

标准及检测

非下采样 Contourlet 变换在表面形貌评定中的应用

炊明伟¹, 冯有前², 王巍¹, 李正朝³, 徐晓东¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 空军工程大学 理学院, 西安 710051;
3. 解放军洛阳外国语学院, 洛阳 471003)

[摘要] 针对高斯滤波、小波滤波等方法在三维表面形貌分析中存在的不足, 提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换的三维表面形貌分析方法。该方法是先通过非下采样 Contourlet 分解变换, 将三维表面形貌分解成不同尺度的子带; 然后根据滤波截止波长, 确定表面形貌不同成分所属的分解子带层数; 最后通过非下采样 Contourlet 重构变换, 重构表面形貌的不同成分。针对实际测量的三维表面形貌进行了分析, 验证了该方法的有效性。

[关键词] 三维表面形貌; 非下采样 Contourlet 变换; 表面评定

[中图分类号] TG84

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)01-0123-04

The Application of Nonsampled Contourlet Transform in Surface Topography Evaluation

CHUI Ming-wei¹, FENG You-qian², WANG Wei¹, LI Zheng-chao³, XU Xiao-dong¹

(1. Air-defense and Anti-missile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. PLA Foreign Language Institute, Luoyang 471003, China)

[Abstract] Aiming at the defects of the Gaussian filter and Wavelet filter, the nonsampled contourlet transform was applied in the 3D surface topography evaluation. 3D surface topography was divided into different scales subbands, and the subbands belonging to roughness, waviness and shape components were determined by the filter cut-off wavelength, and then the different components were generated by nonsampled contourlet inverse transform. At last, a actual measurement of 3D surface topography were analyzed to verify the effectiveness of the proposed method.

[Key words] 3D surface topography; nonsampled contourlet transform; surface topography evaluation

当零件产生磨损、腐蚀和疲劳破坏等引起表面形貌发生变化时, 其润滑性、密封性、振动性等都会随之发生变化, 从而影响零件所在的整个机械系统的精度、可靠性、使用寿命等^[1-2]。零部件的表面形貌一般由多种工艺加工形成, 而不同加工工艺都有其独特的纹理频带特征(波长)。为进行表面形貌的相关分析, 需通过滤波方法将不同的频带成分提取出来。常用的滤波方法主要有高斯滤波^[3-4]、形态学滤波、小波滤波^[5-6]等。为克服高斯滤波、小波滤波变换等方法的局限性, M. N. Do 等提出了 Contourlet 变换^[7]。为消除 Contourlet 变换存在的频谱混叠现象, 基于 Contourlet

变换和非下采样的思想, A. L. Cunha 等^[8]提出了非下采样 Contourlet 变换, 它不但继承了 Contourlet 变换的多尺度、多方向性, 还具有平移不变性, 消除了频谱混淆现象。文中针对高斯滤波、小波滤波等方法在三维表面形貌分析中存在的不足, 提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换的三维表面形貌分析方法。

1 非下采样 Contourlet 变换

1.1 概述

非下采样 Contourlet 变换实现的核心是不可分离

[收稿日期] 2012-08-13; **[修回日期]** 2012-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51075395)

[作者简介] 炊明伟(1985—), 男, 河南洛阳人, 博士生, 主要研究方向为信号与信息处理。

的二通道非下采样滤波器组。首先采用非下采样塔式滤波器组进行多尺度分解,然后采用非下采样方向滤波器组对得到的各尺度子带进行分解,最终得到不同尺度、方向的子带。图 1 是非下采样 Contourlet 变换的分解结构图,图 2 是理想频域分解结构示意图。

