

基于小波变换的测距雷达信号去噪及特征提取研究

赵瑞龙 元文鹏 邓鑫辉

陕西长岭电子科技有限责任公司 陕西 宝鸡 721006

摘要：本文深入探讨了基于小波变换的测距雷达信号去噪及特征提取技术。通过详细分析小波变换的理论基础、去噪算法以及特征提取方法，本文揭示了小波变换在提升雷达信号质量和提取关键信息方面的独特优势。研究表明，小波变换不仅能够有效去除雷达信号中的多种噪声，还能准确提取目标的距离、速度等关键特征，为雷达系统的性能优化提供了有力支持。

关键词：小波变换；测距雷达；信号去噪；特征提取

引言

测距雷达作为现代探测技术的核心组件，在军事侦察、气象观测、交通监控等领域发挥着至关重要的作用。然而，雷达信号在传输过程中易受环境噪声、设备噪声等多种干扰，导致信号质量下降，进而影响测距精度和识别效果。因此，开发高效、准确的雷达信号处理技术，对于提升雷达系统的整体性能具有重要意义。小波变换作为一种先进的时频分析工具，因其良好的时频局部性和多尺度分析能力，在雷达信号处理领域展现出巨大的应用潜力。

1 小波变换的基本原理及特性

1.1 小波变换定义

小波变换，作为一种先进的信号处理工具，其核心在于将复杂信号拆解成一系列具有特定频率和尺度特征的分量。与傅里叶变换的单一频域解析不同，小波变换巧妙地融合了时间域与频域的信息，使得信号的局部特性——即时频特性得以精准捕捉。这一特性对于处理非平稳信号尤为重要，因为它能够揭示信号在不同时间点上的频率成分变化，为信号分析提供了更为细腻的视角。

1.2 小波基函数选择

小波基函数，作为小波变换的基石，其选择直接关系到变换结果的准确性和有效性。在实际应用中，需根据信号的具体特性和分析目的来精心挑选合适的小波基。例如，Haar小波以其简单的构造和快速的计算速度，在图像压缩和快速信号处理中表现优异；而Daubechies小波则因其良好的正交性和紧支撑性，在信号去噪和压缩中广受青睐^[1]。此外，Coiflet小波凭借其对称性和平滑性，在信号特征提取和模式识别中展现出独特优势。因此，在选择小波基时，需综合考虑信号的平滑度、突变性、周期性等特征，以及处理目标对时频分辨率、计算效率的要求，以确保分析结果的准确性和实用性。

1.3 多尺度分析

多尺度分析是小波变换最为核心的特性之一，它允许我们在多个尺度（或频率层）上对信号进行逐层分解。这一特性使得信号的高频细节（如边缘、突变）和低频轮廓（如趋势、背景）得以有效分离。通过在不同尺度上的细致观察，我们可以深入理解信号在不同频率段上的行为模式，为信号的去噪、特征提取、压缩等处理提供强有力的支持。多尺度分析不仅提高了信号处理的灵活性，还极大地增强了信号分析的深度和广度，使得小波变换成为处理复杂信号不可或缺的有力工具。

2 基于小波变换的测距雷达信号去噪

2.1 雷达信号噪声类型及影响

雷达信号中的噪声来源多样，主要包括白噪声、背景噪声和杂波等。每种噪声都有其独特的特性和对雷达系统性能的影响。这些噪声的存在不仅降低了雷达信号的质量，还严重影响了雷达系统的测距精度、目标识别能力和整体性能。因此，采取有效的去噪方法对于提升雷达系统的性能具有重要意义。

2.1.1 白噪声

白噪声是一种在频域上均匀分布的噪声，其功率谱密度在整个频率范围内保持恒定。在雷达信号中，白噪声主要来源于电子设备的热噪声、量化噪声等。白噪声的存在使得雷达信号在时域上呈现出随机波动的特性，降低了信号的信噪比，从而影响了雷达系统的检测精度和分辨率。

2.1.2 背景噪声

背景噪声是指雷达系统在工作环境中固有的、与雷达信号无关的噪声。它可能来源于大气中的电磁干扰、地面反射、其他雷达系统的干扰等。背景噪声通常具有较低的频率成分，但能量较大，容易掩盖雷达信号中的微弱目标信息，导致雷达系统的漏报率增加。

2.1.3 杂波

杂波是指雷达信号中除目标回波外的其他不需要的回波信号,如地物回波、气象回波、干扰信号等。杂波的存在会干扰雷达系统对目标信号的准确识别,特别是在复杂环境下,杂波可能掩盖或混淆目标信号,导致雷达系统的误报率上升。

