放大、滤波等处理后，送入信号处理模块^[1]。毫米波具有波长短、频带宽的特点，这使得毫米波雷达能够实现较高的距离分辨率和速度分辨率，并且具有较强的抗干扰能力，能在复杂的环境中稳定工作。

1.2 测速原理

毫米波雷达测速主要基于多普勒效应。当雷达发射的电磁波遇到运动的目标时，反射波的频率会发生变化，这个频率变化量与目标相对于雷达的运动速度成正比。具体来说，假设雷达发射的信号频率为 f_0 ，目标以速度 v 相对于雷达运动，当目标朝向雷达运动时，反射波频率 f_r 会高于发射频率；当目标远离雷达运动时，反射波频率会低于发射频率。通过测量反射波与发射波之间的频率差，就可以计算出目标的速度。在实际应用中，雷达会发射连续波或者经过调制的信号，利用不同的调制方式（如线性调频连续波等）结合相应的信号处理算法，更精确地提取多普勒频移信息，从而准确测量目标速度。

1.3 低速测速的技术挑战

在低速测速场景下，毫米波雷达面临诸多技术挑战。首先，低速运动产生的多普勒频移较小，这使得信号的频率变化难以准确检测。由于毫米波雷达本身的频率分辨率有限，对于微小的频移可能无法有效区分，从而导致测速误差增大。其次，低速目标周围的静态杂波

对信号的干扰更为显著。这些杂波信号与目标信号在频域上可能相互重叠，增加了从复杂信号中提取目标速度信息的难度。另外，低速测速时，目标的微小运动变化（如人体的轻微晃动、车辆的缓慢启动等）也会对测速结果产生较大影响，要求雷达系统具有更高的灵敏度和稳定性来准确捕捉这些细微变化。

2 毫米波雷达低速测速信号处理关键技术

2.1 信号预处理

信号预处理是毫米波雷达低速测速信号处理的第一步，其目的是提高信号的质量，为后续处理提供更可靠的数据。预处理主要包括信号放大、滤波和降噪等操作。由于接收到的雷达回波信号通常非常微弱，容易受到噪声的干扰，因此需要先通过低噪声放大器对信号进行放大，增强信号的强度。接着，利用滤波器去除信号中的高频噪声和干扰成分，保留有用信号频段。还可以采用一些先进的降噪算法，如小波降噪等，进一步去除信号中的随机噪声，使信号更加平滑，便于后续的频谱分析和速度估计^[2]。

2.2 clutter抑制技术

在低速测速环境中，clutter（杂波）抑制技术至关重要。杂波主要来自于周围环境的静态或低速运动的物体反射信号，这些信号会掩盖目标信号，影响测速精度。常用的clutter抑制方法有空时自适应处理（STAP）技术。STAP技术通过在空间和时间维度上对接收信号进行联合自适应处理，能够有效地抑制杂波。它利用多个天线阵元接收信号，在空间上形成多个波束，同时在多个脉冲重复周期内对信号进行处理，通过构建空时二维滤波器，将杂波信号滤除，保留目标信号。另外，动目标显示（MTI）和动目标检测（MTD）技术也是常用的clutter抑制手段。MTI技术通过设置对消器，抑制固定杂波；MTD技术则是在MTI的基础上，利用多普勒滤波器

组进一步区分运动目标和杂波，提高对低速目标的检测能力。

2.3 频谱分析与频率估计

频谱分析和频率估计是毫米波雷达低速测速中确定目标速度的关键环节。经过预处理和clutter抑制后的信号，需要进行频谱分析以获取信号的频率成分。常用的频谱分析方法有快速傅里叶变换（FFT），它将时域信号转换为频域信号，通过分析频谱中的峰值位置来确定多普勒频移。然而，FFT存在频谱泄漏和栅栏效应等问题，会影响频率估计的精度。为了提高频率估计的准确性，可以采用一些改进的算法，如Zoom-FFT算法，它通过对感兴趣频段进行局部细化分析，提高频率分辨率；还有基于现代谱估计的方法，如多重信号分类（MUSIC）算法，它能够突破FFT频率分辨率的限制，在低信噪比情况下也能实现高精度的频率估计，从而更准确地测量目标速度。