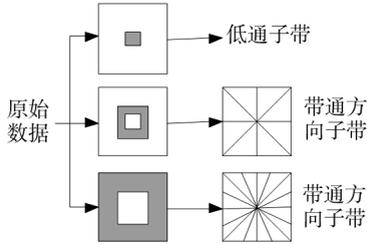


图 1 非下采样 Contourlet 变换分解结构

Fig. 1 Nonsubsampled contourlet transform decomposition

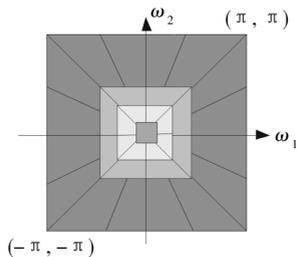


图 2 理想频域分解示意

Fig. 2 Ideal frequency decomposition

1.2 非下采样塔式滤波器组

使非下采样 Contourlet 变换具有多尺度性的非下采样塔式滤波器组,是一种基于 à trous 小波变换的平移不变性双通道非下采样滤波器组结构。图 3 为非下采样分级滤波器组一级分解重建的结构示意图,通过这组滤波器,可得到低频子带和高频子带。

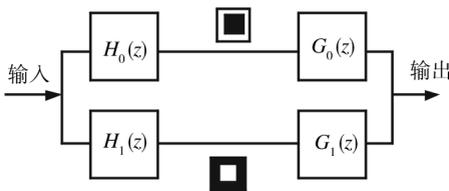


图 3 非下采样分级滤波示意

Fig. 3 Nonsubsampled graded filter

与小波变换相比,非下采样塔式滤波器组的分解变换只需要实现低频信号分离,输出 1 个带通子带,而不是 3 个方向子带。为使非下采样塔式滤波器组的分解变换能够完全重构,则其低通、高通滤波器组需满足以下重构条件:

$$H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) = 1 \quad (1)$$

式中: $H_0(z)$ 为低通分解滤波器; $H_1(z)$ 为高通分解滤波器; $G_0(z)$ 为低通重构滤波器; $G_1(z)$ 为高通重构滤波器。

1.3 非下采样方向滤波器组

为得到准确的多方向分解,二通道的非下采样方向滤波器组首先采用梅花型矩阵对所有的滤波器进行上采样,重采样操作由 4 个么模矩阵来完成,可以达到旋转滤波器通带方向的目的。非下采样方向滤波器组的每一级变换可以得到 2^n 个高频方向分解子带,每个方向子带与原始分解数据的大小相同。

2 表面形貌分析方法

2.1 表面形貌成分

实际加工得到的零件表面并不是一个理想的光滑表面,而是受加工方式等诸多因素影响而形成的复杂形貌。根据表面形貌中各种成分的分布频带不同,可将一个零件的复杂表面形貌分为表面粗糙度、表面波纹度和形状误差等成分。设 $S(x, y)$ 是原始三维表面的综合形貌,可表示为:

$$S(x, y) = S_r(x, y) + S_w(x, y) + S_f(x, y) \quad (2)$$

式中: $S_r(x, y)$ 属于高频成分,表示表面粗糙度; $S_w(x, y)$ 属于频率介于粗糙度和形状误差之间的成分,表示表面波纹度; $S_f(x, y)$ 属于低频成分,表示表面形状误差。根据三维表面形貌不同成分的频谱分布特性,通过滤波器可将三维表面形貌中的不同成分分离开来。

2.2 表面形貌多尺度分析原理

表面形貌中的粗糙度、波纹度和形状误差成分,主要区别在于其所占的频带不同:表面粗糙度所属频带为 $1/\lambda_s \sim 1/\lambda_c$ (λ_s 是采样间隔决定的波长上界, λ_c 是表面粗糙度截止波长);表面波纹度所属频带为 $1/\lambda_c \sim 1/\lambda_f$ (λ_f 是表面波纹度截止波长);表面形状误差所属为频率小于 $1/\lambda_f$ 的频带。因此可利用不同的带通滤波器,将粗糙度、波纹度和形状误差成分从表面形貌中分离开来。

通过非下采样 Contourlet 分解变换,表面形貌可被分解成不同尺度、不同方向的子带,各尺度上的子带表示相应频带的表面形貌信息。因此,可先根据表面形貌不同成分所属的频带,对分解的子带进行划分,然后通过非下采样 Contourlet 重构变换对各种成分所属子带进行重构,从而得到表面形貌中所包含的粗糙度、波纹度和形状误差成分。

