

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210456

基于改进多路径匹配追踪的芯片超声信号去噪方法*

李可¹, 王 翀¹, 明雪飞², 顾杰斐¹, 宿 磊¹

(1. 江南大学机械工程学院 无锡 214122; 2. 中国电子科技集团公司第五十八研究所 无锡 214000)

摘 要:针对高频超声检测倒装焊芯片微缺陷的回波信号受噪声影响的问题,提出了一种基于改进多路径匹配追踪算法(MMP)的高频超声信号稀疏去噪方法。利用MMP算法获取全局最优的原子,针对MMP计算量过大的问题,在迭代过程中设置阈值和引入剪枝操作,筛选误差较大的路径,减少迭代路径,降低算法复杂度。为了避免字典维度上升导致的计算量过大,通过构建连续原子库对重构信号参数进行调整,最终实现芯片超声检测信号噪声的抑制。通过仿真和实验证明,提出的方法能够有效的去除倒装芯片高频超声检测信号中的噪音,与其他去噪算法相比,所提方法通过增加少量的计算,实现信号重构精度的提高,提升了B扫图的清晰度。

关键词: 高频超声; 芯片; 多路径匹配追踪; 剪枝; 阈值选择; 连续原子库

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Denoising method of chip ultrasonic detection signals based on the improved multipath matching pursuit

Li Ke¹, Wang Chong¹, Ming Xuefei², Gu Jiefei¹, Su Lei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. The 58th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214000, China)

Abstract: To reduce the influence of noise on the high frequency ultrasonic detection of flip chip defects, a sparse denoising method of high-frequency ultrasound signals based on the multipath matching pursuit (MMP) is proposed. The MMP algorithm is used to obtain the atoms which are globally optimal. Aiming at the excessive calculation of MMP, the setting thresholds and the introducing pruning operations during iteration are introduced. To avoid the excessive calculation amount caused by the increase of the dictionary dimension, the contiguous atom dictionary is established to adjust the reconstructed signals and realize the noise suppression. Proved by simulation and experiment, the proposed method can effectively remove the noise in high-frequency ultrasonic detection signals of flip chip. Compared with MMP, the proposed method can improve the signal reconstruction accuracy and the clarity of B-scan by adding a small amount of computation.

Keywords: high frequency ultrasonic detection; flip chip; multipath matching pursuit; prune; threshold selection; continuous atomic library

0 引 言

倒装焊封装凭借优越的性能成为目前的主流封装技术之一。随着倒装焊芯片的微型化,芯片凸点趋向超细间距及高密度化,导致芯片键合处容易产生裂纹、缺球、空洞等缺陷,从而引起芯片失效^[1]。为了保证芯片的可

靠性,对倒装焊芯片进行检测尤为重要。声显微成像(scanning acoustic microscopy, SAM)是一种利用超声波作为检测手段的技术,已被广泛应用于倒装芯片的微缺陷检测中^[2]。由于不同材质的声阻抗不同,超声在传播过程中会发生反射、折射、衍射等现象,反射信号的强度在材料非连续处会发生变化,所以通过对SAM采集的回波信号进行分析,可以实现芯片缺陷的有效诊断。但在

收稿日期:2022-09-19 Received Date: 2022-09-19

* 基金项目:中国博士后科学基金(2021T140279)、国家自然科学基金(51705203)项目资助

实际检测过程中,芯片微缺陷的超声检测回波较弱,容易受到系统噪声干扰,影响焊球缺陷识别的准确率,因此对倒装焊芯片的高频超声检测信号进行去噪处理尤为关键。

由于倒装芯片的界面和缺陷是有限数量的,检测信号主要由少数几个回波构成,因此芯片的超声检测信号是稀疏的。稀疏表示是指通过有限的原子来表示信号,而信号中的噪声分量是随机不可稀疏的,无法使用少量的原子表示,故在使用原子重构信号时,噪声视为信号与重构信号之间的残差,在迭代过程中被舍去,从而达到信号去噪的目的。稀疏表示中的分解过程是一个非确定性多项式难题(non-deterministic polynomial-hard, NP-hard)问题,无法直接求解,众多研究者提出了近似求解方法。Mallat 等^[3]提出了基于过完备字典的匹配追踪算法(matching pursuit, MP),MP 算法在每次迭代中从过完备字典中选择一个与信号(残差)最匹配的原子,去逼近原信号。Liang 等^[4]将 MP 算法引入超声信号的降噪中,设计了残差比阈值迭代终止条件,解决了稀疏度终止条件误差较大的问题。焦敬品等^[5]提出一种基于非凸变量重叠的稀疏变分的信号降噪方法,解决了晶粒反射产生的噪声问题。Tropp 等^[6]在 MP 算法的基础上,提出了正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit, OMP),利用残差与已选择的原子正交,相比 MP 算法,OMP 能更快收敛,可以在少量迭代次数内重构信号,提高了重构的效率。曲正伟等^[7]在 OMP 的基础上提出了改进算法,对原子分解过程有了进一步优化,从而提高收敛速度。Yu 等^[8]利用最小二乘正交匹配追踪算法(least square orthogonal matching pursuit, LSOMP)对倒装芯片超声信号进行重构,取得了良好的效果。上述两种稀疏算法在每次迭代过程中只会选择一个原子,是一种局部最优策略,通过这种局部最优迭代来逼近全局最优结果。但是迭代过程中选择的局部最优原子可能并不准确。Kwon 等^[9]在 OMP 基础上提出了一种多路径匹配追踪算法(multipath matching pursuit, MMP),通过增加迭代路径来缓解局部最优的问题,导致了分解计算量的增加。在稀疏算法中,对于离散过完备字典当原子间隔较大时,算法的去噪效果会下降;离散字典中原子的间隔较小时,虽然可以提升算法精度,但是会大大提高离散过完备字典的维度,增加稀疏表示的计算时间,限制了 MMP 的应用。