3 影响毫米波雷达低速测速精度的关键因素

3.1 系统参数

毫米波雷达的系统参数对低速测速精度起着至关重要的决定性作用。其中，雷达的发射频率是关键参数之一。从多普勒频移公式来看，在目标速度相同的情况下，频率越高所产生的频移越大。理论上，较大的频移有助于更精准地测量目标速度，进而提高测速精度。然而，高频率也带来了一系列问题，它会显著增加系统的复杂度和成本，对硬件的要求也更为严苛，比如需要更高性能的射频器件等。雷达的带宽同样不容忽视。较大的带宽能够提升距离分辨率和速度分辨率，这意味着雷达可以更精确地区分不同的目标，并且更准确地测量目标的速度。但带宽的增加并非毫无代价，在技术实现上会面临诸多困难，信号处理算法的复杂度会大幅提高，需要更强大的计算能力来支撑。另外，天线的设计参数也影响着雷达性能。天线的波束宽度过宽，会使角度分辨率降低，容易引入多个目标的干扰；而天线增益不足，接收信号强度就会减弱，信噪比降低，最终影响测速的准确性。

3.2 信号处理算法

信号处理算法堪称毫米波雷达低速测速的核心要素，不同算法对测速精度的影响存在显著差异。以频谱分析算法为例，FFT算法具有简单快速的优点，能够快速完成信号的频谱分析，但其频率分辨率有限，在一些对精度要求较高的场景中可能无法满足需求。而现代谱估计算法虽然可以提高频率估计精度，让测速结果更准确，但它的计算复杂度极高，需要消耗大量的计算资源，

导致实时性较差，难以在实时性要求严格的场景中应用。在clutter抑制方面，STAP技术能够有效抑制杂波，提高信号质量，但它对系统资源和计算能力的要求极高，在实际应用中可能会受到硬件条件的限制^[3]。信号处理算法中的参数设置也至关重要，滤波器的参数、对消器的参数等都需要根据实际应用场景和雷达系统特性进行精细的优化调整。如果参数设置不合理，可能会导致杂波抑制不彻底，或者目标信号损失，进而影响测速精度。

3.3 环境因素

环境因素对毫米波雷达低速测速精度的影响不容小觑。天气条件是其中重要的影响因素之一，在雨、雪、雾等恶劣天气下，毫米波在传播过程中会遭遇衰减和散射。这使得接收信号的强度大幅减弱，信噪比降低，雷达接收到的有效信号质量变差，从而影响测速精度。周围环境中的障碍物也会对雷达信号产生干扰。障碍物会对雷达信号产生反射和折射，形成多径效应。接收信号中会出现多个路径的信号叠加，造成信号失真，增加信号处理的难度，降低测速的准确性。在城市环境中，高楼大厦、树木等障碍物众多，多径效应更为明显。电磁干扰环境也会对毫米波雷达产生不良影响。周围其他电子设备发射的电磁波可能会干扰雷达信号，使雷达接收到的信号出现误差，进而导致测速误差增大，影响测速的可靠性。

4 提升毫米波雷达低速测速精度的信号处理方法

4.1 基于多周期信号融合的处理方法

基于多周期信号融合的处理方法，其核心思路是采集多个周期的雷达回波信号并加以融合，以此提升测速精度。在毫米波雷达低速测速时，单个周期的信号极易受到噪声和杂波的干扰。噪声可能源于雷达系统内部的电子元件热噪声等，杂波则来自周围环境的反射，像地面、建筑物等。这些干扰会使信号失真，导致测速结果出现偏差。多周期信号融合能有效解决这一问题。具体实现有相干积累和非相干积累两种方式。相干积累对相位一致性要求极高，需先对各个周期信号进行精确的相位补偿，使它们的相位关系保持一致后再相加。这样能显著提高信号的信噪比，让微弱的目标信号凸显出来，增强对微弱信号的检测能力。非相干积累则相对简单，对信号的幅度进行平方或取模等操作后相加，虽不要求严格的相位一致，但也能在一定程度上提升信号质量。通过多周期信号融合，充分利用不同周期信号中的有用信息，抑制随机噪声和杂波，可有效提高毫米波雷达在低速测速时的精度和可靠性，为准确测量目标速度提供

