

基于马尔可夫约束的被动式太赫兹图像复原

孙 晓¹ 赵源萌² 邓 朝¹ 张存林^{2*} 赵跃进¹

¹ 北京理工大学光电学院, 北京 100081

² 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

摘要 太赫兹 (THz) 波具有的许多独特性质, 使其非常适合应用于对人体的安检成像, 但是目前原始太赫兹图像的信噪比、对比度和分辨率都有待改善。为提高太赫兹安检图像的质量, 研究提出一种基于马尔可夫随机场理论的被动式太赫兹图像复原算法。对原始图像进行去噪和增强的预处理之后, 在贝叶斯分析的基础上增加马尔可夫约束项进行图像复原。通过改变迭代次数和正则化参数, 得到了清晰度不同的处理结果, 经主客观评价指标分析确定了最佳的参数。实验结果证明, 本算法可以在被动式太赫兹图像的噪声滤除和边缘信息保持上取得较好的平衡, 从而大幅提高太赫兹安检图像的目标分辨能力。

关键词 图像处理; 被动式太赫兹成像; 图像复原; 贝叶斯分析; 马尔可夫随机场

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1011001

Passive Terahertz Image Restoration Based on Markov Constraint

Sun Xiao¹ Zhao Yuanmeng² Deng Chao¹ Zhang Cunlin² Zhao Yuejin¹

¹ School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

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

Abstract Terahertz (THz) wave is suitable for human body security imaging because of the unique characteristics of THz wave. But the signal noise ratio, contrast and resolution of original terahertz images need to be improved presently. In order to improve the quality of the THz images for security screening, a passive THz imaging restoration algorithm based on Markov random field is put forward. After being pre-processed by image de-noising and enhancement treatments, the original image is restored based on Bayes analysis to which Markov constraint is added. Different definition of resulting images are obtained by changing iteration and regularization parameter. Optimum parameters are determined by objective standard evaluation and subjective visual effect. Experimental results show that the proposed method achieves good balance between noise removing and edge information preserving of passive terahertz image. Thus target resolving ability of terahertz security images is improved dramatically.

Key words image processing; passive terahertz imaging; image restoration; Bayes analysis; Markov random field

OCIS codes 110.6795; 100.3020; 100.1830

1 引 言

太赫兹 (THz) 波是频率位于 0.1~10 THz 之间的电磁波。太赫兹波具有很强的穿透能力, 可以很好地穿透丝绸、衣物, 且太赫兹波单光子能量低, 对

人体无害。因此, 太赫兹成像非常适合应用在安检领域。人体自身辐射的太赫兹波能很好地穿透衣服, 而隐匿在衣服下的物品 (如刀具、枪支、毒品、爆炸物等违禁品) 对太赫兹波有较大吸收或反射, 通过

收稿日期: 2014-04-16; **收到修改稿日期**: 2014-05-22

基金项目: 北京市教育委员会市属高校创新能力提升计划项目 (TJSHG201310028012)、北京市教育委员会科技面上项目 (KM201310028003)、光电成像技术与系统教育部重点实验室科研基地科技支撑计划项目 (2012OEOIF04)

作者简介: 孙 晓 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹图像处理方面的研究。E-mail: diamondsxsx@126.com

导师简介: 赵跃进 (1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事电子稳像、太赫兹成像技术、基于微机电系统的红外成像技术等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn

扫描人身体范围内太赫兹辐射的强度,可得到人体和隐藏物品的太赫兹图像,有效完成对人安检任务。因此,近些年太赫兹成像安检受到了研究人员越来越多的关注^[1-4]。

目前由于探测器性能等原因,实际获得的被动式太赫兹图像信噪比较低,目标分辨能力不强,而在硬件上提升图像质量遇到了很多瓶颈和困难,这时更多人将目光投向了通过图像去噪复原等方法提升图像的分辨能力,很多研究人员都报导了对太赫兹图像处理技术的研究。徐利民等^[5]采用“十”字和45°“十”字中值滤波结合高斯卷积、频域增强实现对太赫兹图像的去噪和增强。谢云宇等^[6]介绍了不同超分辨率重建算法在太赫兹图像中的应用,并采用基于最大后验概率和凸集投影的超分辨率算法对太赫兹图像进行处理,处理效果较优。Wang等^[7]采用基于改进的凸集投影的分形插值对太赫兹图像进行超分辨重建,有效增强了图像目标细节。

