

## 改进的均值滤波算法在太赫兹成像中的应用

朱维文<sup>1,2</sup>, 赵跃进<sup>1</sup>, 朱慧时<sup>1</sup>, 李冰<sup>1</sup>, 孔令琴<sup>1</sup>, 董立泉<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘要:** 研究被动太赫兹图像的降噪算法, 提出了一种改进的均值滤波算法, 在原有均值滤波算法的基础上加入了阈值的概念, 由被动太赫兹扫描成像的技术特点确定了滤波模块的形状, 并根据图像评价参数信息熵确定了滤波模板的最佳尺寸。实验表明该算法对于被动太赫兹图像具有良好的降噪效果, 可以在保留成像目标信息的基础上滤除图像背景中的噪声。该算法提高了图像质量, 增加了对隐匿物的辨别能力, 从而为被动太赫兹成像技术在安检工作中的应用提供了必要的保证。

**关键词:** 图像处理; 被动太赫兹成像; 均值滤波; 扫描成像; 信息熵

**中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)05-1241-06

## Improved mean filtering algorithm in THz imaging

Zhu Weiwen<sup>1,2</sup>, Zhao Yuejin<sup>1</sup>, Zhu Huishi<sup>1</sup>, Li Bing<sup>1</sup>, Kong Lingqin<sup>1</sup>, Dong Liquan<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The de-noising algorithms applied in passive THz imaging was studied in this paper. An improved mean filtering algorithm was proposed, in which the threshold was introduced based on the traditional mean filtering algorithm. The shape of filter mask was decided by the characteristics of scan images resulting from passive THz imaging, and furthermore the best size of the kernel was determined according to one of the evaluation parameters of the digital images-entropy. The experimental result shows that the novel de-noising algorithm has good effects on passive THz images. It not only preserves the information of imaging targets, but also removes out the background noises. The algorithm enhances the quality of the images and increases the ability to detect the concealed metal objects underneath people's clothing. Therefore, it provides necessary guarantees for the application of passive THz imaging technology in the future security inspection.

**Key words:** image processing; passive THz imaging; mean filter; scan imaging; entropy

收稿日期: 2013-03-12; 修订日期: 2013-04-14

基金项目: 2010 北京市优博指导教师科研项目(YB20101000701)

作者简介: 朱维文(1985-), 男, 博士, 主要从事被动 THz 成像方面的研究。Email: zhuweiwen\_hf@126.com

导师简介: 赵跃进(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事 THz 成像、红外成像等方面的研究。Email: yjzhao@bit.edu.cn

## 0 引言

处于微波和光波之间的太赫兹波(0.1~10 THz), 具有较好的穿透性和较高的空间分辨率, 并且可以利用人体和隐藏在衣物下的违禁物品(枪支、刀具、炸药等)的太赫兹波辐射特性的不同, 采用太赫兹波辐射计对隐匿违禁物品进行成像, 从而达到探测识别的目的。但是对于该项技术而言, 其受探测器灵敏度、天线的低通效应、成像系统的衍射效应等限制<sup>[1]</sup>, 往往在所得图像中有着较明显的噪声分布, 这些限制了该技术在安检中的应用。

## 1 被动太赫兹成像系统及成像结果

太赫兹波段的探测器受加工工艺限制, 制作困难且造价昂贵, 所以被动太赫兹成像还不能像焦平面阵列那样直接形成图像。因此, 采用少数太赫兹波探测单元结合光机扫描的模式是目前一种主流的被动太赫兹成像手段<sup>[2]</sup>。这种成像方式不仅可实现速度快、分辨率高、视场大等需求, 而且显著地降低了系统成本。图 1 为被动太赫兹成像系统的原理示意图<sup>[3]</sup>。

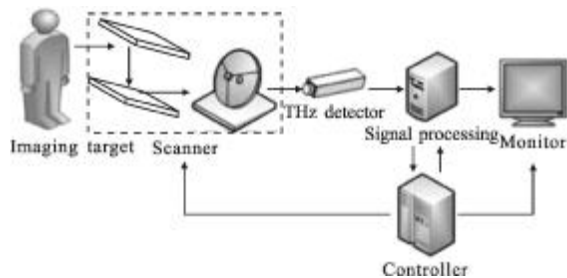


图 1 被动太赫兹成像系统结构

Fig.1 Configuration of passive THz imaging system

机械扫描机构在成像系统的最前端, 用以收集和反射视场中太赫兹波辐射, 并通过上、下两个反射镜在场和行两个方向上的扫描, 使得天线波束依次扫过成像目标的各个部分, 然后由辐射计将天线波束驻留时目标的太赫兹波辐射亮度温度转换成相应的电压信号, 再经过信号(图像)处理形成目标图像, 最后送至显示器, 从而显示出目标场景的辐射亮度温度的分布图像。

