

被动式太赫兹图像目标检测研究

张馨¹ 赵源萌¹ 邓朝^{1,2} 张存林¹

¹ 首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048
² 北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 研究提出一种被动式太赫兹扫描成像的目标检测方法。用 0.22 THz 被动式扫描成像系统采集原始图像, 在滤波去噪后用针孔像分析法获得太赫兹扫描成像系统的点扩展函数, 进而用 Lucy-Richardson 算法重构图像, 通过灰度变换和边缘检测增强图像对比度和目标分辨力。实验结果表明, 算法能有效改善被动式太赫兹图像质量, 提高成像系统探测隐藏可疑物的能力。

关键词 被动式太赫兹成像; 针孔像分析; 图像重构; 目标检测

中图分类号 O43 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0211002

Study on the Passive Terahertz Image Target Detection

Zhang Xin¹ Zhao Yuanmeng¹ Deng Chao^{1,2} Zhang Cunlin¹

¹ Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China
² School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A target detection method for passive terahertz images is put forward. Original 0.22 THz images are captured using pre-developed passive scan imaging system. The original images are de-noised by spatial filtering. Then the point spread function of the imaging system is measured through pinhole images analysis, and is applied to reconstruct the images with the Lucy-Richardson iterative algorithm. Finally, gray level transform and edge detection are adopted to improve the images' contrast and resolution capability. Experimental results show that the proposed method is able to effectively improve passive terahertz images' quality and enhance the imaging system's ability of detecting hidden suspicious objects.

Key words passive terahertz imaging; pinhole image analysis; image reconstruction; target detection

OCIS codes 110.6795; 100.3010; 100.1830

1 引言

近年来太赫兹成像技术在安检领域中体现出令人瞩目的发展前景, 其优势主要有: 太赫兹波可以穿透纸箱、衣物、鞋子等发现藏匿的物体, 而且对被检查人员和操作人员无电离损害, 非常适合于人体安检; 安检重点关注的爆炸物、毒品和生物等在太赫

兹波段具有特征指纹谱, 可望在探测的基础上识别其成分^[1,2]。然而, 受探测灵敏度和电噪声等因素影响, 太赫兹成像目前还达不到红外焦平面阵列成像的清晰度和目标识别能力。国内外研究者提出了多种太赫兹图像的增强方法。李琦等^[3,4]用开运算重构法对太赫兹面阵图像以及连续太赫兹反射扫描

收稿日期: 2012-09-11; 收到修改稿日期: 2012-10-04

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310408)、国家自然科学基金 (11004140) 和北京市教育委员会科技面上项目 (11224010011) 资助课题。

作者简介: 张馨 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹成像及其图像处理算法等方面的研究。

E-mail: achona@sohu.com

导师简介: 张存林 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹波谱与成像、红外热波无损检测等方面的研究。

E-mail: cunlin_zhang@yahoo.com (通信联系人)

成像进行了预处理;徐英等^[5]提出一种结合小波去噪的多尺度增强算法,增强了 338 GHz 透射太赫兹图像细节,抑制了图像噪声;Sundareshan 等^[6]提出一种凸集投影最大似然(POSS-ML)算法,复原了图像截止频谱以外的信息,提高了图像分辨率。

从 2008 年起,本课题组对被动式人体太赫兹成像系统开展研究,目前已研制了多台被动式太赫兹扫描成像系统。为了增强被动式太赫兹成像系统的目标检测能力,曾用高斯型点扩展函数(PSF)对人体太赫兹图像进行反卷积重构,在一定程度上提高了图像的分辨力^[7]。但高斯型 PSF 是基于对成像系统的理想化估计,与实际的退化模型不一定吻合。为了进一步提高重构结果的准确性,本文将采用针孔像分析法来标定成像系统的 PSF 用于重构 0.22 THz 图像,以期达到更好的处理效果。

2 0.22 THz 扫描成像系统

采用单探头的扫描成像系统对被测目标成像。该系统主要由光机扫描器、聚焦透镜、探测器和信号处理单元构成,工作中心频率为 0.22 THz,如图 1 所示。光机扫描器在通过一个多面体转镜绕其水平