本文介绍一种基于马尔可夫约束的被动式太赫

兹图像复原算法,针对本课题组自行研制的远距离被动式太赫兹扫描成像系统,采用数字图像处理方法提高图像分辨能力,力争解决图像噪声大、目标分辨能力差、难以实现目标识别等问题。在常规去噪增强的基础之上,将贝叶斯分析和马尔可夫随机场结合在一起,采用惩罚函数对图像进行最大后验概率复原,以期得到分辨能力更强的太赫兹复原图像。

2 基于马尔可夫约束的图像复原

图像的退化模型如图1所示。理想图像 f 在成像过程中受到光学传递函数 H 和加性噪声 n 影响,最终得到的是退化图像 g 。图像退化模型在空间域可以表示为

$$g(x,y) = f(x,y) \times h + n, \quad (1)$$

式中 h 为光学传递函数 H 的逆傅里叶变换,被称为点扩展函数^[8]。图像复原的任务就是在已知退化图像 g 的情况下尽可能复原出原图像 f 。基于贝叶斯分析的图像复原方法展现了良好的图像复原能力。

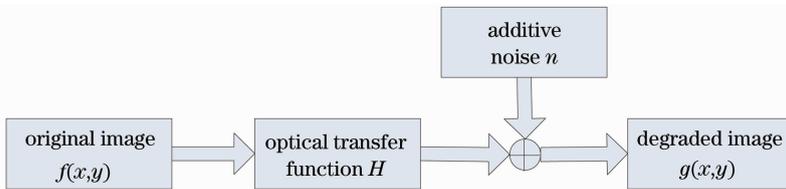


图1 图像退化模型

Fig. 1 Image degradation model

2.1 贝叶斯分析

根据贝叶斯公式有

$$P(f/g) = \frac{P(g/f)P(f)}{P(g)}, \quad (2)$$

式中 $P(f/g)$ 表示已知退化图像为 g 时,原图像为 f 的概率,称为后验概率, $P(g/f)$ 表示已知原图像为 f 时,退化图像为 g 的概率,称为似然函数, $P(f)$ 和 $P(g)$ 分别表示原始图像和退化图像的先验概率。为方便计算,将(2)式两边同时取对数得

$$\ln[P(f/g)] = \ln[P(g/f)] + \ln[P(f)] - \ln[P(g)]. \quad (3)$$

在图像复原问题中,因退化图像 g 已知, $P(g)$ 为定值可以不用考虑。对(3)式的最大化通常有以下两种方法:如果取前验概率 $P(g/f)$ 最大,即

$$\frac{\partial \ln[P(g/f)]}{\partial f} = 0, \quad (4)$$

此时对 f 的估计称为最大似然法(ML)。如果取后验概率 $P(f/g)$ 最大,即

$$\frac{\partial \ln[P(g/f)]}{\partial f} + \frac{\partial \ln[P(f)]}{\partial f} = 0, \quad (5)$$

此时对 f 的估计称为最大后验概率法(MAP)。

$P(f)$ 和 $P(g/f)$ 则是基于对图像的不同建模方法得到的。不同图像性质不同,建模方法也不同。若假设 $P(f)$ 和 $P(g/f)$ 服从泊松分布,由此得到的最大似然法被称为 Hunt 算法,由此得到的最大后验概率法被称为 L-R 算法。这两种方法是基于贝叶斯分析图像复原的典型算法。