针对上述问题,提出一种基于 MMP 改进的稀疏去噪方法。所提方法在 MMP 迭代过程中设置阈值和加入剪枝操作,降低计算复杂度,并且通过对离散原子插值去构建连续原子库,通过增加少量的计算量来提高去噪性能。通过对倒装焊芯片的超声检测仿真数据和实际数据进行处理,将所提方法与小波去噪、经验模态分解去噪(empirical mode decomposition, EMD)、OMP、MMP 去噪

进行对比。结果表明所提方法在计算复杂程度上,低于 MMP 算法,在去噪性能上,优于小波去噪、EMD、OMP 和 MMP。

1 芯片超声信号的稀疏模型

对倒装焊芯片焊球进行超声检测时,将接受到的回波信号看作是多个界面信号反射的线性组合,同时考虑到超声信号传播过程中的频率衰减和噪声影响,将回波信号模型定义为:

$$y = \sum_i^n c_i \Phi(t) + \varepsilon \quad (1)$$

式中: y 代表接收到的回波信号; c_i 代表第 i 个界面的反射系数; $\Phi(t)$ 代表第 i 个界面反射的信号; ε 代表信号传播过程中的噪声,叠加后为接收到的带噪声回波信号,即待处理的信号。重构信号可以表示为 $y = D_c x + \varepsilon$, 其中 D_c 是过完备字典, x 是稀疏系数。则目标函数可以表示为 $\min \|y - D_c x\|_2^2 \text{ s.t. } \forall \|x\|_0 = k$, 其中 k 是稀疏度,通过求解稀疏系数 x 获得重构信号 y 。当过完备字典中的原子与信号贴近时,可以用较少的原子去对应界面的反射波,而噪声需要较多的原子去拟合,通过设定稀疏度限制原子个数选择,达到去噪的目的。对于求解目标函数,采用 ℓ_0 贪婪近似算法求解目标函数^[10-12]。

2 基于改进 MMP 的极坐标插值法的超声稀疏重构

2.1 基于改进 MMP 的超声信号重构

由于贪婪算法只能保证单次迭代最优,从总体来看在每次迭代过程中选取的单一原子并不能保证是全局最优原子,所以为了能够更好地获取全局信息,选择 MMP 算法重构超声信号。设重构信号的稀疏度为 K , 算法在每次迭代中选取与残差最相关的 G 个原子,全部作为候选的支撑集。OMP 算法只选择单条路径输出,而 MMP 算法检查所有的路径,并在最后选择残差最小的路径进行输出,从而大大提高最后选择正确的路径的机会。在每此迭代过程中,支撑集增加 G 个,理论上最后形成 G^k 条路径,计算量会不断增加,主要集中在过完备字典和信号残差的乘积运算过程中。在 MMP 算法的迭代过程中,存在一部分路径在初始迭代过程中就会出现较大的误差,并且在最终迭代时仍然存在较大残差,并不会成为最优路径,而这些路径的迭代过程不会停止,浪费大量的计算时间,因此,在 MMP 的基础上加入阈值选择和剪枝操作。在每次迭代的过程中,将只保留残差最小的 n 条路径,剔除其余路径,避免计算量的大幅度增加。同时可以发现,每次迭代过程选中的原子中可能出现一部分原子

和信号的内积较大,剩余原子与信号内积较小。信号与原子的内积值如图1所示。内积较小的原子无法成为最后的最优原子,只通过剪枝无法衡量筛选出这类原子,所以在剪枝的基础上加入阈值选择,通过参考每次迭代的最优原子与残差的内积设置阈值,将原子和残差内积小于阈值的原子剔除,提高入选原子的质量。

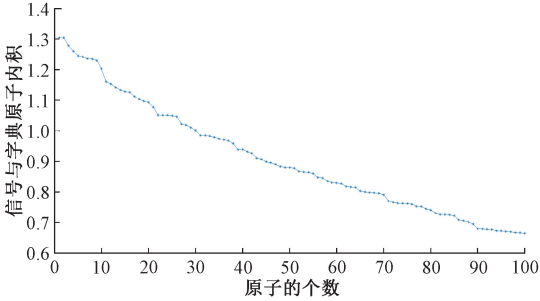


图1 信号和字典中原子内积

Fig. 1 Inner product of atoms in signal and dictionary

使用MMP对信号进行重构时,重构的稀疏度设为 K ,扩展路径为 G 条,过完备字典的大小为 $N \times M$,每条路径增加迭代的过程中,需要 $N \times M$ 次运算,MMP的计算复杂度为 $O(MNG^K)$ 。而IMMP在迭代过程中通过剪枝只会保留 n 条残差最小的路径($n \leq G$),计算复杂度为 $O(MNKn)$,可见通过剪枝操作可以大幅度降低算法的计算量,同时设置阈值控制原子范围可以进一步降低运算量。

