

基于离散小波变换的吸波复合材料表面波衰减信号重构

程红飞^{1,2*}, 陈继博¹, 王智勇¹

(1.中国航发北京航空材料研究院, 北京市, 100095;

2.北京航空航天大学, 北京市, 100191;

* 通讯作者, chenghongfei1989@126.com)

摘要: 对吸波复合材料进行高频表面波衰减性能测试时, 由于波长比较接近复合材料厚度以及转台转动过程的微小震动的影响, 使得其在电磁波入射角度大的测试曲线存在着一定程度的失真, RCS随方位角变化的回波信号上常常出现大量细小的杂峰。由于表面波衰减系数的计算需要对大角度入射时的RCS的峰值进行选取, 但杂峰的存在使得主峰值并不能明确地判定和选取。本文针对表面波测试试样随着方位角转动产生的RCS曲线这类非稳态信号, 采用离散小波变换、选取Daubechies 4阶小波基对失真的测试数据进行了解析与重构, 取得了比较好的效果。

关键词: 离散小波变换; 吸波复合材料; 表面波

引言

小波分析是20世纪80年代以来兴起的一个数学分支, 它在信号处理、图像处理、数据压缩、数值分析等众多领域中得到了广泛应用。小波分析的核心思想是将信号或函数分解成不同尺度的部分, 从而能够在时间和频率上局部化地分析信号的特性, 因此在处理非平稳信号时具有显著优势。小波变换可以分为连续小波变换(Continuous Wavelet Transform, CWT)和离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)。连续小波变换是通过将信号与一族连续的小波函数进行卷积得到的。离散小波变换则是对信号进行离散化处理, 通常采用快速算法, 如马拉算法。离散小波变换的一个显著优点是其计算效率高, 适合于大规模数据处理。离散小波变换通过对信号进行多分辨率分解, 将信号分解为一系列近似分量和细节分量。这些分量可以通过小波重构算法重新组合, 恢复原始信号。在小波分析中选择合适的小波基函数是至关重要的。常用的小波基函数有哈尔小波(Haar wavelet)、Daubechies小波、Coiflet小波、Symlet小波等。哈尔小波是最简单的小波基函数, 它具有明确的物理意义和简单的计算方式, 但其缺点是光滑性较差。Daubechies小波由Ingrid Daubechies提出, 具有良好的正交性和平滑性, 是应用最为广泛的小波基函数之一。Coiflet小波和Symlet小波则是为特定应用场景设计的, 具有更好的对称性和平滑性 [1-2]。

吸波复合材料由于结构功能一体化的特点, 在越来越多的场合中得到了应用。目前针对反射率性能对材料选择、各层厚度进行计算和实验优化, 但没有在其表面波衰减性能上去寻找规律。在实际的应用中, 微波信号往往以不同的入射角度照射到吸波材料上, 而大角度的入射将会在导体表面激发表面波, 这种情况下材料的表面波衰减能力会对雷达散射截面积具有重要影响 [3-4]。

因此, 研究这类材料表面波衰减性能的影响因素, 对于设计和优化吸波材料具有重要的理论和实践意义。然而吸波复合材料的过程中, 由于分散困难、预浸料成膜取向、板材固化与加工精度问题, 最终制得的表面波测试样品常常与理论设计存在偏差, 此外在进行表面波测试时, 由于转台转动过程中有微小震动, 使得其在入射电磁波频率高、入射角度大的测试曲线存在着一定程度的失真, 特别是在大角度的回波信号上常常出现大量细小的杂峰。由于表面波衰减系数的计算需要对大角度入射时的RCS的峰值进行选取, 但由于杂峰存在主峰值并不能明确地判定和选取, 另外由于表面波测试试样随着方位角转动产生的RCS曲线属于非稳态信号, 因此采用小波分析对测试数据进行解析与重构有很大的必要性。

1. 实验与方分析法

1.1. 小波变换原理

1.1.1. 基本原理

小波变换能够通过信号与小波基函数进行卷积，来分析信号在不同尺度下的成分。给定一个信号 $f(t)$ 和小波基 $\psi(t)$ ，连续小波变换 (CWT) 的数学表达式见式 (1)：