2.2 马尔可夫随机场

1984年 Geman 等^[9]指出了马尔可夫随机场模型与吉布斯分布的等价性,并率先将其应用于图像复原中,取得了非常好的实验结果。被动式太赫兹图像中任一像素的灰度值基本只受其相邻像素灰度值影响,而受其较远像素灰度值影响较小,这个特性与马尔可夫随机场模型相吻合^[10]。选用马尔可夫随机场对被动式太赫兹图像进行复原,理论上有很好的复原结果。

记 $L = \{(i,j): 1 \leq i \leq N_1, 1 \leq j \leq N_2\}$ 表示一幅大小为 $N_1 \times N_2$ 的图像,随机变量 $f_{ij} \in L$ 用来表征 L 上的像素点 (i,j) 的状态。马尔可夫随机场

可以由以下三个定义描述：

定义一 邻域(neighborhood)

$\eta = \{\eta_{ij} : (i, j) \in L, \eta_{ij} \subseteq L\}$ 为 L 上的一个子集,且满足 1) $(i, j) \notin \eta_{ij}$, 2) 若 $(k, l) \in \eta_{ij}$, 则对于任意 $(i, j) \in L$, 满足 $(i, j) \in \eta_{kl}$ 。则可称 η_{ij} 为 (i, j) 的邻域。

通常, (i, j) 的邻域由欧氏距离定义。对所有邻域点 (a, b) 满足 $0 \leq (a - i)^2 + (b - j)^2 \leq d$, 称为点 (i, j) 的 d 阶邻域。

定义二 集簇(clique)

邻域系统上 (L, η) 的一个集簇 c , 是 L 上的一个子集, 需满足 1) c 至少包含单个像素, 2) 若 $(i, j) \neq (k, l), (i, j) \in c$ 且 $(k, l) \in c$ 意味着 $(i, j) \in \eta_{kl}$ 。由定义一和定义二, 一阶邻域系统 η^1 的集簇 c 如图 2 所示。

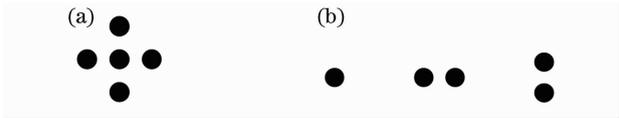


图 2 (a) 一阶邻域系统; (b) 一阶邻域系统的集簇

Fig. 2 (a) η^1 -neighborhood system; (b) clique types in η^1

定义三 马尔可夫随机场 (Markov random field)

F 是 L 上的一个关于邻域系统 η 的马尔可夫随机场, 随机场 F 是 L 上的吉布斯随机场或等价于具有吉布斯分布：

$$P(F = f) \propto \frac{1}{Z} \exp[-U(f)], \quad (6)$$

式中 Z 是归一化函数, $U(f)$ 称为能量函数, 可以写成与集簇 c 相关的势函数 $V_c(f)$ 之和的形式。

$$Z = \sum \exp[-U(f)], \quad (7)$$

$$U(f) = \sum_{c \in C} V_c(f). \quad (8)$$

本文采用二阶邻域系统, 且只考虑二阶邻域系统中如图 3 所示的 5 种结构的集簇, 其中 s, t, u, v 分别表示不同的像素点。

此时能量函数为

$$U(f) = \sum_c \varphi[D_c(F)/\gamma], \quad (9)$$

式中 $\varphi(d) = \varphi[D_c(F)/\gamma]$ 被称为惩罚函数, $D_c(F)$ 为差分, γ 为控制平滑度强弱的参数, 用于控制惩罚函数对图像边缘的惩罚能力^[11], 能量函数即集簇内所有惩罚函数之和。本文的惩罚函数采用可以很好地保持和增强图像线边缘信息的非线性 Geman 模型, 表达式为