2.2 基于剪枝MMP的极坐标插值法

当字典中原子间隔过大时,会影响恢复信号精度,当原子之间的间隔过小时,会大大增加重构的计算量,同时也降低了稀疏性。参考Ekanadham等^[13]在基追踪算法(basis pursuit, BP)的基础上提出的连续基追踪(continuous basis pursuit, CBP),使用极坐标插值法求解目标函数。在剪枝MMP的基础上加入极坐标插值法来构建连续原子库,在避免整体扩大过完备字典的情况下,提升算法的去噪性能。

使用MMP对超声信号进行重构后,获得初始重构信号 $\mathbf{y}$ 和初始重构信号的原子 $\mathbf{d}_n (n=1, 2, \dots, p)$ 。在原子频率参数附近构建连续原子库, f_n 是重构原子中的第 n 个原子的频率参数,在范围大小为 Δ 的区间内构建连续原子库,即 $\left[f_n - \frac{\Delta}{2}, f_n + \frac{\Delta}{2}\right]$,起点原子 $\left[f_n - \frac{\Delta}{2}, f_n + \frac{\Delta}{2}\right]$,初始原子 $\mathbf{d}\left(f_n - \frac{\Delta}{2}\right) = \mathbf{d}(f_b)$,终点原子 $\mathbf{d}(f_n) = \mathbf{d}(f_b)$,3个原子可以表示为:

$$\mathbf{d}\left(f_n + \frac{\Delta}{2}\right) = \mathbf{d}(f_c) \quad (2)$$

利用式(2)的3个原子构成圆弧,其中 $\mathbf{c}(f_n)$ 代表上述3点构成圆弧的圆心, $\mathbf{u}(f_n)$ 代表由圆心指向 $\mathbf{d}(f_n)$ 的单位向量, $\mathbf{v}(f_n)$ 代表在圆弧平面上垂直于 $\mathbf{u}(f_n)$ 的单位向量, r 代表圆的半径, θ 表示起点原子和初始原子之间的夹角,如图2所示。

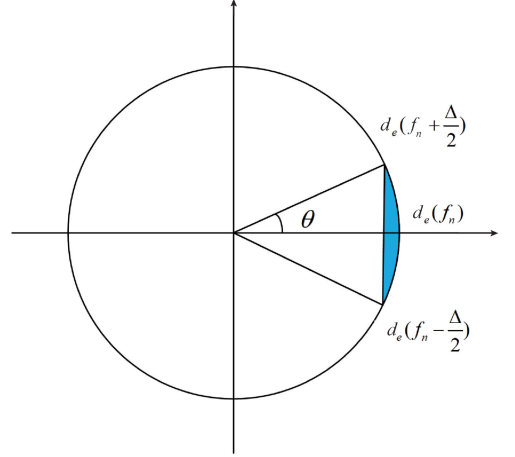


图2 构建连续原子库

Fig. 2 Build the continuous atomic library

在区间 $\left[f_n - \frac{\Delta}{2}, f_n + \frac{\Delta}{2}\right]$ 之间的所有原子则可以由圆弧上的一点表示,设区间 $\left[f_n - \frac{\Delta}{2}, f_n + \frac{\Delta}{2}\right]$ 上的频率为 f_i 的原子,可以任意一个原子表示为:

$$\mathbf{d}(f_i) = \mathbf{c}(f_n) + r \cos\left(\frac{2(f_i - f_n)}{\Delta}\theta\right) \cdot \mathbf{u}(f_n) + r \sin\left(\frac{2(f_i - f_n)}{\Delta}\theta\right) \cdot \mathbf{v}(f_n) \quad (3)$$

考虑原子幅值后可以表示为:

$$\mathbf{d}(f_i) = \mathbf{c}(f_n) + r \cos\left(\frac{2(f_i - f_n)}{\Delta}\theta\right) \cdot \mathbf{u}(f_n) + r \sin\left(\frac{2(f_i - f_n)}{\Delta}\theta\right) \cdot \mathbf{v}(f_n) \quad (4)$$

简写为:

$$\alpha \cdot \mathbf{d}(f_i) = \alpha \cdot \mathbf{c}(f_n) + \beta \cdot \mathbf{u}(f_n) + \gamma \cdot \mathbf{v}(f_n) \quad (5)$$

信号中的原子形成凸集,需满足条件为:

$$\begin{cases} \alpha_i \geq 0 \\ \beta_i^2 + \gamma_i^2 \leq \alpha_i^2 \cdot r_i^2 \\ a_i \cdot r_i \cdot \cos \theta \leq \beta_i \leq a_i \cdot r_i \end{cases} \quad (6)$$