### 1.1 成像系统的空间分辨率

系统成像的空间分辨率<sup>[4]</sup>为:

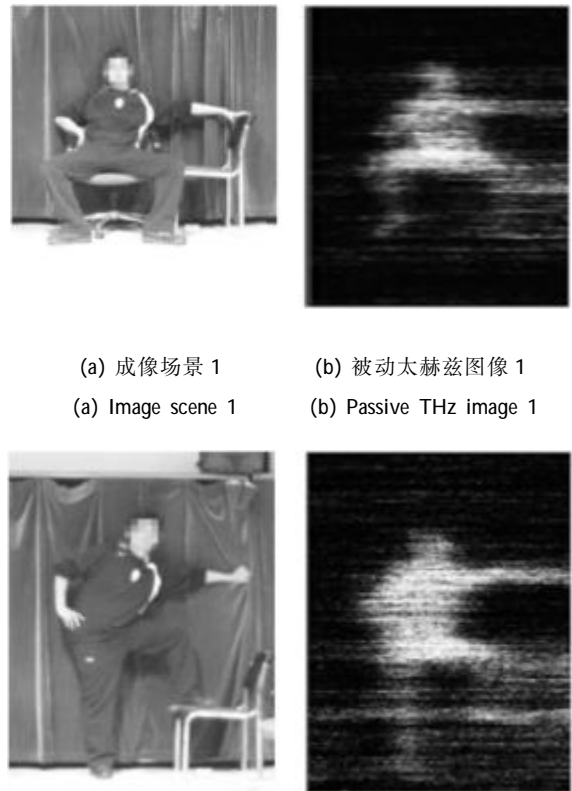
$$\varphi_0 = \Delta\theta \cdot d = 1.22\lambda \frac{d}{D} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\theta$  为系统成像的角分辨率;  $\lambda$  为 94 GHz 波段对应的波长,  $\lambda=3.2$  mm;  $d$  为被测物到卡塞格伦天线主反射面的距离;  $D$  为卡塞格伦天线主反射面的口径,  $D=390$  mm。

因此, 可得该系统的成像角分辨率  $\Delta\theta$  为  $0.6^\circ$ 。若在相对卡塞格伦天线主反射面 4 m 的距离上进行成像, 其成像的空间分辨率  $\varphi_0$  为 40 mm, 可以实现对一般尺寸隐匿物品进行探测的目的。

### 1.2 室内无隐匿物品的人体图像

人距成像系统 3 m 处成像, 且身上不携带任何隐匿物品, 成像结果如图 2 所示。



(a) 成像场景 1

(b) 被动太赫兹图像 1

(a) Image scene 1

(b) Passive THz image 1

(c) 成像场景 2

(d) 被动太赫兹图像 2

(c) Image scene 2

(d) Passive THz image 2

图 2 室内无隐匿物品的成像

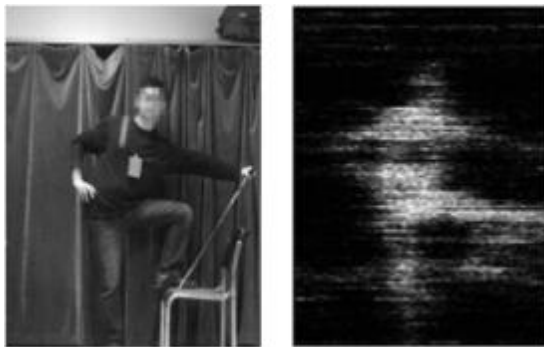
Fig.2 Indoor imaging without concealed object