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

公式 (1) 中 $W_f(a, b)$ 是小波变换的系数，表示信号 $f(t)$ 在尺度 a 和位置 b 处的局部特征； a 是尺度参数，控制小波的伸缩； b 是平移参数，控制小波的位置； $\psi(t)$ 是小波基函数，通常是一个具有局部特征的函数。这个公式表示将信号 $f(t)$ 与一个缩放和平移的小波基函数进行卷积。通过调整尺度 a 和位置 b ，可以在不同的尺度上分析信号的局部特征。

1.1.2. 离散小波变换

对于离散信号，使用离散小波变换，它将信号分解为不同频率的子带（近似和细节）。DWT 的核心在于使用二进制的尺度和位移，通常通过递归的方式将信号分解为多个层次，每一层由低频近似部分和高频细节部分组成。

假设有一个离散信号 $f[n]$ ，其离散小波变换的基本步骤如下：低频部分（近似系数）：通过与低通滤波器 $h[n]$ 卷积，提取信号的低频部分。高频部分（细节系数）：通过与高通滤波器 $g[n]$ 卷积，提取信号的高频部分。

公式为（见式2及式3）：

$$a_k = \sum_n f[n] \cdot h[n - 2k] \quad (\text{低频近似系数}) \quad (2)$$

$$d_k = \sum_n f[n] \cdot g[n - 2k] \quad (\text{高频细节系数}) \quad (3)$$

公式(2)、(3)中的 a_k 表示第 k 层的低频近似系数， d_k 表示第 k 层的高频细节系数， $h[n]$ 和 $g[n]$ 是低通和高通滤波器的离散小波函数（在db4小波中， $h[n]$ 和 $g[n]$ 有明确的表达式）。

1.1.3. db4 小波

db4 (Daubechies 4阶小波) 是Daubechies 小波族中的一员，具有4个零矩和4个小波系数。其小波基函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 具有如下特征：尺度函数 $\phi(t)$ 用于提取信号的低频部分（近似部分）。小波函数 $\psi(t)$ 用于提取信号的高频部分（细节部分）。

在离散情况下，我们通过使用适当的滤波器来实现这些小波的分解。

$$h[n] = \frac{1}{8} [-1, 4, 6, 4, -1] \quad (4)$$

$$g[n] = \frac{1}{8} [1, -4, 6, -4, 1] \quad (5)$$

db4 小波的具体离散滤波器系数（低通和高通）包括低通滤波器 $h[n]$ 和高通滤波器 $g[n]$ ，见公式 (4)、(5) 所示，这些滤波器用于对信号进行卷积，得到信号的低频和高频部分。

1.1.4. 小波重构

小波变换的逆变换（即信号的重构）则是将所有层次的低频和高频系数通过逆小波变换合并回来，重构原始信号。

逆小波变换的公式为：

$$f(t) = \sum_k a_k \cdot \phi[t - k] + \sum_k d_k \cdot \psi[t - k] \quad (6)$$

公式(6)中 a_k 和 d_k 分别是重构时使用的低频和高频系数； $\phi(t)$ 和 $\psi(t)$ 是尺度函数和小波函数。

1.2. 表面波衰减测试结果分析方法

在使用小波分析进行长方形吸波板的雷达散射截面(RCS)曲线重构时,选择合适的小波基函数是很重要的,尤其是在曲线中存在明显的峰值和急剧变化的情况下。此外,长方形吸波板的RCS曲线随方位角的变化不是周期性的,而是根据物体的几何形状、入射角度和电磁波相互作用的复杂性进行变化。因此,在选择合适的小波基进行小波分析时,考虑以下几个因素:

(1) 捕捉快速变化和细节:由于反射、衍射等因素,RCS曲线中存在较为显著的峰值、急剧变化或者边缘效应,我们需要选择能够捕捉高频成分的高效小波基。高频成分对应的是RCS曲线中的快速变化,因此需要选择能够细致捕捉这些细节的小波。

(2) 多分辨率分析:选择的小波基应该在不同的尺度上表现出较好的分辨率能力,小波变换通过分解信号为多个不同频率的子带,使我们能够在多个尺度上分析信号的局部特征,特别是在处理具有显著变化和突变的信号时。