最终信号恢复的优化式可以表示为:

$$\text{Minimize: } \|\mathbf{y} - \sum_{i=1}^p (\alpha_i \cdot \mathbf{c}(f_i) + \beta_i \cdot \mathbf{u}(f_i) + \gamma_i \cdot \mathbf{v}(f_i))\|$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \alpha_i \geq 0, & i = 1, 2, 3, \dots, p \\ \beta_i^2 + \gamma_i^2 \leq \alpha_i^2 \cdot r_i^2, & i = 1, 2, 3, \dots, p \\ a_i \cdot r_i \cdot \cos\theta \leq \beta_i \leq a_i \cdot r_i, & i = 1, 2, 3, \dots, p \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{最后重新放缩 } \beta_i = \frac{\beta_i \alpha_i r_i}{\sqrt{\beta_i^2 + \gamma_i^2}}, \gamma_i = \frac{\gamma_i \alpha_i r_i}{\sqrt{\beta_i^2 + \gamma_i^2}} \text{ 最终}$$

的重构信号可以表示为:

$$\sum_{i=1}^p (\alpha_i \cdot \mathbf{c}(f_i) + \beta_i \cdot \mathbf{u}(f_i) + \gamma_i \cdot \mathbf{v}(f_i)) \quad (8)$$

3 实验

通过对倒装焊芯片焊球的仿真信号和实际信号进行处理,将本文的处理方法和小波去噪、EMD 去噪、OMP、MMP 和在 OMP 重构原子附近构建连续原子库的方法(IOMP)进行比较,验证方法的可行性。

3.1 检验标准

选用信噪比(signal to noise ratio, SNR)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和信号能量比 E_{SN} 作为衡量算法去噪性能的评价指标。SNR 评价算法去噪整体质量;RMSE 评价回波重构误差; E_{SN} 评判降噪是否过度。

3.2 芯片模型仿真实验对比

通过建立芯片焊球的仿真模型,模拟超声探头发出的高频超声信号,获得不同类型损伤的高频超声回波信号,在信号中加入不同比例的高斯白噪声模拟实际超声信号^[8]。选用焊球缺陷为裂纹的模型,如图3所示。

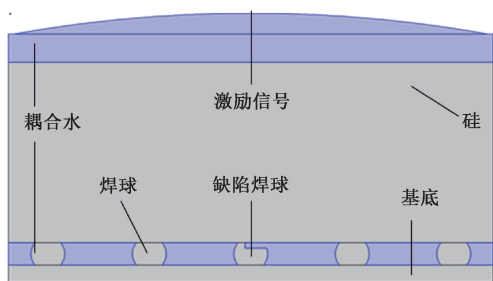


图3 芯片焊球仿真模型

Fig. 3 Simulation model of chip solder ball

选用能够很好表征超声信号的 Gabor 信号模型^[14],构建过完备字典对信号进行重构,字典中的原子定义为:

$$\mathbf{g} = \frac{A}{\sqrt{S}} \exp\left(-\pi \left(\frac{(t-u)^2}{S^2}\right)\right) \times \cos(2\pi f(t-u) + \varphi) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{g}$ 表示单个原子; A 表示原子的幅值; S 表示原子的缩放参数; u 表示原子的平移参数; f 表示频率参数; φ 表示相位参数。对于维度为 N 的超声信号 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$,需要

设计维度相对应的过完备字典,其中 $M \gg N$ ^[15]。取信号的采样长度551个采样点。小波去噪的小波基为db5,分解层数为5层,EMD 阈值选择为迭代区间阈值^[16],OMP、IOMP、MMP 和 IMMP 都使用相同字典 $\mathbf{D}$,且 OMP、IOMP、MMP 和 IMMP 运算过程中稀疏度相同。

芯片超声检测仿真信号和去噪声结果如图4所示。图4(a)是芯片裂纹焊球超声的仿真原始信号,图4(b)是加入高斯白噪声后的信号^[17]。不同的去噪方法的效果如图所示。稀疏算法 OMP、IOMP、MMP 和 IMMP 相较于小波去噪和 EMD 去噪能较好地去除信号中的噪声,且所提方法对比其他去噪方法,波形相对更加完整,没有明显的噪声,同时信号的信噪比最优,均方根误差低于其他去噪方法。在不同噪声水平条件下,使用各种方法去噪后,SNR 和 RMSE 的结果如图5所示。结果显示,小波在噪声较低的情况下,有良好的去噪效果,但是随着噪声的增加,去噪效果下降较为明显。EMD 在噪声低的情况下,降噪效果较差,但随着噪声的增加,去噪效果得到改善。在噪声较大的情况下,所提方法相较于其他方法有良好的抗噪能力。