### 1.3 室内有隐匿物品的人体图像

人距成像系统 3 m 处成像, 胸口处藏有隐匿金属(尺寸为 11 cm×9 cm), 成像结果如图 3 所示。

从成像效果来看, 该系统可以在普通的室内环境下对人体进行成像, 而且可以很好地分辨出被成

像者的轮廓,姿态,以及身体上的细节,如:颈部、手臂、双腿等等。此外,对于隐匿于衣物下的金属也可以明显的辨认出其形状、位置等。但是由于实验环境、硬件系统的性能干扰等因素,所得图像存在了大量的噪声,尤其是背景具有很明显的噪声分布。图像的低信噪比是阻碍该项技术发展的主要因素之一。因此,有必要使用有效的图像降噪算法提高图像的信噪比。



(a) 成像场景 (b) 被动太赫兹图像  
(a) Image scene (b) Passive THz image

图 3 室内有隐匿物品成像

Fig.3 Indoor imaging with concealed metal

## 2 被动太赫兹图像的降噪技术

### 2.1 均值滤波算法

均值滤波是一种有效的空间滤波算法<sup>[9]</sup>,其主要思想就是邻域平均,即用该像元邻域内(M×N)所有像元灰度值的平均值来代替该像元的灰度值,从而达到一个平滑图像的效果,算法流程图如图 4 所示,

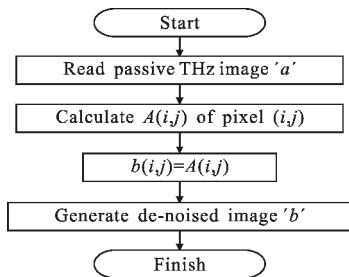


图 4 均值滤波算法

Fig.4 Mean filter algorithm

$A(i, j)$ 的数学表达式如公式(2)所示:

$$A(i, j) = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \left[ \sum_{x=i-\frac{M-1}{2}}^{i+\frac{M-1}{2}} \sum_{y=j-\frac{N-1}{2}}^{j+\frac{N-1}{2}} a(x, y) \right] \quad (2)$$

式中: $a(i, j)$ 表示像元 $(i, j)$ 的灰度值; $A(i, j)$ 为以 $(i, j)$ 为中心点的 $M \times N$ 区域内灰度的平均值。

但是,被动太赫兹图像中的噪声主要出现于“背景”中,如果对于图像中所有像元都做运算,那么图像中的“人体”也会受其影响,整个图像会给人一种被“模糊”了的感觉,而且“人体”的边缘也被钝化。因此,这种传统的均值滤波算法不能适用于该系统所得图像。图 5 列出了对源图像分别使用  $7 \times 7$ 、 $5 \times 5$ 、 $3 \times 3$  模板滤波的结果。

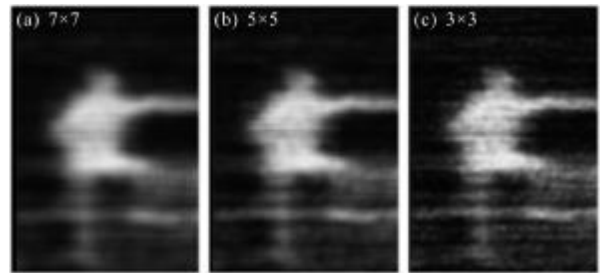


图 5 不同模板进行均值滤波的结果

Fig.5 Filter results by different masks

### 2.2 改进的均值滤波算法

#### 2.2.1 算法流程

从图 2 中看出,被动太赫兹图像中“背景”部分和“人体”部分的亮度差距较大。因此,可以根据图像中“背景”和“人体”的灰度信息来对被邻域均值取代的像元设定阈值,使“背景”中的噪声被滤除,而保留下“人体”的信息。改进算法流程如图 6 所示。