(3) 对称性和光滑性:小波基需要具有较好的对称性和光滑性,以便在不失真信号细节的同时,尽量减少噪声的影响。尤其是对于RCS曲线,可能存在一些不规则的边缘或突变,因此选择对称且光滑的小波基能够保证在处理这些细节时不会出现过多的振铃效应。

总体思路是,在对RCS曲线进行小波分析时,我们首先使用db4小波将原始信号分解成近似系数(低频部分)和细节系数(高频部分)。然后,对高频细节系数进行去噪,使用db4小波可以有效提取RCS曲线中的主要特征,同时采用软阈值方法抑制杂峰等高频噪声,最后通过逆小波变换重构信号,得到去噪后的RCS曲线。

具体来说,首先基于RCS曲线的复杂性和变化特点,初步选择Daubechies小波(例如Daubechies-4或Daubechies-6),它能够提供较好的频率局部化能力,并且有效捕捉RCS曲线中的峰值和高频变化。根据重构结果再考虑尝试Symlet小波(如Symlet-4或Symlet-6),尤其在RCS曲线有较为平滑的部分,Symlet小波能提供更为平滑的重构效果。

如果信号中存在更多复杂的变化,尝试Coiflet小波(如Coiflet-4或Coiflet-6)来平衡信号的平滑性和细节捕捉能力。通过试验不同的小波基,比较它们在重构过程中对信号细节的保留效果,并根据实际需要调整小波阶数或选择其他小波基。进行多分辨率分析(即对不同尺度的信号进行分析),了解哪些部分对RCS曲线最为关键,进而实现最合适的小波基进行RCS曲线的重构。

使用数值分析软件对长方形吸波板RCS随方位角(0° - 90°)变化曲线进行小波分析并重构信号。由于在接近 90° 时存在多个杂峰,这意味着需要保留主要信号特征(如主峰),同时抑制高频噪声(杂峰)。具体实现流程如图1。

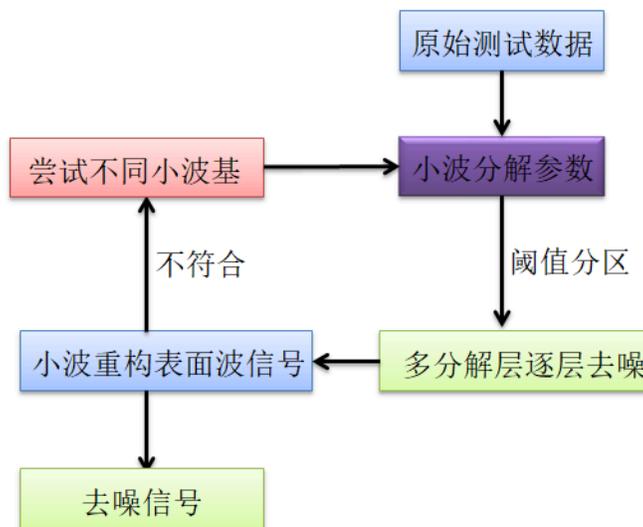


图1 表面波衰减信号重构流程

2. 结果与分析

2.1. 表面波衰减建模、仿真与测试

根据雷达吸波材料表面波衰减率测试方法 [5]中对试样尺寸的规定进行建模,金属试板如图2。采用Feko电磁仿真软件进行RCS仿真计算。电磁波频率10GHz,极化方式为HH,发射接收方式为单站,方位角设定为0-90°,MLFMM算法。为排除材料电磁参数因素的影响,代入吸波复合材料的电磁参数进行了仿真。测试根据GJB 9885-2020.雷达吸波材料表面波衰减率测试方法,采用室内场测试。

仿真得到图3所示结果,从复合材料覆盖金属板的RCS仿真结果可以看出,材料电磁参数的变化不会产生杂峰,方位角小于90°的RCS主峰比较明确,这是由于仿真采用的模型与材料参数、比较理想,电磁参数标量电磁参数,同时未考虑仪器分析精度、转台转动、震动等测试系统的影响。而测试结果图4显示在方位角接近90°时无明显主峰。