在噪声较低的情况时,使用 OMP、IOMP、MMP 和 IMMP 去噪后,4种方法均有良好的去噪效果,但是随着噪声的增加,OMP 去噪效果下降较为明显。同时可以发现,在使用 IOMP 去噪后,其去噪效果仍然低于 IMMP,造成这一现象的原因之一是信号与离散 Gabor 字典之间存在误差,在噪声干扰下 OMP 在迭代过程中选择了局部最优原子,且连续原子库的覆盖范围有限,在构建连续原子库后,无法将局部最优原子调整为全局最优原子,改善方法之一是减少字典中原子间隔,整体提升离散字典维度,但会增加更多的计算量。相较于提升字典维度,所提方法处理信号更有优势。所提方法信噪比优于其他方法,均方差最小,随着噪声的增加,算法有着良好的抗噪能力。因此采用改进多路径算法降噪方法有着更加优良的去噪效果。

表1是在信号中加入不同比例噪声的条件下,使用各种去噪方法和 IMMP 去噪后,信号能量比结果展示,其中黑体为最优,最接近于1。通过比较降噪后能量占原信号能量的比来判断降噪是否过度。当信号能量比越接近于1时,去噪效果更好,能够将更多的噪声去除且保留原信号中的有效信息。当信号能量比大于1时,看作信号中有噪声未能去除。结果显示,在噪声较低的情况下,几种方法信号能量比都接近于1,视为将信号中的大部分噪声去除。但是随着噪声的增加,小波和 EMD 的信号能量比增长较明显,去噪效果快速下降。当噪声比例较大时,稀疏重构算法也出现噪声出现无法去除的现象。所提方法在噪声较大时,有较好的表现。