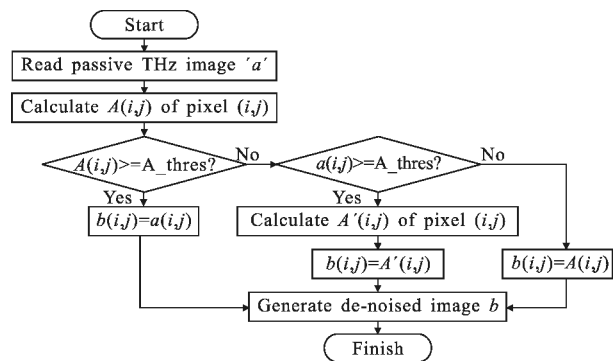


图 6 改进的均值滤波算法

Fig.6 Improved mean filter algorithm

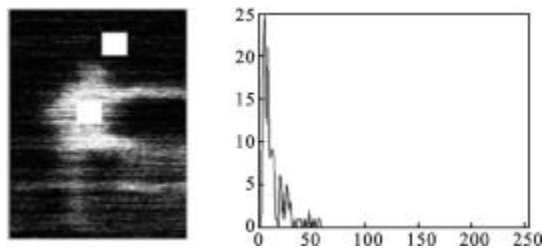
该算法首先计算出以像元  $(i, j)$  为中心的  $M \times N$  邻域内所有像素灰度值的平均值  $A(i, j)$ ,若该值大于预设的阈值  $A\_thres$ ,则该像元默认为图像中的“人体”,对其不再做处理;否则被默认为图像中的“背景”,然后只对被默认为“背景”的像元做滤波处理。

如果这个像元的灰度值  $a(i, j)$  也大于阈值  $A\_thres$ , 那么该像元会被其邻域内除了该点以外所有像元的灰度值的平均值  $A'(i, j)$  取代,  $A'(i, j)$  的数学表达式如公式(3)所示; 如果这个像元的灰度值  $a(i, j)$  小于阈值  $A\_thres$ , 那么该像元会被其邻域内所有像元的灰度值的平均值  $A(i, j)$  取代。

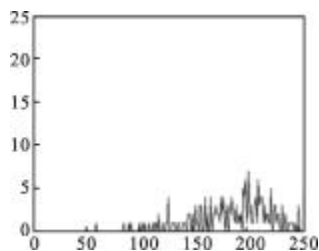
$$A'(i, j) = \frac{1}{M \cdot N - 1} \cdot \left[ \sum_{x=i-\frac{M-1}{2}}^{i+\frac{M-1}{2}} \sum_{y=j-\frac{N-1}{2}}^{j+\frac{N-1}{2}} a(x, y) - a(i, j) \right] = \frac{1}{M \cdot N - 1} \cdot [M \cdot N \cdot A(i, j) - a(i, j)] \quad (3)$$

### 2.2.2 阈值的选择

图 7(a) 截取了被动太赫兹图像(图 2(d))的部分“背景”以及部分“人体”的灰度信息, 并分别列出了其对应的灰度直方图, 分别如图 7(b)、(c)所示。



(a) 被动太赫兹图像 (b) “背景”部分的灰度直方图  
(a) Passive THz image (b) Histogram in “background”



(c) “人体”部分的灰度直方图  
(c) Histogram in “body”

图 7 被动太赫兹图像的分析  
Fig.7 Analysis of passive THz image

从图 7 中可以发现, 所得被动太赫兹图像“背景”部分绝大多数的灰度值都小于 20, 而对于“背景”中灰度值大于 20 且小于 50 的点都可以被认为是“背景”中的噪声, 而“人体”部分的灰度值都较高, 远远大于 50。因此可将阈值  $A\_thres$  设定为 50。

### 2.2.3 滤波模板的选择

在对图像采集的分析过程中, 该系统采用了单通道机械扫描的方式进行成像, 扫描以行为单位, 逐

行进行扫描。因为扫描的间隔较小, 所以可以认为相邻的两行的扫描数据是近似相等的, 即相邻的两行数据之间具有较强的连续性。因此, 改进算法的模板应该选择列方向上较长的矩形模板, 例如  $3 \times 13$ ,  $3 \times 11$ ,  $3 \times 9$ ,  $3 \times 7$ ,  $3 \times 5$  等。