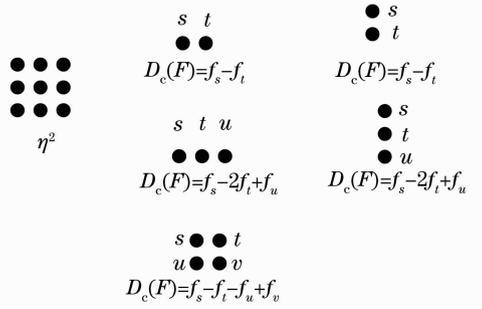


图 3 二阶邻域系统及其对应的集簇和差分 $D_c(F)$

Fig. 3 Neighborhood system η^2 and associated cliques and difference $D_c(F)$

$$\varphi(d) = \frac{(d/\gamma)^2}{1 + (d/\gamma)^2}. \quad (10)$$

2.3 基于马尔可夫约束的最大后验概率复原

假设似然函数 $P(g/f)$ 服从泊松分布, 同时假设图像 f 的先验概率不仅服从泊松分布而且服从马尔可夫分布。将(6)式代入(5)式, 并根据拉格朗日优化理论, 将其转化为无约束的最值问题, 可以得到基于马尔可夫随机场的最大后验概率复原 (MRF-MAP) 的迭代表达式为

$$\hat{f}_{n+1} = \hat{f}_n \exp \left\{ \left[\frac{g_{ij}}{(\hat{f}_n \otimes h)_{ij}} - 1 \right] \oplus h_{ij} - \alpha \frac{\partial}{\partial f} U(\hat{f}_n) \right\}, \quad (11)$$

式中 n 为迭代次数, α 为正则化参数, 用于调整马尔可夫惩罚函数所占比重, \otimes 为卷积运算符, \oplus 为相关运算符。

3 被动式太赫兹人体安检图像处理

被动式太赫兹成像的图像采集方法因使用探测器不同而有所差异。本文采用单点探测器结合光机扫描装置实现被动式太赫兹全反射成像^[12-13]。其

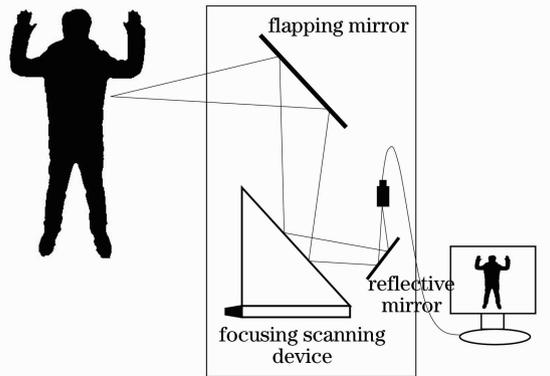


图 4 被动式太赫兹成像系统

Fig. 4 Passive terahertz imaging system

中光机扫描装置包括一个平面镜和一个装有椭球面镜的聚焦扫描器,二者旋转轴相互垂直以分别完成对成像区域的二维扫描,成像系统如图 4 所示。成像最佳距离为 1.7 m,成像范围为 1 m×2 m,目标分辨能力为 4 cm(0.1 THz)。受到系统衍射极限影响,得到的原始图像较模糊,而且含有大量背景辐射噪声、探测器随机噪声和扫描系统电磁噪声。

首先对系统得到的被动式太赫兹图像进行基本去噪和增强的预处理,采用两次自适应中值滤波加上半径为 3 的高斯低通频域滤波去噪和对比度线性拉伸进行图像增强,得到的图像如图 5 所示。

在图像复原中,使用半径为 7 的高斯型点扩散函数,采用基于马尔可夫的最大后验概率对预处理后的图像进行图像复原。图 6(a)、(b)是迭代次数为 6,正则化参数 α 分别为 0.17 和 0.37 的实验结

