

The Application of Wavelet Analysis for the Near-Field Millimeter Wave Synthetic Aperture Imaging

Yuhao Zhang, Haihui Wang, Chao Li

School of Mathematics and Systems Science, Beihang University, Beijing
Email: zhangyuhao@buaa.edu.cn, whhmath@buaa.edu.cn, lichao1509118@buaa.edu.cn

Received: Jan. 3rd, 2017; accepted: Jan. 21st, 2017; published: Jan. 24th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Millimeter wave imaging technology using synthetic aperture has broad application prospects in the near field. It has high spatial resolution without mechanical scanning. Near-field millimeter wave synthetic aperture visibility model can be transformed into $V = AR + n$, this is an underdetermined equation, the solution is not unique, and it contains noise. An improved wavelet thresholding-filtering algorithm combining wavelet thresholding algorithm's advantages and mean filtering's advantages in terms of de-noising is presented. The method improves traditional soft and hard threshold method. At the last, we make the regularization method based on partial differential equations and the improved wavelet thresholding-filtering algorithm used in an actual near-field simulation experiment. By comparison, we find that the imaging results of the improved algorithm are better than the regularization method based on PDE.

Keywords

Millimeter Wave Imaging, Near-Field, Wavelet Thresholding-Filtering Algorithm

小波分析在毫米波综合孔径近场成像中的应用

张育浩, 王海辉, 李超

北京航空航天大学数学与系统科学学院, 北京
Email: zhangyuhao@buaa.edu.cn, whhmath@buaa.edu.cn, lichao1509118@buaa.edu.cn

收稿日期：2017年1月3日；录用日期：2017年1月21日；发布日期：2017年1月24日

摘要

毫米波综合孔径的成像技术在近场成像中有着广阔的应用前景，无需机械扫描，可稀疏阵列，具有较高的空间分辨率。毫米波综合孔径近场可视度模型可转化为 $V = AR + n$ ，这是一个欠定方程组，解不唯一，且含有噪声。综合小波阈值去噪算法及均值滤波在去噪方面的优点，提出了一种改进的小波阈值去噪-滤波算法，并且改进了传统小波阈值去噪中的软、硬阈值法。通过将基于偏微分方程的正则化方法及改进的小波阈值去噪-滤波算法应用在一个实际的近场仿真实验中，比较发现改进的小波阈值去噪-滤波算法要优于基于偏微分方程的正则化方法。

关键词

毫米波成像，近场，小波阈值去噪 - 滤波算法

1. 引言

综合孔径辐射计成像是将稀疏分布的小孔径天线之间的干涉测量结果通过数字波束合成的办法综合成一个大的等效孔径，并通过干涉测量获得的可视度函数反演得到视场范围内的亮温分布。在天线远场区，已证得可视度函数与目标亮温分布之间满足傅里叶变换关系。然而，对于人体安检等领域的应用，探测目标处于天线阵的近场区域，此时可视度函数与目标的亮温分布不再满足傅里叶变换关系[1]。

王科举首先在毫米波辐射理论和综合孔径干涉原理基础上，推导出了近场条件下的可视度函数与目标场景亮温分布的关系式[2]。Tanner A B 等人采用修正相位的点聚焦算法以重建相位修正后的可视度函数与目标亮温分布的傅里叶变化关系。然而，此算法对大视场范围的扩展目标无法进行准确的近场修正，成像误差较大[3]。姚现勋、苗俊刚指出基于偏微分方程的正则化方法是目前求解这类问题的一种有效方法。根据尺度空间理论，基于 L^2 范数的各向同性扩散模型有利于去噪，但在保留图像边缘和细节方面仍然存在不足；基于 L^1 范数的各向异性扩散可以保持图像边缘细节，但会引入阶梯效应[1]。

2. 毫米波综合空间近场成像模型

毫米波综合孔径近场可视度模型可转化为：

$$V = AR + n \quad (1)$$

其中， A 为系统响应矩阵， R 反映发射源的亮温信息， V 是近场成像。

此方程组为欠定方程组，解不唯一，且含有噪声。因此综合孔径辐射计近场成像是一个典型的病态求逆问题，即微小的测量噪声也可能导致反演图像的完全失真。正则化是将病态问题良性化的一个有效方法，其基本思想是利用解的先验知识，构造附加约束或者改变求解策略，使得逆问题的解变得稳定和确定[1]。

3. 基于偏微分方程正则化的成像算法

图像反演中，正则化方法通过极小化约束误差方程来求得目标的亮温分布

$$\min_{R \in \Omega} J(R) = \|AR - V\|^2 + \mu\varphi(R) \quad (2)$$

其中第一项表示估计值与实际数据的误差，第二项为解的边界约束， Ω 为图像的支持域， $\mu > 0$ 为正则

化参数。对于基于 L^2 范数的偏微方程成像模型，边界约束为

$$\varphi(R) = \int_{\Omega} \|\nabla R\|^2 d\Omega \quad (3)$$

为了保持图像边缘，基于 L^1 范数的全变分模型将式(2)的边界约束改写为

$$\varphi(R) = \int_{\Omega} |\nabla R| d\Omega \quad (4)$$

基于 L^2 范数的偏微方程成像模型有利于去噪，但在保留图像边缘和细节方面仍然存在不足；基于 L^1 范数的全变分模型具有保持边缘的能力，然而，该方法沿边缘方向扩散无疑会导致平坦区域的噪声抑制并不充分，甚至导致阶梯效应，影响成像质量[1]。