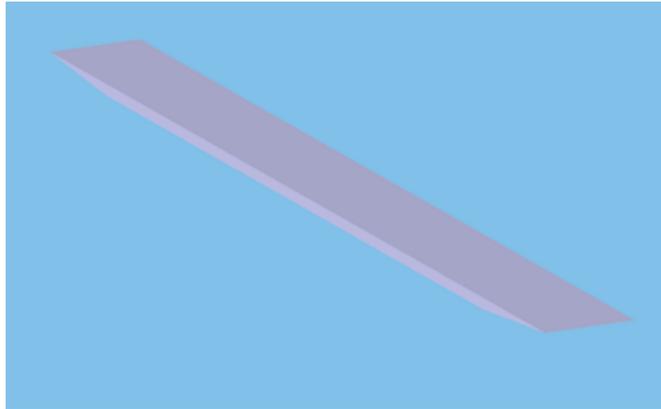


图2 仿真表面波板模型

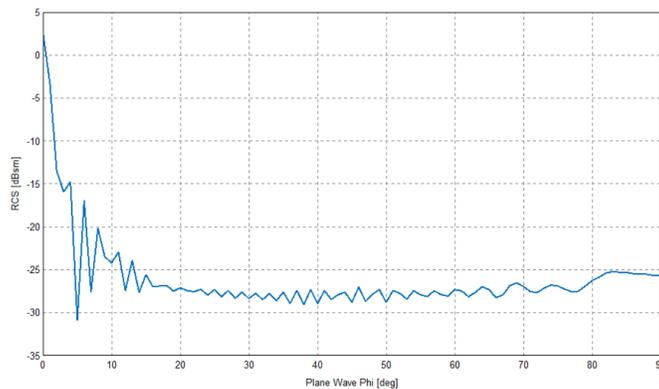


图3 表面波衰减性能仿真RCS曲线 (电磁波频率10GHz)

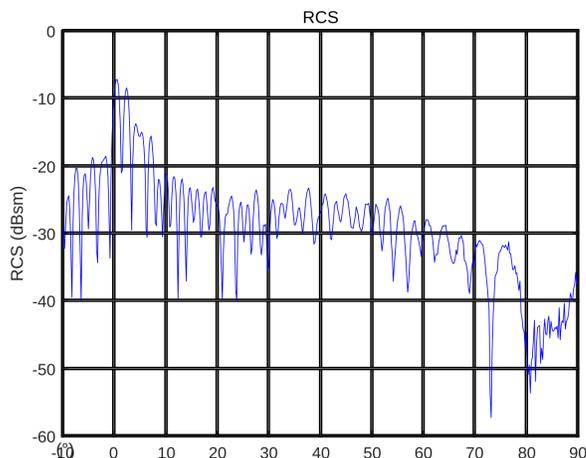


图4 电磁波频率为10GHz时金属板覆盖复合材料板的RCS测试曲线

如图4所示，由于电磁波频率10GHz时电磁波波长约3cm，目标尺寸与波长接近，电磁波散射易受电磁波入射角（大角度入射时）以及样品震动、表面曲率、棱角等细节的影响，导致RCS曲线不可避免地出现密集杂峰（由多径干涉、边缘绕射引起），导致无法进行表面波衰减峰的判定和选取，表面波衰减系数无法正常计算。但是从图3可以看出，基于理想模型计算得到的RCS曲线并没有这些信号噪声。所以需对RCS信号进行重构以接近理想状态，排除测试系统因素的影响，实现材料表面波衰减系数的计算。

2.2. 小波去噪

根据图4展示的RCS曲线原始信号，由于大角度与小角度信号的噪声影响程度不同，因此需要对方位角 0° - 80° 与 80° - 90° 分开进行阈值处理。

在尝试小波基与分解层数的过程中发现，采用Daubechies 4阶小波（分解层数3层）已可以达到重构RCS曲线、使之接近仿真曲线状态的目的，重构过程中的平滑系数对重构的效果影响相对较大。图5为平滑系数变化的RCS曲线对比。