旋转轴高速稳定旋转的同时绕其竖直摆动轴往复摆动,从而实现对被测目标的二维快速扫描。聚焦透镜将光机扫描器扫描而来的被测目标所辐射的太赫兹波会聚到太赫兹探测器的信号输入端口。太赫兹探测器将太赫兹波转变为电压信号,该电压信号与被测目标所辐射的太赫兹波的强弱呈线性变化。太赫兹探测器所输出的电压信号通过数据处理部分进行梳理和采集,并与光机扫描器所生成的同步信号相结合,在计算机中拼接出被测目标的太赫兹图像。

由于被动成像系统没有使用辐射源,探测到的人体辐射太赫兹波信号功率往往较低,图像易受环境噪声以及电噪声的影响。另外,太赫兹波长大于可见光和红外波,而且成像系统的通光口径有限,因此图像分辨力受衍射极限影响导致模糊(如图 1 所示)。目标人物距离成像系统 2 m,双手叉腰站立,腹部藏有直径为 3 cm 的金属片,在室内对目标人物进行被动式太赫兹成像。从图中可以看出,人体的轮廓可以辨认,但图像受到噪声干扰,目标细节不清晰容易引起误检测。下面将通过图像去噪、图像重构和边缘检测等提高图像的目标分辨能力,帮助安检人员更有效地检测隐藏携带的违禁物品。

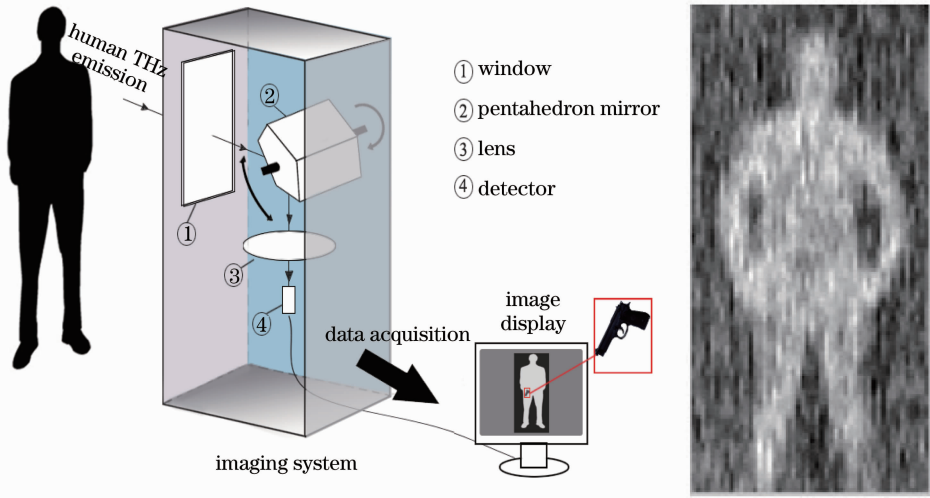


图 1 被动式太赫兹扫描成像系统及原始图像
Fig. 1 Passive terahertz imaging system and its original image

3 图像目标检测

3.1 图像去噪

采用中值滤波和均值滤波去噪。中值滤波将像素灰度值用其邻域中值代替,消除孤立噪点。二维中值滤波输出为

$$q(x,y) = \text{med}\{p(x-k,y-l), (k,l \in W)\}, \tag{1}$$

式中 $p(x,y)$ 、 $q(x,y)$ 分别为原始图像和滤波后的图像, W 为二维模板。均值滤波用各像素邻域均值代替原像素值

$$q(x,y) = \sum p(x-k,y-l)/m, (k,l \in W), \tag{2}$$

式中 m 为二维模板像素总个数。去噪结果如图 2 所示,首先采用 3×3 的窗口对原始太赫兹图像 2 次中值滤波,然后再进行 1 次均值滤波以平滑图像噪声。与原始太赫兹图像相比,图 2 中的噪声干扰被明显抑制。