### 2.2.4 滤波结果

分别使用上述模板对图 2(d) 进行降噪处理, 结果如图 8 所示。

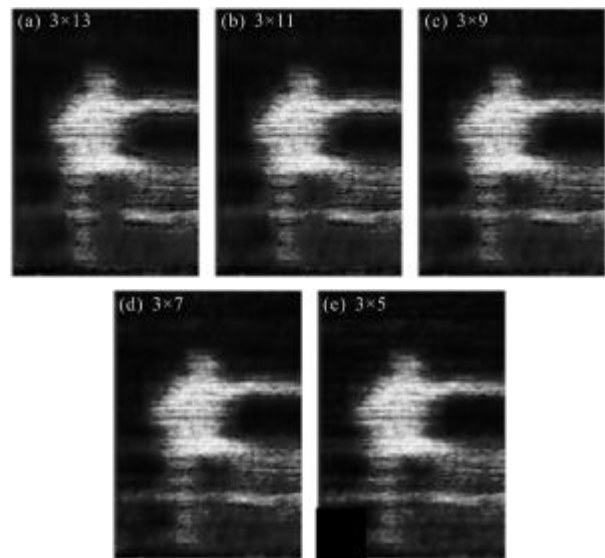


图 8 不同模板的滤波结果

Fig.8 Filter results of different masks

从图 8 中可以看出, 所有的模板均能有效地去除图像背景中的噪声并保留图像中的有效信息。但究竟哪一种模板更适合于该系统的图像降噪还需进一步研究。

## 3 算法的评价

信息熵<sup>[6]</sup>作为图像降噪的评价参数之一, 根据 Shannon 信息论的理论, 一幅图像的信息熵如公式(4)所示:

$$H = - \sum_{j=1}^J P(a_j) \cdot \log_2 P(a_j) \quad (4)$$

$P = \{P(a_1), P(a_2), \dots, P(a_j)\}$  为一幅图像的灰度分布;  $J$  为灰度等级;  $a_j$  为灰度值;  $P(a_j)$  为灰度为  $a_j$  的像素数与整个图像总像素数之比。

一幅图像的熵值越大, 表示这幅图像越“随机”, 即这幅图像越难以预测和非结构化。由此, 对图 2 中各被动太赫兹图像及其对应降噪之后的图像求熵,

结果如表1所示。

表 1 被动太赫兹图像降噪前后熵的比较

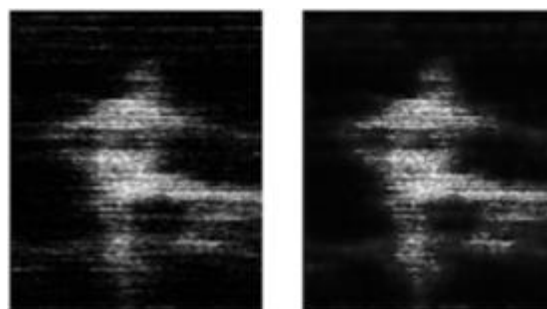
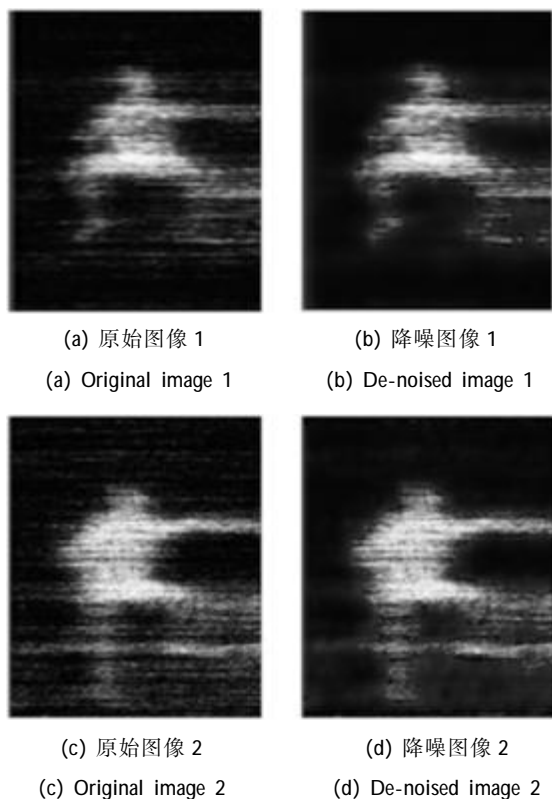
Tab.1 Comparison between the processed images and the original images in entropy

Original image	3×13	3×11	3×9	3×7	3×5	
Left image	6.711 7	6.662 3	6.642 4	6.641 0	6.650 6	6.652 4
Middle image	6.493 7	6.423 2	6.421 6	6.426 9	6.435 6	6.440 0
Right image	6.072 7	6.054 1	6.038 3	6.033 8	6.064 4	6.066 7