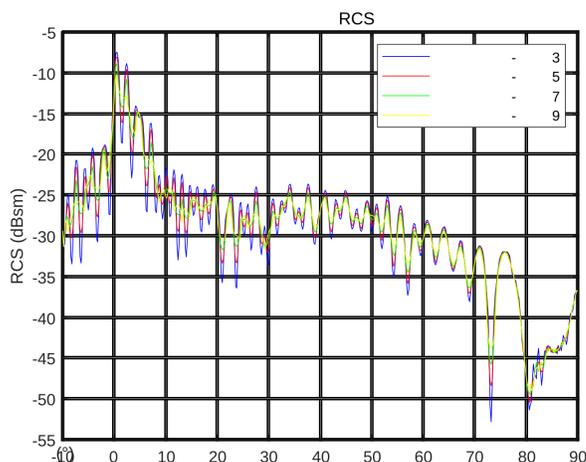


图5 不同平滑系数小波去噪后的RCS曲线

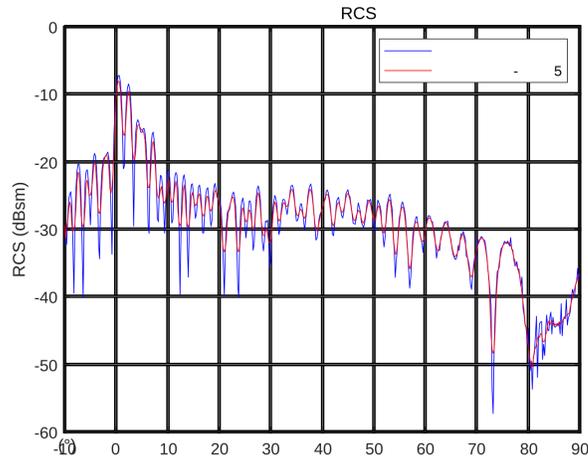


图6 去噪前后效果对比

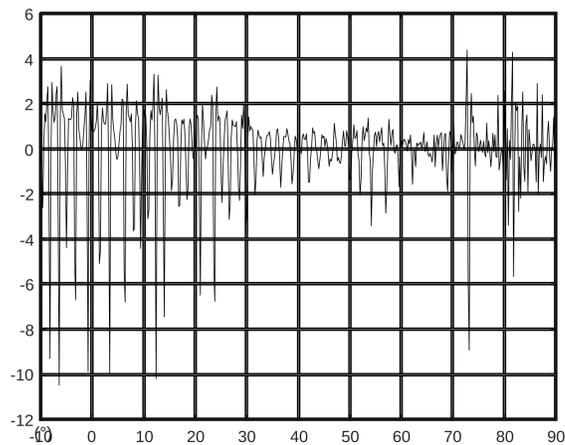


图7 不同方位角的原始信号和去噪后信号误差

在平滑系数为5时能比较好地反映曲线走势，如图6所示，原始信号与去噪后信号对比表明，去噪效果好。图7展示了原始信号和去噪后信号误差，可以看出，大角度段的误差变化频率高，表明该区域进行了高频的滤波。

3. 结论与展望

吸波复合材料在进行表面波衰减性能测试时，在电磁波频率达到Ku波段（12-18GHz）时，会由于样品本身尺寸、与转台震动、表面曲率、棱角等多因素耦合作用，导致RCS曲线在大角度入射时出现密集杂峰，导致表面波衰减系数无法正常计算。可以采用小波变换的方法对RCS信号进行重构以实现表面波衰减系数的计算。通过选取Daubechies 4阶小波、设定分解层数为3、平滑系数为5，同时根据大、小角度区域进行阈值分别设定等方式，使得重构后的表面波衰减曲线更接近理论模型仿真的曲线，表明实现了比较好的去噪效果。

参考文献

- [1] 高晓杨. 小波变换理论及其在制造业中的应用 [M]. 机械工业出版社,2018.
- [2] 孙延奎. 小波变换与图形,图形处理技术 [M]. 清华大学出版社,2018.
- [3] 郑磊.表面行波在雷达吸波材料中的传播与衰减机理研究 [D].武汉科技大学,2022.

[4] 张珊.雷达吸波材料的低频表面波衰减性能研究 [D].电子科技大学,2022.

[5] GJB 9885-2020.雷达吸波材料表面波衰减率测试方法 [S].北京:2020.