4. 小波信号去噪

小波阈值收缩法去噪的主要理论依据是，小波变换特别是正交小波变换具有很强的去数据相关性，它能够使信号的能量在小波域集中在一些大的小波系数中，而噪声的能量却分布于整个小波域内，因此，经小波分解后，信号的小波系数幅值要大于噪声的系数幅值，可以认为，幅值比较大的小波系数一般以信号为主，而幅值比较小的系数在很大程度上是噪声。于是，采用阈值办法可以把信号系数保留，而使大部分噪声系数减小至零。

小波阈值收缩法去噪由以下三步组成：

1) 计算含噪信号的正交小波变换。对于长度为 N 的含噪信号 X ，不妨设 $N = 2^J$ ，利用正交小波变换的快速算法获得低分辨率 $L (0 \leq L < J)$ 下的尺度系数 $\{v_{L,k}, k = 1, \dots, 2^L\}$ ，及各分辨率下的小波系数 $\{w_{j,k}, j = L, L+1, \dots, J-1, k = 1, \dots, 2^j\}$ ，其中尺度系数和小波系数共 N 个。在处理边界时，常采用周期延拓方法。

2) 对小波系数进行非线性阈值处理。为保持信号的整体形状不变，保留所有的低频系数 $v_{L,k}, k = 1, \dots, 2^L$ 。取阈值 $\lambda = \sigma\sqrt{2\log N}$ ，对每个小波系数，采用软阈值和硬阈值方法进行处理(图 1，图 2)：

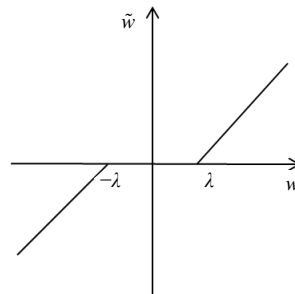


Figure 1. Soft threshold

图 1. 软阈值方法

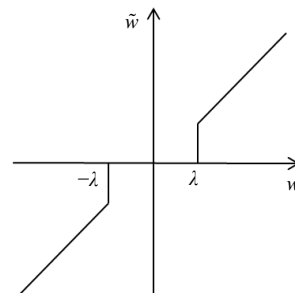


Figure 2. Hard threshold

图 2. 硬阈值方法

软阈值:

$$\tilde{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} - \lambda, & w_{j,k} \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \\ w_{j,k} + \lambda, & w_{j,k} \leq -\lambda \end{cases}$$

即将含噪信号的小波系数与所选定的阈值 λ 进行比较, 大于阈值的点收缩为该点值与阈值差值; 小于阈值相反数的点收缩为该点值与阈值之和; 幅值等于阈值的点变为零。

硬阈值:

$$\tilde{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases}$$

即把含噪信号的小波系数的绝对值与所选定的阈值 λ 进行比较, 小于等于阈值的点变为零, 大于阈值的点保持不变。

3) 进行逆小波变换。由所有低频尺度系数, 以及经由阈值处理后的小波系数做逆小波变换进行重构, 得到恢复的原始信号的估计值[4]。

5. 均值滤波

均值滤波是典型的线性滤波算法, 它是指在图像上对目标像素给一个模板, 该模板包含了其周围的临近像素(以目标像素为中心的周围 8 个像素, 构成一个滤波模版, 即去掉目标像素本身)。再用模板中的全体像素的平均值来代替原来像素值。

均值滤波也称为线性滤波, 其采用的主要方法为领域平均法。线性滤波的基本原理是用均值代替原图像中的各个像素值, 即对待处理的当前像素点 (x, y) , 选择一个模板, 该模板由其近邻的若干像素组成, 求模板中所有像素的均值, 再把该均值赋予当前像素点 (x, y) , 作为处理后图像在该点上的灰度值 $u(x, y)$, 即

$$u(x, y) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(x_i, y_i) \quad (5)$$

m 为该模板中包含当前像素在内的像素总个数, $f(x_i, y_i)$ 为 (x_i, y_i) 处的原始像素值。

6. 改进的小波阈值去噪-滤波算法

改进的小波阈值去噪 - 滤波算法由以下三步组成:

1) 计算含噪信号的正交小波变换。

2) 对小波系数进行非线性阈值处理。与普通的小波阈值收缩法去噪不同的是, 这里采用改进的阈值方法进行处理(图 3):