从表 1 中可以看出,所有图像滤波结果的信息熵都要小于原图像的信息熵,这表明上述所有模板的滤波都是有效的。但在使用不同模板之间,其滤波效果还有所差异,对该系统所得的图像而言,使用 3×11 模板或是 3×9 模板的降噪效果要好于使用其他模板。

因此,选用 3×9 的模板对图 2 和图 3 中的被动太赫兹图像进行降噪处理,去噪前后的对比如图 9 所示。

图 9 中(b)、(d)为对不携带隐匿物的人体进行成像,与原图比较,其背景噪声大大减少,人体的轮廓、姿态以及细节部分更加明显,图像的信噪比也大为提高。图 9(f)为对携带隐匿物的人体进行成像,不但



(e) 原始图像 3 (f) 降噪图像 3  
(e) Original image 3 (f) De-noised image 3

图 9 降噪前后图像的对比

Fig.9 Contrast of original images and de-noised images

图中人体的轮廓、姿态以及细节部分与原图比较都有很大的提高,更值得一提的是,在图像降噪的同时,图像中受检者所携带的隐匿物也更容易分辨了,可以清晰地辨别出该隐匿物的形状、尺寸和位置,丝毫不受滤波处理的影响。综上所述,这种改进的均值滤波算法适用于此实验系统的成像结果,无论是不携带隐匿物品时的成像,还是携带隐匿物品时的成像,都能达到理想的降噪效果。

### 4 结 论

目前,世界各国都在大力发展太赫兹技术,尤其是太赫兹成像更是此项技术的研究重点之一。被动太赫兹成像技术能够穿透衣物进行成像,因而可应用于机场、海关等地的安检场所。但由于太赫兹器件以及实验环境的影响,被动太赫兹图像中会存在较大噪声,文中针对以上问题提出了一种改进的均值滤波算法。该算法可以有效地去除图像背景中的噪声并保证成像目标不受影响,同时由于该算法的使用,受检者所携带的隐匿物品也更容易被发现。因此,该算法的出现为被动太赫兹成像技术在安检中的应用提供了有力地保证。

### 参考文献:

[1] Li Liangchao, Yang Jianyu, Jiang Zhengmao, et al. Researchon 3 mm radiometric imaging [J]. J Infrared Millim Waves, 2009, 28(1): 11-15. (in Chinese)  
李良超, 杨建宇, 姜正茂, 等. 3 mm 辐射成像研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28 (1): 11-15.

[2] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz

- spectroscopy and imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
- 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42 (1): 51-56.
- [3] Weiwen Zhu, Yuejin Zhao, Liqun Dong, et al. A novel design of a high performance passive millimeter-wave [C]// *SPIE*, 2010, 7854: 785426.
- [4] Woodward R M, Appleby R. Terahertz and millimetre wave technology in port and harbor security[C]//*SPIE*, 2005: 5780: 145-152.
- [5] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E, Eddins Steven L. *Digital Image Process (MATLAB)*[M]. Translated by Ruan Qiuqi. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 65-70. (in Chinese)
- [6] Aapo Hyvarinen, Juha Karhunen, Erkki Oja. *Independent Component Analysis*[M]. Translated by Zhou Zongtan. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 78-81. (in Chinese)

### 下期预览

## 提高光电轴角编码器细分精度的改进粒子群算法

高 旭<sup>1,2</sup>, 万秋华<sup>1</sup>, 杨守旺<sup>1</sup>, 陈 伟<sup>1</sup>, 赵长海<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为提高光电轴角编码器的细分精度及莫尔条纹光电信号的细分倍数, 设计了一种基于改进粒子群算法的信号正弦性修正方法。首先, 根据莫尔条纹光电信号的数学模型, 分析信号质量指标对细分误差的影响; 并从编码器的制作、调试、使用等环节出发, 指出信号细分误差产生的根本原因; 然后, 对改进粒子群算法的基本原理和实现步骤做了具体阐述; 最后, 以 21 位光电编码器为实验对象, 依据其精码转换的方波信息实现精码信号的自适应采样, 同时应用改进算法对采集的编码器原始光电信号进行数据预处理, 通过辨识信号模型中的 3 个待定参量, 直接实现信号等幅性偏差、稳定性偏差、正交性偏差的修正; 对算法处理后的莫尔条纹信号进行细分精度检测, 实验结果表明: 编码器细分误差峰值由 19.08" 降低到 2.86", 细分精度明显提高。