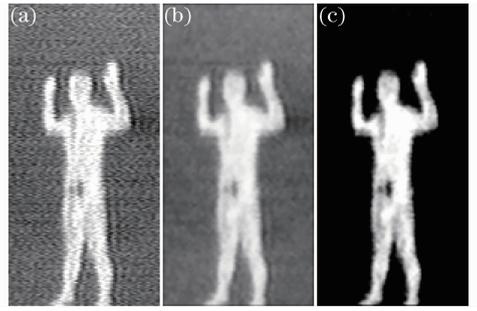


图 5 被动式太赫兹图像预处理。(a) 原始图像; (b) 去噪图像; (c) 增强图像

果,由结果图像可见, α 越大,图像边缘更加锐利,但当 α 过大时,图像边缘明显出现噪点。图 6(c)、(a)、(d)是正则化参数 α 为 0.17 时,迭代次数分别为 2 次、6 次和 20 次的实验结果。

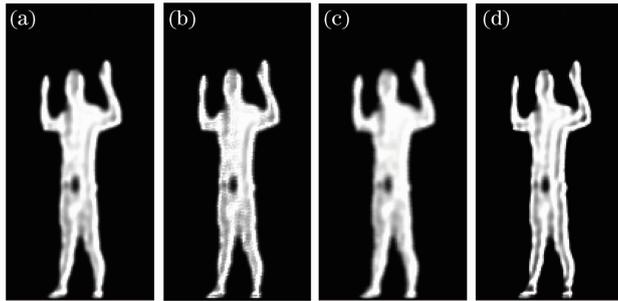


图 6 采用不同迭代次数和不同正则化参数的复原结果。(a) $\alpha=0.17$, 迭代 6 次结果; (b) $\alpha=0.37$, 迭代 6 次结果; (c) $\alpha=0.17$, 迭代 2 次结果; (d) $\alpha=0.17$, 迭代 20 次结果

Fig. 6 Restored images of different iterations and regularization parameters. (a) $\alpha=0.17$, 6 iterations; (b) $\alpha=0.37$, 6 iterations; (c) $\alpha=0.17$, 2 iterations; (d) $\alpha=0.17$, 20 iterations

采用均方根误差(MSE, f_{MSE})评价不同迭代次数的图像复原结果^[14],定义如下:

$$f_{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \overline{f(i, j)}]^2}{N_1 \times N_2}, \quad (12)$$

式中 $f(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的灰度值, $\overline{f(i, j)}$ 为图像所有像素点的平均灰度值。由此得到的 f_{MSE} 随迭代次数的变化曲线如图 7 所示,可见当迭代次数较少时,增大迭代次数图像中的噪声不断减小,所以图像的 f_{MSE} 也不断减小,但当迭代次数相对较大时,因图像开始大量出现冗余信息,图像的 f_{MSE} 迅速增大。

综合人眼主观观察和客观评价标准,采用正则化参数 α 为 0.17,迭代次数为 6 次的马尔可夫最大后验概率复原。为与常规的图像复原方法比较,图 8(a)、(b)、(c)分别给出了维纳滤波复原(Wiener)、最大似然复原、最大后验概率复原结果。对比马尔

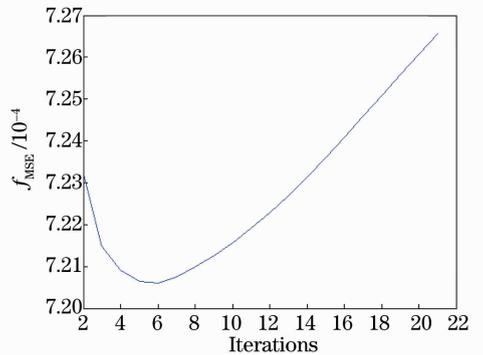


图 7 f_{MSE} 随迭代次数的变化曲线
Fig. 7 Curve of f_{MSE} with iterations

可夫复原图像和常规贝叶斯分析的图像,可见马尔可夫复原图像可有效分辨人体中间的目标和左侧的灰度较低的像素点,而常规贝叶斯分析的图像则基本无法分辨。图 8(d)~(i)给出了另外两幅被动式太赫兹图像不同处理方法的结果。