2.2 小波去噪算法

2.2.1 阈值去噪

阈值去噪是基于小波变换的最常用去噪方法之一。其基本思想是利用小波变换将雷达信号分解到不同的尺度上,得到一系列小波系数。然后,根据设定的阈值,将小于阈值的小波系数视为噪声并去除,保留大于阈值的系数进行信号重构。这样,就能有效地去除噪声,保留信号的有用成分。阈值的选择是阈值去噪算法的关键。过高的阈值可能导致信号的有用成分被误删,而过低的阈值则可能无法彻底去除噪声。因此,在实际应用中,需要根据雷达信号的特点和噪声水平,选择合适的阈值。常用的阈值选择方法包括硬阈值法、软阈值法以及基于统计特性的自适应阈值法等。硬阈值法是将小于阈值的小波系数直接置为零,而保留大于阈值的系数不变。这种方法简单直接,但可能导致信号在阈值处出现不连续的现象。软阈值法则是对小波系数进行平滑处理,将小于阈值的系数逐渐减小至零,而大于阈值的系数则按一定比例进行缩减^[2]。这种方法能够避免信号在阈值处的不连续性,但可能会导致信号的细节信息丢失。自适应阈值法则是根据信号的统计特性来动态调整阈值,以适应不同信号和噪声条件下的去噪需求。

2.2.2 模极大值去噪

模极大值去噪是另一种基于小波变换的去噪方法。该方法利用小波变换模极大值与传播信号奇异性的关系,通过检测并保留信号奇异点对应的小波变换模极大值,去除噪声产生的模极大值,从而实现信号去噪。在小波变换中,信号的奇异点(如突变点、边缘等)对应的小波变换系数往往具有较大的模值。而噪声由于具有随机性,其产生的小波变换模极大值通常较小且分布均匀。因此,可以通过设定一个合适的模极大值阈值,将小于阈值的模极大值视为噪声并去除,保留大于阈值的模极大值进行信号重构。模极大值去噪方法能够有效地保留信号的奇异点信息,对于处理具有突变特性的雷达信号具有显著优势。然而,该方法也存在一些局限性,如模极大值的检测精度和阈值的选择对去噪效果影响较大。因此,在实际应用中需要谨慎选择参数,并进行适当的优化和调整。

2.2.3 相关去噪

相关去噪是基于信号在各尺度上小波变换的相关性来进行去噪的方法。在小波变换中,信号的有用成分在各尺度上的小波系数之间通常具有较强的相关性,而噪声则表现为较弱的随机性。因此,可以通过计算相邻尺度间小波系数的相关性,去除相关性较弱的噪声系数,保留相关性较强的信号系数。相关去噪方法的关键在于如何准确计算小波系数的相关性。常用的方法包括计算相邻尺度间小波系数的相关系数、互信息量等。这些方法能够衡量小波系数之间的相似程度,并根据相似程度来判断是否为噪声或信号成分。相关去噪方法具有较好的去噪效果,特别是对于具有强相关性的信号而言。然而,该方法也存在一些挑战,如如何准确计算相关性、如何处理不同尺度间的差异等。因此,在实际应用中需要结合具体信号的特点和噪声水平,选择合适的相关性计算方法和参数设置。

3 基于小波变换的测距雷达信号特征提取

3.1 雷达信号特征类型

雷达信号特征主要可以分为时间域特征和频率域特征两大类。这些特征共同构成了雷达信号识别的基石,为雷达系统的目标检测和定位提供了丰富的信息。

3.1.1 时间域特征

时间域特征主要描述雷达信号在时间轴上的表现,包括脉冲宽度、脉冲到达时间、脉冲幅度等。其中,脉冲宽度是雷达信号的一个重要特征,它反映了雷达发射脉冲的持续时间,与雷达系统的分辨率和测距精度密切相关。脉冲到达时间则是雷达信号到达接收机的时刻,通过测量脉冲到达时间差,可以计算出目标的距离信息。脉冲幅度则反映了雷达信号的强度,与目标的反射特性和雷达系统的发射功率有关。时间域特征具有直观、易测量的特点,是雷达系统中最基础也是最重要的特征之一^[3]。然而,在复杂的电磁环境中,时间域特征可能受到噪声、干扰等因素的影响,导致测量误差增大。因此,需要采用有效的信号处理方法来提高时间域特征的提取精度和鲁棒性。

3.1.2 频率域特征

频率域特征主要描述雷达信号在频率轴上的表现,包括多普勒频率、频谱特征等。多普勒频率是雷达信号中一个非常重要的特征,它反映了目标与雷达系统之间的相对运动速度。通过测量多普勒频率的变化,可以计算出目标的运动速度、方向等信息。频谱特征则是雷达信号在频域上的分布特性,包括信号的频率成分、功率谱密度等。通过频谱分析,可以了解雷达信号的频率特