改进的阈值:

$$\tilde{w}_{j,k} = \begin{cases} 0, & |w_{j,k}| < 0.4\lambda \\ \text{sign}(w_{j,k}) \lambda \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{|w_{j,k}| - 0.4\lambda}{\lambda - 0.4\lambda}\right), & 0.4\lambda \leq |w_{j,k}| < \lambda \\ w_{j,k}, & \lambda \leq |w_{j,k}| \end{cases}$$

即把含噪信号的小波系数的绝对值与所选定的阈值 λ 进行比较, 小于 0.4λ 的点变为零, 大于等于

0.4λ 小于 λ 的点变为函数 $\text{sign}(w_{j,k})\lambda \sin\left(\frac{\pi |w_{j,k}| - 0.4\lambda}{2 \lambda - 0.4\lambda}\right)$ 的值, 大于等于 λ 的点保持不变。

3) 进行逆小波变换。由所有低频尺度系数, 以及经由阈值处理后的小波系数做逆小波变换进行重构, 重构至第一层, 将重构所得的离散信号做均值滤波处理, 再次重构得到恢复的原始信号的估计值。

7. 数值实验

参考文献[5]中的近场成像仿真, 设仿真的原始场景如图 4 所示, 图中人体亮温设为 280 K, 周围环境设为 200 K, 人所携带的金属枪的亮温设为 240 K。为了实现 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的视场范围, 其成像距离设为 3 m, 属于近场区域, 无法直接采用傅里叶变换进行成像。图 5 为基于偏微分方程的正则化算法所做出来的亮温图像。

利用 MATLAB 编程, 可得改进的小波阈值去噪-滤波算法处理后的图像如图 6 所示。

以图 4 作为理想的参照图像, 由 MATLAB 可得到图 5, 图 6 所对应的 PSNR 值如表 1 所示。

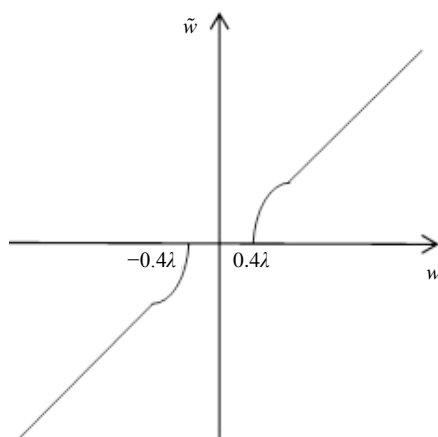


Figure 3. Improved threshold method
图 3. 改进的阈值方法



Figure 4. Original scene
图 4. 原始场景图

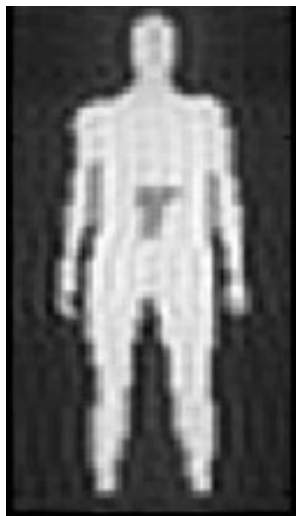


Figure 5. Regularized imaging
图 5. 正则化的成像图片

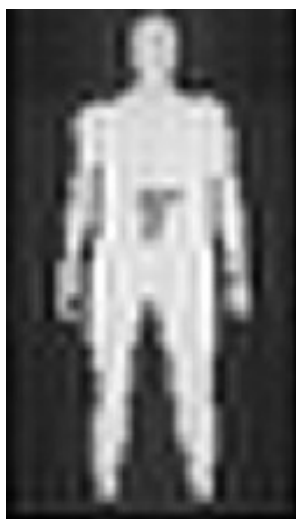


Figure 6. Improved algorithm for image
图 6. 改进算法处理的图像

Table 1. PSNR value
表 1. PSNR 值

图片	正则化的成像图片	改进的算法处理后的图像
PSNR 值	12.3655	12.504

其中, PSNR 是用以比较被评价图像与原图像质量的参数, PSNR 的值越大图像质量越好[1]。假设图像的量化为 256 个灰度值, 最大灰度为 255, 则其表达式为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left[\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\tilde{f}(i, j) - f(i, j)|^2} \right]. \quad (6)$$

在该近场仿真实验中，加入了改进的小波阈值去噪 - 滤波算法后的成像效果要优于基于偏微分方程正则化的成像算法本身的效果。

参考文献 (References)

- [1] 姚现勋, 尚晓舟, 苗俊刚, 李志平. 综合孔径辐射计偏微分方程近场图像反演算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(2): 267-272.
- [2] 王科举. 毫米波综合孔径辐射计近场成像研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学: 电子与通讯工程, 2011.
- [3] Tanner, A.B., Lambrigsten, B.H., Gaier, T.M., *et al.* (2006) Near Field Characterization of the GeoSTAR Demonstrator. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2529-2532.
- [4] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 219-244.
- [5] 刘丽, 江月松. 综合孔径成像原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 26-29, 117-120.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aam@hanspub.org