图 2 去噪结果
Fig. 2 De-noising result

3.2 图像重构

按照傅里叶光学的观点,光学成像系统相当于一个低通滤波器,在由衍射极限分辨率所决定的截止频率以外,其传递函数的值均为零。本文采用 Lucy-Richardson (L-R) 算法^[8~11] 增强被动式太赫兹图像的分辨力。L-R 算法收敛于泊松统计的最大似然解,其迭代方程为

$$f'_{k+1}(x,y) = f'_k(x,y) \left[h(-x,-y) * \frac{g(x,y)}{h(x,y)f'_k(x,y)} \right], \quad (3)$$

式中 k 为迭代次数 ($k = 0, 1, 2, \dots$), $f'_k(x,y)$ 为第 k 次迭代求出的最佳估计, $h(x,y)$ 为系统 PSF, $g(x,y)$ 为已知退化图像。L-R 算法是迭代非线性方法,所以对于给定的应用在主观认为结果最满意时停止迭代^[9,10]。

分析(3)式可知,要用 L-R 算法进行反卷积图像重构首先需要给定 $f'_0(x,y)$ 的值,一般情况下,使用一个与 $g(x,y)$ 同等大小的单位矩阵作为迭代初始估计^[11];其次要给定系统的退化函数 $h(x,y)$,通常可以用 PSF 来代替系统退化函数。PSF 也称成像系统的脉冲响应,即当物方为一个点光源 $\sigma(x,y)$ 时,其经过成像系统的二维像光强分布

$$g(x,y) = h(x,y) = f_{\text{PSF}}(x,y). \quad (4)$$

现实中点光源直径不可能无限小,本文采用针孔像分析法^[12~14] 通过实验得到系统 PSF,以针孔为目标物,用高温黑体为光源照射针孔,然后使用成像系统对目标物成像,对采集到的针孔图像进行数值分析得到二维的 PSF,如图 3 所示。因为成像系统的分辨率为 2.5 cm,实验中选取的针孔半径为 1 cm,黑体温度设定为 90 °C。对采集到的多帧点源图像进行叠加平均,再减去经过多次平均的零频背景图像,可以适当降低环境噪声对 PSF 的影响,结果如图 4 所示。最后对针孔像进行归一化处理,即得到系统的二维 PSF。将 $f'_0(x,y)$ 和 $f_{\text{PSF}}(x,y)$ 代入(3)式重构图 2,可得到分辨率增强的处理结果。

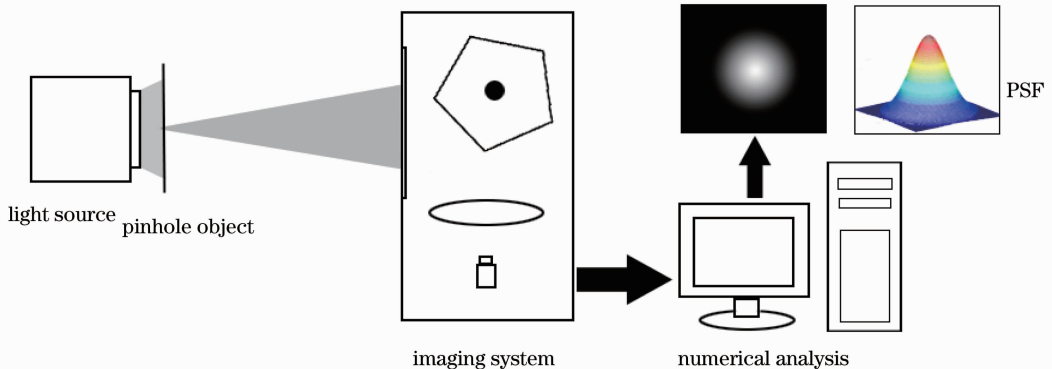


图 3 系统 PSF 的获得

Fig. 3 Measurement of the point spread function

为了在图像反卷积重构的基础上调整灰度动态范围和对对比度,提高图像目标检测能力,用灰度变换方法进一步分离图像中的人和背景。人体的太赫兹辐射比背景环境要强,体现在灰度图像上就是灰度