有力保障。

4.2 基于压缩感知的信号处理方法

压缩感知理论为毫米波雷达低速测速信号处理开辟了全新路径。该理论表明,若信号在某个变换域呈现稀疏性,即大部分系数为零或接近零,那么就能以远低于奈奎斯特采样率的采样方式获取信号关键信息,并通过优化算法精确重建原始信号。在毫米波雷达低速测速场景中,目标信号在频域通常具备稀疏性。利用压缩感知技术,可大幅减少数据采集量。传统采样方式需按照奈奎斯特采样率进行,会产生大量数据,增加系统复杂度和处理难度。而压缩感知通过设计合适的测量矩阵对雷达回波信号采样,能以较少的数据量保留信号的主要特征。之后,采用基追踪(BP)、正交匹配追踪(OMP)等重建算法,从少量采样数据中恢复出完整的信号频谱。基于恢复的频谱,就能准确估计目标速度。这种方法不仅能提高测速精度,还尤其适用于对系统资源和功耗有严格限制的应用,如移动设备、小型无人机等领域的低速测速。

4.3 基于深度学习的信号处理方法

深度学习在毫米波雷达低速测速信号处理领域潜力巨大。通过构建深度神经网络模型,如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)及其变体等,可实现对雷达信号的自动特征提取和分类识别。在低速测速过程中,深度学习模型能够学习大量不同场景下的雷达信号特征,涵盖目标信号和杂波信号的特征。以CNN处理雷达信号的时频图像为例,CNN具有强大的特征提取能力,能自动从时频图像中挖掘出关键的特征信息。通过大量数据的训练,模型可以学会区分不同速度目标对应的特征模式。当输入新的雷达信号时,模型就能依据学习到的特征模式,准确判断目标速度,实现高精度的速度测量。深度学习方法具有出色的适应性和鲁棒性,能在复杂环境下自动学习信号特征,有效克服传统信号处理算法在低速测速中面临的局限性,如对复杂环境适应能力差、特征提取不准确等问题,为毫米波雷达低速测速提供了更可靠的技术手段。

4.4 多传感器融合的辅助测速方法

多传感器融合技术通过整合多种传感器的信息,显著提升毫米波雷达低速测速的精度和可靠性。除毫米波雷达外,还可结合摄像头、激光雷达、超声波传感器等其他类型传感器。不同传感器工作原理和特点各异,能提供互补信息。摄像头可捕捉丰富的视觉信息,用于目标识别和场景理解。激光雷达具有高精度的距离测量能力,能精确获取目标与传感器之间的距离信息,为速度计算提供准确的距离参数^[4]。超声波传感器在近距离测距方面优势明显,成本低且实现简单。将毫米波雷达测得的速度信息与其他传感器数据进行融合处理时,可采用卡尔曼滤波、数据关联等算法。卡尔曼滤波能对传感器数据进行最优估计,降低测量误差;数据关联算法可确定不同传感器测量数据之间的对应关系。通过这些算法,充分利用各传感器优势,弥补毫米波雷达在低速测速中的不足,提高测速的准确性和稳定性,尤其适用于复杂环境下的低速运动目标测速应用,如智能交通、自动驾驶等领域。

结束语

毫米波雷达低速测速在众多领域意义重大,但精度提升面临诸多挑战。本文探讨了多种信号处理方法,各有优势与适用场景。未来,随着技术发展,这些方法有望进一步优化融合。同时,新理论、新技术的不断涌现,也将为毫米波雷达低速测速精度提升带来更多可能,推动其在智能交通、自动驾驶等领域更广泛应用。

参考文献

- [1]郭晓炜,杨继承,王媛,等.超远距离毫米波雷达关键技术研究与实现[J].公路,2025,70(03):430-438.
- [2]方朝钰.基于毫米波雷达及视觉识别的皮带防撕裂技术[J].设备管理与维修,2025,(02):89-91.
- [3]聂文杰,李媛,董琴琴,等.毫米波雷达差分测距方法的仿真设计与优化[J].汽车与新动力,2024,7(04):21-23.
- [4]郝博洋.智能驾驶系统正在快速迭代升级[J].汽车制造业,2024,(04):8-11.