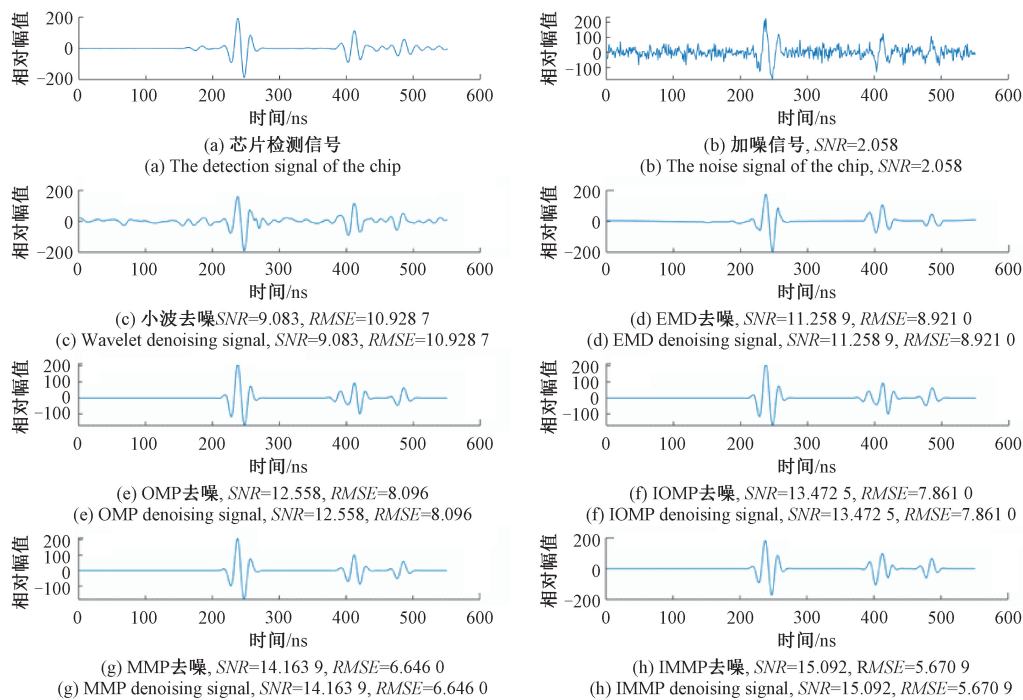


图 4 芯片超声检测仿真信号和去噪结果

Fig. 4 Simulation signal of chip ultrasound and denoising results

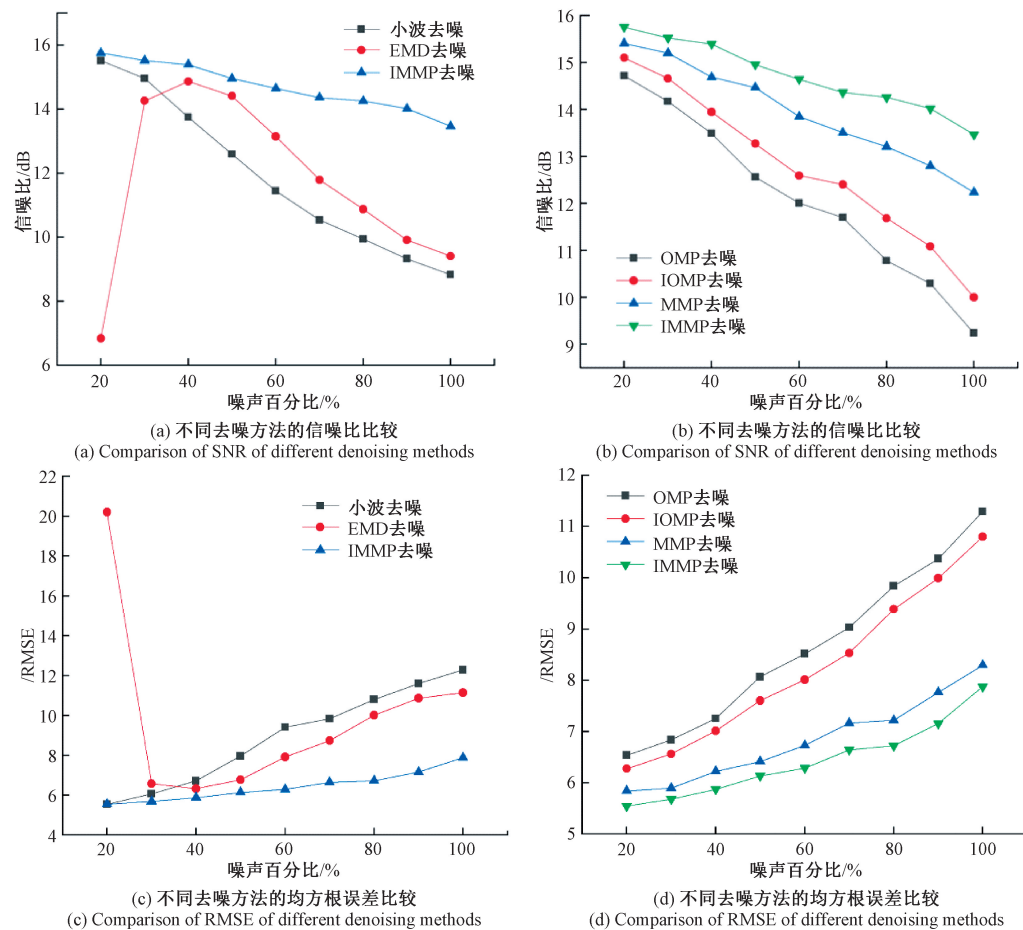


图 5 SNR 和 RMSE 评价指标汇总

Fig. 5 Summary of SNR and RMSE evaluation indicators

表 1 不同去噪方法信号能量比

Table 1 Signal energy ratio values of different denoising methods

噪声比例	小波	EMD	OMP	IOMP	MMP	IMMP	%
20	1.008 7	0.884 5	0.972 6	0.971 6	0.970 5	0.980 7	
30	1.038 0	0.982 9	0.972 8	0.969 9	0.962 5	0.974 6	
40	1.039 3	0.988 8	0.967 3	0.960 4	0.950 1	0.972 9	
50	1.049 2	1.056 2	0.946 1	0.940 1	0.937 7	0.963 2	
60	1.068 0	1.057 1	0.935 6	0.934 5	0.936 9	0.959 9	
70	1.084 4	1.063 2	0.949 3	0.947 8	0.940 9	0.958 6	
80	1.139 4	1.061 1	1.041 9	1.028 4	1.025 6	0.978 2	
90	1.163 7	1.072 4	1.100 4	1.048 8	1.077 2	1.025 1	
100	1.173 4	1.085 2	1.110 5	1.060 7	1.075 4	1.041 0	

3.3 高频超声检测芯片真实实验对比

为了继续验证本文方法的有效性,通过超声平台(图 6)检测真实芯片(FA10-200×200),检测频率为 110 MHz,采样长度为 551 采样点,结果如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,超声的一部分回波信号被噪声淹没,影响对芯片焊球的回波信号的分析,因此需要对回波信号进行降噪处理。OMP、MMP、IOMP 和 IMMP 都使用相同字典($D \in D^{551 \times 200\,000}$),且算法的迭代过程中稀疏度相同,其余算法的参数与仿真参数一致。

在对实际芯片超声回波信号处理后可以发现,小波去噪仍然存在一定的噪声,EMD 去噪后的结果出现了严重的波形失真,幅值也出现较大的变化,而 OMP 去噪由于字典和信号存在误差,且信号中有噪声的干扰,出现了波形丢失的情况。本文方法 IMMP 去噪后在能够保留出微小的反射波的同时去除大部分的噪声,其降噪效果优于其他降噪方法,能够有效的反映回波信号的信息。