值比背景高,通过选定合适的阈值能够达到降低背景干扰突出人体的效果^[15]。本文取

$$\theta_{\text{th}} = 0.6(\gamma + \delta), \quad (5)$$

式中 γ 为图像的灰度值均值, δ 为图像的灰度值标

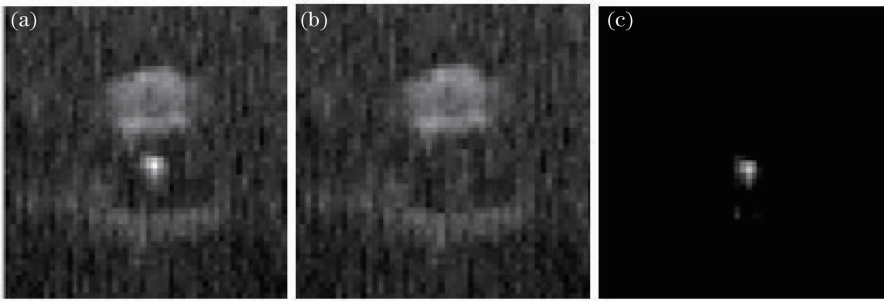


图 4 针孔像。(a)叠加平均针孔像;(b)零频背景图像;(c)减背景图像

Fig. 4 Pinhole image. (a) Average result of 6 pinhole images superimposed; (b) background image; (c) pinhole image subtracted by background image

准偏差。小于阈值的灰度级被压缩为零,而大于阈值的灰度级的变化范围得到增大。如图 5(a)所示,在去噪的基础上对图像进行 L-R 迭代,再进行灰度变换重构图像。

3.3 边缘检测

Canny 边缘检测器是高斯函数的一阶导数,是信噪比与定位乘积的最优化逼近算子。Canny 边缘检测错标非边缘点和不标真实边缘点的概率很低,且检测出来的边缘尽可能地靠近真实边缘中心。Canny 算法用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向,再对梯度幅值应用非极大值抑制,最后用双阈值法检测并且连接边缘。对图 5(a)进行边缘检测的结果如图 5(b)所示,Canny 边缘检测不易受到噪声的干扰,能够在丢失有效边缘与将噪声判断为边缘之间取得平衡。

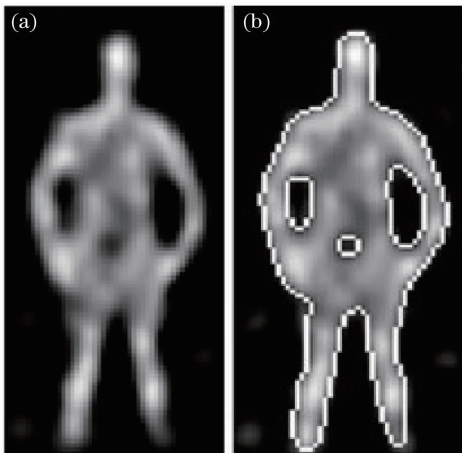


图 5 (a)图像重构和(b)边缘检测结果

Fig. 5 Results of (a) image reconstruction and (b) edge detection

使用本文方法对不同目标物图像进行重构实验,如图 6 所示。图 6(a)为成像系统对 40 ℃水箱的成像结果,水箱大小为 30 cm×22 cm,水箱前部放置了直径为 5 cm 的铝片,应用本文重构方法得出

的处理结果如图 6(b)所示。由图 5(b)和 6(b)可见,经过本文算法处理后,图像中人和物体的轮廓清晰,噪声和背景干扰被抑制,更容易发现隐藏可疑目标,有利于提高成像系统的目标检测能力。

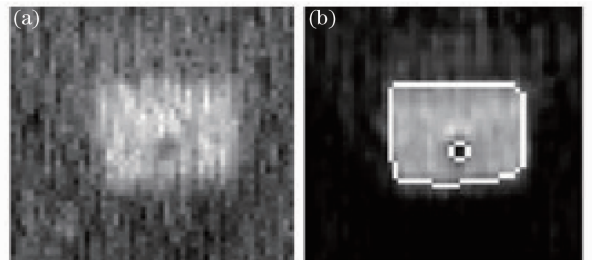


图 6 热水箱原始图像和重构结果。(a)热水箱原始太赫兹图像;(b)重构结果

Fig. 6 Original image and reconstruction result of a hot water tank. (a) Original terahertz image; (b) reconstruction result