性,为目标识别提供丰富的信息。频率域特征具有对信号动态变化敏感、抗噪性能强的特点,是雷达系统中用于目标识别和跟踪的重要特征。然而,频率域特征的提取需要复杂的信号处理算法和较高的计算成本。因此,在实际应用中需要综合考虑算法的性能和计算效率,选择合适的频率域特征提取方法。

3.2 基于小波变换的特征提取方法

小波变换因其独特的时频分析能力和多尺度分解特性,在雷达信号特征提取中得到了广泛应用。以下将详细介绍基于小波变换的脉冲宽度提取、多普勒频率提取和频谱特征提取方法。

3.2.1 脉冲宽度提取

脉冲宽度是雷达信号的一个重要时间域特征,对于雷达系统的分辨率和测距精度具有重要影响。基于小波变换的脉冲宽度提取方法利用了小波变换的多尺度分解特性。首先,对雷达信号进行小波变换,将其分解到不同的尺度上。然后,在不同尺度上观察脉冲信号的表现差异。由于脉冲信号在不同尺度上的宽度会有所不同,因此可以通过比较不同尺度上的脉冲宽度来提取出最准确的脉冲宽度特征。在具体实现中,可以选择合适的小波基函数和分解层数,以确保脉冲信号在不同尺度上的表现差异足够明显。同时,还可以采用一些优化算法来提高脉冲宽度提取的精度和鲁棒性,如阈值处理、峰值检测等。

3.2.2 多普勒频率提取

多普勒频率是雷达信号中一个重要的频率域特征,反映了目标与雷达系统之间的相对运动速度。基于小波变换的多普勒频率提取方法利用了小波变换的时频分析能力。首先,对雷达回波信号进行小波变换,将其分解到不同的尺度上。然后,在各尺度上检测频率成分的变化,特别是与多普勒频率相关的频率成分。通过比较不同尺度上的频率变化,可以提取出多普勒频率特征。在实际应用中,多普勒频率的提取可能会受到噪声、干扰等因素的影响。为了提高多普勒频率提取的准确性和鲁棒性,可以采用一些预处理技术来抑制噪声和干扰,如滤波、去噪等^[4]。同时,还可以结合其他信号处理方法来进一步提高多普勒频率提取的性能,如傅里叶变换、时

频分析等。

3.2.3 频谱特征提取

频谱特征是雷达信号在频域上的分布特性,对于目标识别具有重要意义。基于小波变换的频谱特征提取方法通常采用小波包分解技术。小波包分解是小波变换的一种扩展,它可以将信号分解到更细的频段上,从而提供更丰富的频谱信息。首先,对雷达信号进行小波包分解,得到不同频段的信号分量。然后,对各分量的频谱特性进行分析,提取出频谱特征。这些特征可以包括信号的频率成分、功率谱密度、频谱峰值等。通过比较不同频段上的频谱特征,可以对雷达信号进行更细致的分析和识别。为了提高频谱特征提取的准确性和鲁棒性,可以采用一些优化算法和技术。例如,可以选择合适的小波包基函数和分解层数,以确保频谱特征的提取效果最佳。同时,还可以采用一些特征选择算法来降低特征维度,提高计算效率。此外,还可以结合其他信号处理方法来进一步提高频谱特征提取的性能,如短时傅里叶变换、Wigner-Ville分布等。

结语

本文深入研究了基于小波变换的测距雷达信号去噪及特征提取技术。通过详细分析小波变换的理论基础、去噪算法以及特征提取方法,揭示了小波变换在雷达信号处理中的独特优势。小波变换不仅能够有效去除雷达信号中的噪声,还能准确提取目标的关键特征,为雷达系统的性能优化提供了有力支持。未来研究可以进一步探索小波变换与其他先进信号处理技术的融合应用,以进一步提升雷达信号处理的效率和准确性。

参考文献

- [1]孙宸,胡嘉龙,王昆,等.基于小波变换的激光雷达回波信号去噪方法研究[J].雷达与对抗,2022,42(04):20-22+57.
- [2]金舒萍,汤雪彬.基于小波变换的雷达目标识别方法探讨[J].数字技术与应用,2022,40(11):55-57.
- [3]张龙,王兴理,张琪,等.基于小波变换和距离引导值的雷达杂波抑制分析[J].现代雷达,2020,42(07):23-28.
- [4]杨俊,李静和,孟淑君,等.小波与曲波变换探地雷达数据去噪对比分析[J].地球物理学进展,2019,34(05):2097-2105.