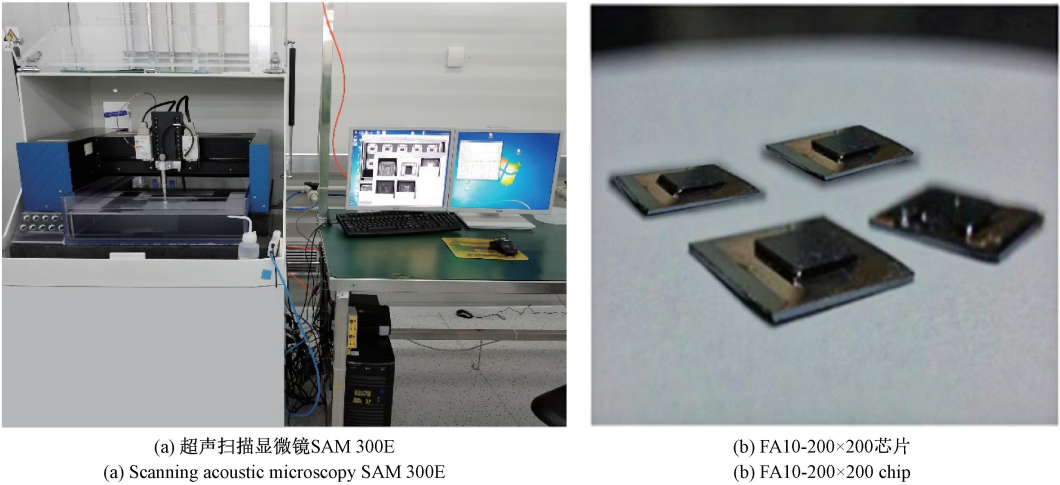
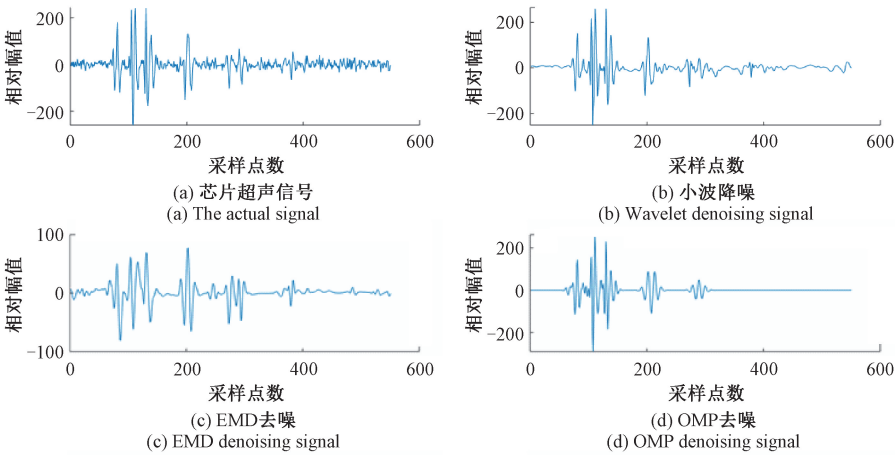


图 6 超声检测平台和 FA10-200×200 芯片
Fig. 6 Ultrasonic testing platform and FA10-200×200 chip



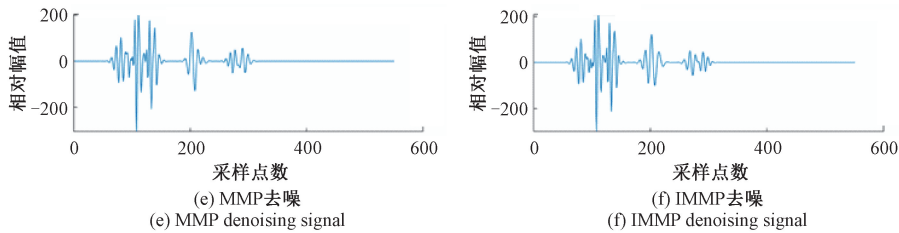


图 7 芯片实际高频超声回波信号去噪效果

Fig. 7 Denoising effect of the actual high-frequency ultrasonic echo signal of the chip

为了证明本文降噪方法的有效性,首先对实际信号进行处理,通过重构 B 扫图进行验证,如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,由于噪声污染,未经降噪的 B 扫成像界面之间的区分并不明显。同时,各种噪点影响界面判断,增加界面识别难度。从图 8(b)可以看出,基于本文方法降噪后的 B 扫图像可以很准确地辨别各个界面的分

布信息,相邻界面的区分也更加明显。同时,由超声在传播过程中发生的晶粒反射和微小缺陷导致的反射波能够较好的筛选,使得 B 扫图像更加清晰干净。

4 结 论

针对高频超声检测倒装焊芯片微缺陷回波信号受噪声影响的问题,提出了一种基于 MMP 改进的信号去噪方法,通过设置阈值和引入剪枝操作,构建连续原子库,实现了信号的去噪重构。仿真和实验结果表明,在去噪性能上所提方法去噪后的信噪比最高,均方根误差最低,优于小波、EMD、OMP、IOMP 和 MMP,能够在保留信号有效信息的同时尽可能地去除噪声。在计算复杂度上,IMMP 通过剪枝和设置阈值大大降低算法的复杂度,提高计算效率。IMMP 通过在已选择的原子附近构建连续原子库,以少量地增加计算量来提升信号的重构精度,相比整体提升过完备字典的维度,本文算法更加具有优势。

参考文献

[1] 宿磊. 倒装焊缺陷高频超声诊断方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

SU L. Research on high frequency ultrasonic diagnosis of flip chip flaws [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[2] BRAND S, CZURRATIS P, HOFFROGGE P, et al. Extending acoustic microscopy for comprehensive failure analysis applications [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2011, 22(10): 1580-1593.

[3] MALLAT S G, ZHANG Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.

[4] LIANG W, QUE P W, LEI H M, et al. Matching pursuit for decomposition and approximation of ultrasonic pulse-echo wavelet and its application in ultrasonic nondestructive evaluation [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(7): 075105.