4 图像处理效果评价

下面将本文方法与其他处理方法进行对比。

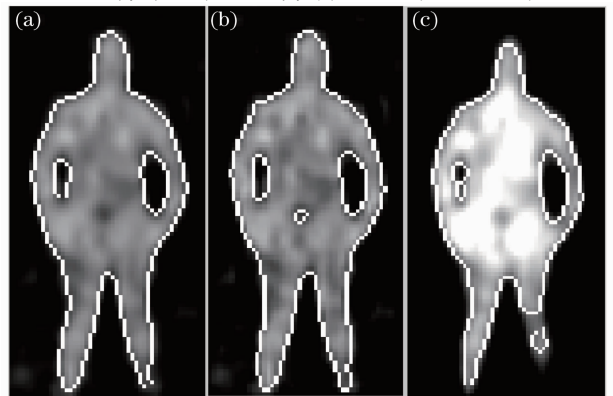


图 7 (a)去噪模糊图像处理结果;(b)使用高斯 PSF 处理结果;(c)使用盲去卷积算法处理结果

Fig. 7 Reconstruction results obtained by (a) processing blurred image, (b) using Gaussian PSF and (c) using blind de-convolution

图 7(a)为对去噪结果图像(见图 2)直接进行灰度变换和边缘检测的结果,图 7(b)为使用高斯型 PSF^[7]对去噪图像重构后进行边缘检测的结果,图 7(c)为采用经典的盲去卷积算法进行处理的结果。从主观视觉效果上判断,图 5(b)的目标检测能力优于图 7。

采用均方差评价(MSE)、平均亮度分布(UID)、边缘强度(CV)以及清晰度这四种常用图像质量评价参量^[16~18]比较上述几种方法。各评价参量的计算公式如下:

$$f_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - \bar{f}]^2, \quad (6)$$

$$f_{\text{UID}} = \sum_{k=0}^{L-1} \ln(n_k + 1) / \left[L \ln \left(\frac{\sum_{k=0}^{L-1} n_k}{L} + 1 \right) \right], \quad (7)$$

$$f_{\text{CV}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f * H|, \quad (8)$$

$$f_{\text{Definition}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{[f(i+1, j) - f(i, j)]^2 + [f(i, j+1) - f(i, j)]^2}, \quad (9)$$

式中 f 为待评价图像, M 、 N 表示图像的大小, \bar{f} 为图像的平均灰度级, L 为图像灰度级数, n_k 为灰度等级为 k 的像素数, H 为拉普拉斯算子。均方差、平均亮度分布、边缘强度以及清晰度都能反映图像微小

细节反差和纹理变化特征,值越大说明图像越清晰,包含的细节越多,算法重构效果越好^[17]。采用这四种评价方式分别对图 7(a)~(c)和图 5(b)进行评价,结果如表 1 所示。

表 1 重构结果的均方差评价、平均亮度分布、边缘强度和清晰度
Table 1 MSE, UID, CV and definition of the reconstruction results

	Blurred image	Result image using Gaussian PSF	Result image using blind de-convolution	Result image of this paper
MSE	0.1180	0.1255	0.2013	0.1417
UID	0.5692	0.5740	0.5771	0.6312
CV	0.7832	0.8340	0.7078	0.8395
Definition	0.1688	0.1775	0.1577	0.1817

由表 1 可知,图 5(b)的各项评价指标优于其他图像,但是盲去卷积结果图像[见图 7(c)]的均方差评价值是四者中最高的,这是因为其对比度最高,图像存在大范围的高灰度值区域,但并不说明其清晰度最优,这也反映了客观评价与主观感受的差异。可见本文处理结果比采用高斯型 PSF 的重构算法以及经典的盲去卷积算法具有更高的图像清晰度和更强的目标检测能力。