2.3 确定分解层数

非下采样 Contourlet 分解变换以 2 的幂次关系对频率空间进行划分,因此文中将非下采样 Contourlet 分解的尺度和截止波长都转换到归一化的截止频率上,从而可得到分解尺度、滤波截止波长、数据采样间隔之

间的关系:

$$2^{N+1} = \lambda / \Delta s \quad (3)$$

式中: N 是非下采样 Contourlet 分解时的分解层数; λ 是表面形貌不同成分的截止波长; Δs 是表面形貌数据测量时, 在 X 和 Y 方向上的采样间距。因此, 表面粗糙度和表面波纹度之间的间隔分解层数 N_c 、表面形状误差和表面波纹度之间的间隔分解层数 N_f 分别为:

$$N_c = \text{floor}(\log_2(\lambda_c / \Delta s)) - 1 \quad (4)$$

$$N_f = \text{floor}(\log_2(\lambda_f / \Delta s)) - 1 \quad (5)$$

其中, $\text{floor}()$ 表示向负无穷取整数。对于经过非下采样 Contourlet 分解的表面形貌各层子带, 分解层数 N 在 $1 \sim N_c$ 范围内的子带属于表面粗糙度, 分解层数 N 在 $N_c + 1 \sim N_f$ 范围内的子带属于表面波纹度, 分解层数 $N > N_f$ 的子带属于表面形状误差。

为节省运算时间, 减少表面形貌分解和重构运算, 表面形貌的最大分解层数 N_{\max} 可根据表面形状误差和表面波纹度之间的间隔分解层数 N_f 确定:

$$N_{\max} = N_f = \text{floor}(\log_2(\lambda_f / \Delta s)) - 1 \quad (6)$$

表面形貌的粗糙度、波纹度和形状误差可通过将不在其尺度范围内的子带系数全部设为 0, 然后分别

进行非下采样 Contourlet 反变换, 即重构得到。

3 实例分析

选择表面形貌参数 $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ 的测试样件, 以采样间隔 $\Delta s = 8.4 \mu\text{m}$ 对表面形貌进行测量, 得到 $487 \mu\text{m} \times 487 \mu\text{m}$ 的表面形貌数据, 如图 4 所示。根据 ISO 4288:1996 可知, $\lambda_c = 0.8 \text{mm}$, $\lambda_f = 4 \text{mm}$ 。由公式 (4) — (6) 可知, $N_c = 5$, $N_{\max} = N_f = 7$, 即非下采样 Contourlet 分解变换将表面形貌分解成 7 层, 其中 1 ~ 5 层子带属于表面粗糙度, 6 ~ 7 层子带属于表面波纹度, 最低频的子带属于表面形状误差。不同成分的子带通过非下采样 Contourlet 重构变换, 即可得到表面形貌所包含的表面粗糙度、表面波纹度和表面形状误差成分, 如图 5—7 所示。图 8 和图 9 分别是通过高斯滤波和小波滤波方法得到表面粗糙度成分。

由图 4—7 可知, 根据表面形貌中不同成分的滤波截止波长, 通过非下采样 Contourlet 变换可将表面形貌中的粗糙度、波纹度和形状误差准确地分离出来。由图 8 可以看出, 受边界效应影响, 高斯滤波方法的粗糙度成分中包含波纹度和形状误差, 存在一定偏差。