[5] 焦敬品, 张家玮, 陈昌华. 一种用于超声信号降噪的非凸变量重叠群稀疏变分方法 [J]. 仪器仪表学报,

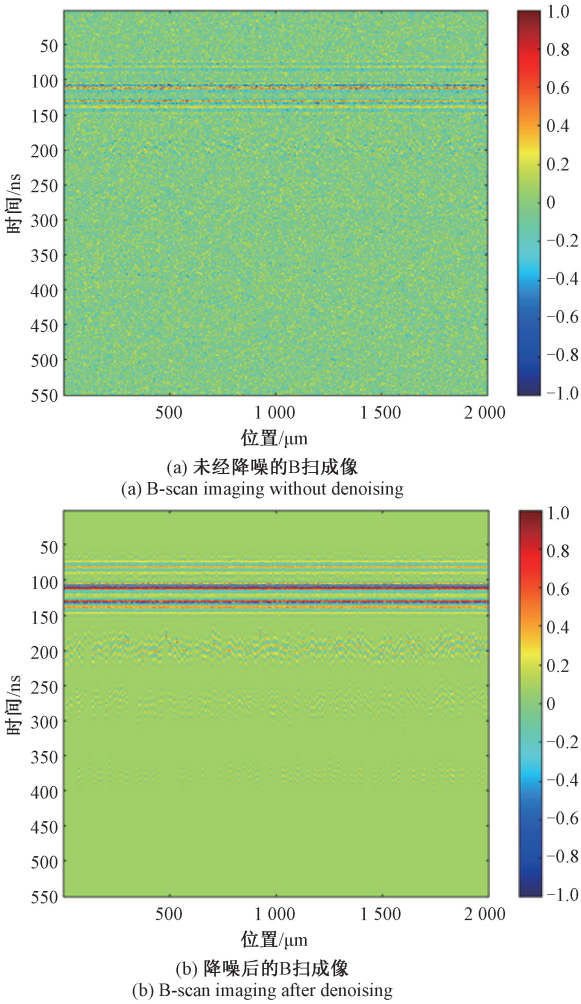


图 8 未经降噪的 B 扫成像和降噪后的 B 扫成像

Fig. 8 B scan imaging without denoising and B scan imaging after denoising

- 2022, 43(4): 234-245.
- JIAO J P, ZHANG J W, CHEN CH H. An ultrasonic signal denoising method using overlapping group sparse variational processing based on non-convex penalty function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 234-245.
- [6] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [7] 曲正伟, 张坤, 王云静. 基于 BCC-OMP 优化的原子分解去噪算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2044-2052.
- QU ZH W, ZHANG K, WANG Y J. A signal de-noising algorithm based on the BCC-OMP optimized atomic decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):2044-2052.
- [8] YU X, HUANG H, XIE W, et al. Simulation research on sparse reconstruction for defect signals of flip chip based on high-frequency ultrasound [J]. Applied Sciences, 2020, DOI: 10.3390/app10041292.
- [9] KWON S, WANG J, SHIM B. Multipath matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2986-3001.
- [10] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]. Proceedings of the Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1993.
- [11] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the lasso: A retrospective [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical Methodology, 2011, 73: 273-282.
- [12] GORODNITSKY I F, RAO B D. Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: A re-weighted minimum norm algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(3): 600-616.
- [13] EKANADHAM C, TRANCHINA D, SIMONCELLI E. Recovery of sparse translation-invariant signals with continuous basis pursuit [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(10): 4735-4744.
- [14] LU Y, MICHAELS J E. Numerical implementation of matching pursuit for the analysis of complex ultrasonic signals[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(1): 173-182.
- [15] ZHANG G M, ZHANG C Z, HARVEY D M. Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE[J]. Ultrasonics, 2012, 52(3): 351-363.
- [16] KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1351-1362.
- [17] WU B, HUANG Y, KRISHNASWAMY S. A Bayesian approach for sparse flaw detection from noisy signals for ultrasonic NDT[J]. NDT & E International, 2017, 85: 76-85.

作者简介



Li Ke received his Ph. D. degree in mechatronic engineering from Mie University in 2012. He is currently the dean of Junyuan College and a professor in School of Mechanical Engineering at Jiangnan University. His main research interests include signal processing, fault diagnosis and structural health monitoring.



E-mail: lei_su2015@jiangnan.edu.cn

Su Lei (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Qingdao University in 2009, and Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2015. He is currently an associate professor at Jiangnan University. His main research interests include microelectronics packaging and testing, signal processing, image processing and fault diagnosis.

李可, 2012 年获得日本三重大学机电工程博士学位, 现为江南大学君远学院院长, 机械工程学院教授, 主要研究方向为信号处理、故障诊断和结构健康监测。

E-mail: like_jiangnan@163.com

宿磊 (通信作者), 2009 年于青岛大学获得学士学位, 2015 年于华中科技大学获得博士学位, 现为江南大学副教授, 主要研究方向为微电子封装技术、信号处理、图像处理和故障诊断。