5 结 论

介绍了 0.22 THz 外差式探测成像系统,提出了适用于该系统的目标检测算法。采集不同类型目标物的原始太赫兹图像,然后根据图像噪声特性采用空域滤波平滑噪声,通过针孔像分析法得出系统 PSF 进而对图像进行反卷积重构,最后采用灰度校正和边缘检测提高图像对比度,标记目标轮廓。实验结果表明本文算法能够有效提高图像目标分辨率

力,改善了被动式太赫兹成像系统的实用性。受环境辐射干扰和系统电噪声影响,目前图像中特别是目标边缘有一定程度的空间形状畸变,在后续的研究中还需提高算法校正形状畸变的能力,以得到更逼真的成像效果。

参 考 文 献

- 1 J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280
- 2 Wang Linghui, Wang Yingxin, Liu Yuanyuan *et al.*. Establishment and the usage of terahertz spectral database [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0815002
王凌辉,王迎新,刘圆圆等.太赫兹光谱数据库的建立和使用[J].*中国激光*, 2012, **39**(8): 0815002
- 3 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李琦,姚睿,单纪鑫等.基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J].*光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 4 Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-

- mode scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1011001
- 丁胜晖, 李琦, 李云达等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1011001
- 5 Xu Ying, Hong Zhi. Study of multi-scale enhancement algorithm for THz images combining wavelet denoising [J]. *Chinese J. Sensors and Actuator.*, 2011, **24**(3): 398~401
- 徐英, 洪治. 结合小波去噪的THz图像多尺度增强算法研究[J]. *传感技术学报*, 2011, **24**(3): 398~401
- 6 M. K. Sundareshan, S. Bhattacharjee. Superresolution of passive millimeter wave images using a combined maximum-likelihood optimization and projection onto convex-sets approach [C]. *SPIE*, 2001, **4373**: 105~116
- 7 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao *et al.*. Study on the image reconstruction algorithm for passive human terahertz imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111009
- 张馨, 赵源萌, 邓朝等. 被动式人体太赫兹成像系统的图像重构算法研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111009
- 8 S. Borman, R. L. Stevenson. Super-resolution from image sequences: a review [C]. 1998 Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1998. 374~378
- 9 L. B. Lucy. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *Astron. J.*, 1974, **79**: 745~759
- 10 W. H. Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(1): 55~59
- 11 Yue Li, Li Li, A. Hellicar *et al.*. Super-resolution reconstruction of terahertz images [C]. *SPIE*, 2008, **6949**: 69490J
- 12 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke *et al.*. A new adaptive background correction method based on pinhole image analysis in optical system modulation transfer function measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812008
- 段亚轩, 陈永权, 赵建科等. 一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数测量的自适应背景校正方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812008
- 13 Wang Jiao. Study of MTF Measurement Technique Based on Pinhole Image Analysis [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007. 23~25
- 王娇. 基于针孔像分析法的光学传递函数测试技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2007. 23~25
- 14 Huang Zhen, Shu Chaolian, Ma Weihong *et al.*. MTF testing based on a pinhole target [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(4): 504~507
- 黄震, 舒朝濂, 马卫红等. 基于针孔目标物的调制传递函数测试[J]. *应用光学*, 2007, **28**(4): 504~507
- 15 A. Fernández-Caballero, J. C. Castillo, J. Serrano-Cuerda *et al.*. Real-time human segmentation in infrared videos [J]. *Expert System with Applications*, 2011, **38**(3): 2577~2584
- 16 Zhao Yanyan, Yuan Yan, Su Lijuan. Point spread function estimation of blurring due to uniform linear motion in arbitrary direction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0809003
- 赵妍妍, 袁艳, 苏丽娟. 任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0809003
- 17 Ren Xue. Research and Implement of Objective Image Quality Evaluation Method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. 27~29
- 任雪. 图像客观评价方法的研究与实现[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008. 27~29
- 18 Xiong Jintao, Sun Qiansong, Li Liangchao *et al.*. An adaptive bidirectional diffusion process for passive millimeter-wave image denoising and enhancement [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2011, **30**(6): 556~560
- 熊锦涛, 孙乾松, 李良超等. 一种基于自适应双向扩散过程的无源毫米波图像去噪与增强[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(6): 556~560

栏目编辑: 李文喆