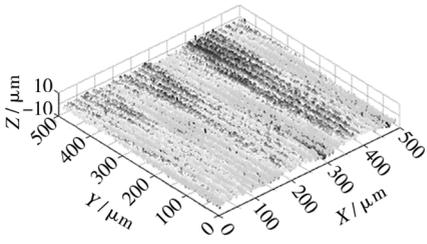


图 4 原始表面形貌

Fig. 4 Original surface topography

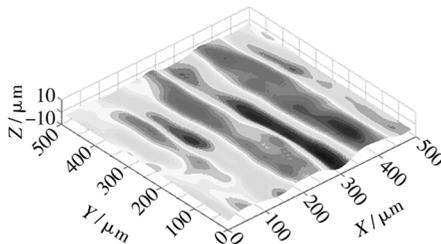


图 5 波纹度成分

Fig. 5 Waviness

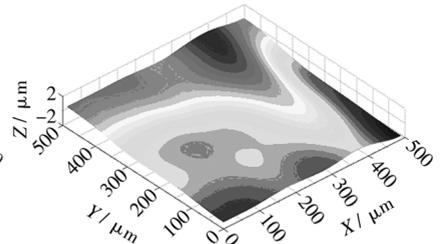


图 6 形状误差成分

Fig. 6 Shape error

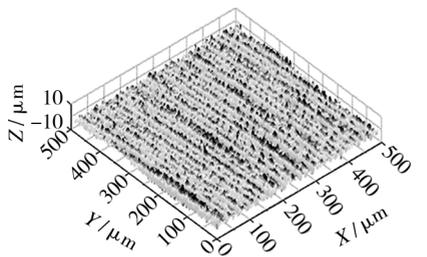


图 7 粗糙度(本方法)

Fig. 7 Roughness (proposed method)

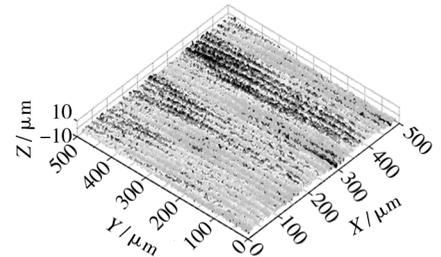


图 8 粗糙度(高斯滤波)

Fig. 8 Roughness (Gaussian filter)

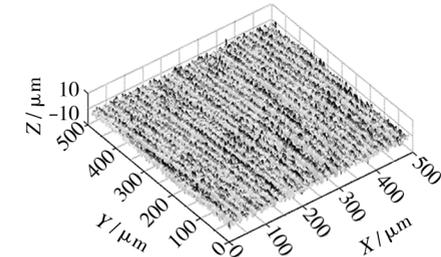


图 9 粗糙度(小波滤波)

Fig. 9 Roughness (wavelet filter)

表 1 是不同滤波方法得到的粗糙度表面相关参数。由表 1 可知, 相对于高斯滤波和小波滤波得到的粗糙度表面, 本方法提取的粗糙度成分的标准差更接近于实际值。高斯滤波结果存在偏差主要是高斯滤波本身存在的边界效应造成的。小波滤波结果存在偏差主要是小波滤波对点奇异性比较敏感, 且对边缘方向表达能力有限造成的。

表 1 粗糙度表面相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of roughness surface

滤波方法	算术平均 偏差/ μm	标准差 / μm	十点平均 高度/ μm	偏斜度	峰度
高斯滤波	0.71	0.89	8.55	-0.24	2.94
小波滤波	0.49	0.61	6.67	-0.22	3.46
本方法	0.59	0.74	7.67	-0.17	3.04

4 结语

文中提出的三维表面形貌分离方法,能够有效分离三维表面形貌中的表面粗糙度、表面波纹度和形状误差成分。不过,受加工因素、工作条件的影响,实际工件表面可能具有划痕、裂纹等奇异特征,这些对工件的工作性能具有较大影响,但这些奇异特征的分离表达,目前还没有有效的方法,需要进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] JIANG J, SCOTT P J, WHITEHOUSE D J. Paradigm Shifts in Surface Metrology. Part I. Historical Philosophy [J]. Proceedings of the Royal Society, 2007, 463: 2049—2070.
- [2] JIANG J, SCOTT P J, WHITEHOUSE D J. Paradigm Shifts in Surface Metrology. Part II. The Current Shift [J]. Proceedings of the Royal Society, 2007, 467: 2071—2099.
- [3] 张静,张浩. 三维表面测量中的高斯滤波快速算法[J]. 工具技术, 2011, 45(9): 83—86.
- [4] ZENG W, JIANG X, SCOTT P J. Fast Algorithm of the Robust Gaussian Regression Filter for Areal Surface Analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21: 1—9.
- [5] 张耕培,崔长彩. 小波滤波在表面形貌评定和分析中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 141—144.
- [6] 朱健军,刘泊. 小波理论在三维表面评定中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008, 13(6): 83—86.
- [7] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet Transform: an Efficient Directional Multiresolution Image Representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091—2106.
- [8] CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The Nonsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089—3101.
- [9] 刘小平, 王亚红, 马亚红, 等. 硅烷偶联剂对太阳能电池铝浆性能的影响及分析[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(10): 49—51.
- [10] JIANG Zhe, CHENG X H. Characterization and Tribological Investigation of Self-assembled MPTS-MPTES/RE Composite Films [J]. Journal of Rare Earths, 2009, 27(3): 490—495.
- [11] 孙志永,程先华. 稀土改性碳纳米管复合薄膜制备及其摩擦磨损性能[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1310—1314.
- [12] 孙志永,程先华. 硅基表面稀土改性碳纳米管/氨基硅烷自组装复合膜的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(2): 156—160.
- [13] LIU H W, BHUSHAN B. Investigation of Nanotribological Properties of Self-assembled Monolayers with Alkyl and Biphenyl Spacer Chains (Invited) [J]. Ultramicroscopy, 2002, 91(1): 185—202.
- [14] GANG Ke. A Novel Strategy to Functionalize Carbon Nanotubes with Cellulose Acetate Using Triazines as Intermediated Functional Groups [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(3): 775—782.
- [15] BIERBAUM K, KINZLER M, WÖLL Ch, et al. A Near Edge X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy and X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of the Film Properties of Assembled Monolayers of Organosilanes on Oxidized Si (100) [J]. Langmuir, 1995, 11(2): 512—518.
- [16] GU Qin-lin, CHENG X H. Tribological Behaviors of Lanthanum-based Phosphonate 3-aminopropyltriethoxysilane Self-assembled Films [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(16): 6800—6806.
- [17] 关跃,卢咏来,刘力,等. 通过光波转换材料提高太阳能电池性能的研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(7): 17—19.

(上接第 62 页)

- [2] CARRILLO-LOPEZ J, LUNA-LOPEZ J A, VIVALDO-DE la Cruz I, et al. UV Enhancement of Silicon Solar Cells Using Thin SRO Films [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2012, 100: 39—42.
- [3] 刘志平. 双层氮化硅减反射膜晶体硅太阳能电池的研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [4] 韩鹏,张宏,马亚红,等. 硅烷偶联剂对太阳能电池铝浆性能的影响及分析[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(10): 49—51.
- [5] ALI A, GOUVEAS T, HASAN M A. Influence of Deep Level Defects on the Performance of Crystalline Silicon Solar Cells: Experimental and Simulation Study [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(10): 2805—2810.
- [6] VANNIKOV A V, GRISHINA A D, RYCHWALSKI R W. Nonlinear Optical and Photorefractive Properties of Polymer/Carbon Nanotube Composites [J]. Carbon, 2011, 49(1): 311—319.
- [7] DIAO P, LIU Z F. Vertically Aligned Single-walled Carbon Nanotubes by Chemical Assembly-methodology, Properties, and Applications [J]. Advanced Materials, 2010, 22(13): 1430—1449.
- [8] SHEARER C J, FAHY A, BARR M G, et al. Field Emission from Single-, Double-, and Multi-walled Carbon Nanotubes Chemically Attached to Silicon [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(4): 1—8.
- [9] MEVELLEC J Y, BERGERET C, COUSSEAU J, et al. Tuning the Raman Resonance Behavior of Single-walled Carbon Nanotubes via Covalent Functionalization [J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(42): 16938—16946.