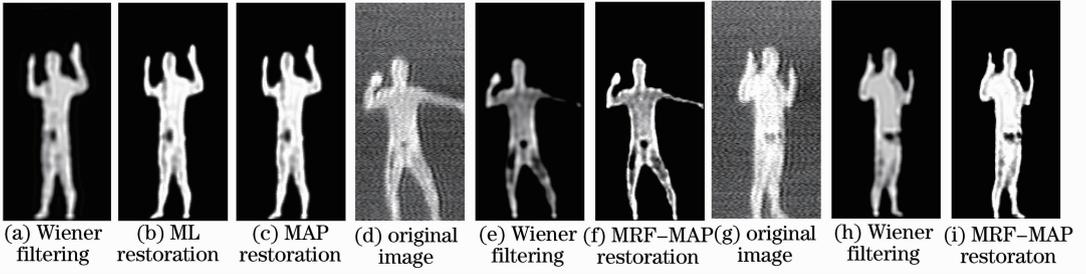


图 8 不同复原方法的复原结果

Fig. 8 Restoration results of different algorithms

4 图像处理效果评价

为了定量的评价复原图像的质量,采用边缘强度(f_{cv})、清晰度(f_{def})和信息熵(f_E)三种评价标准^[15],分别定义如下

$$f_{cv} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} |f \otimes La|}{N_1 \times N_2}, \quad (13)$$

$$f_{def} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1-1} \sum_{j=1}^{N_2-1} \sqrt{[f(i+1,j) - f(i,j)]^2 + [f(i,j+1) - f(i,j)]^2}}{N_1 \times N_2}, \quad (14)$$

$$f_E = - \sum_i p_i \lg(p_i), \quad (15)$$

式中 La 为拉普拉斯算子, p_i 为灰度值为 i 的像素数占图像总像素数的比例。边缘强度和清晰度都是基于灰度边缘描述图像的清晰程度的,其值越大,认为图像越清晰。信息熵则是用来描述图像中所包含的信息量的评价指标。采用这三种标准对图 8(a)、(b)、(c)和图 6(a)4 幅图像进行评价,结果如表 1 所示。

表 1 不同方法复原图像边缘强度、清晰度和熵

 Table 1 f_{cv} , f_{def} and f_E of restored images by different methods

	f_{cv}	f_{def}	f_E
Wiener	0.0651	0.0709	4.0375
ML	0.0807	0.0983	2.9031
MAP	0.0774	0.0887	2.9604
MRF-MAP	0.0809	0.0984	3.0246

可以看出,虽然维纳滤波的熵很高,但均方误差、边缘强度和清晰度很低,主要是因为复原图像产生了振铃效应。基于贝叶斯分析的图像复原效果好于维纳滤波,而基于马尔可夫约束的复原方法相较于最大似然概率和最大后验概率,均方误差、边缘强度和清晰度相差不多,但熵却有所提升,图像分辨能力更强。

5 结 论

介绍了一套被动式太赫兹扫描成像系统,对该系统采集的图像进行预处理后,采用贝叶斯分析和马尔可夫随机场结合的方法进行图像复原,并与维纳滤波算法和常规贝叶斯分析的图像复原算法进行对比。实验结果表明,经该算法处理后的复原图像相较于维纳滤波,边缘强度提升了 24%,相比较采用常规最大后验概率算法,清晰度提升了近 11%,且该算法可有效分辨人体中携带的目标和周围的噪声。采用预估点扩展函数的方法,在后续的研究中将通过实验标定系统的点扩展函数,再对图像进行复原,以期得到更好的处理效果。

参 考 文 献

- 1 Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- 2 Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui, et al.. Experiment on 2.52 THz transmission model imaging for concealed objects[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 221-224.
李琦,姚睿,丁胜晖,等. 遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 221-224.
- 3 Kowalskia M, Palkaa N, Piszczek M, et al.. THz-VIS passive imaging system for visualization of hidden threats[C]. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2013 38th International Conference on. IEEE, 2013. 1-2.
- 4 Zhang Jingshui, Zhu Weiwen, Zhao Yuejin, et al.. Passive THz

- imaging system based on crank-rocker mechanism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211006.
- 张镜水, 朱维文, 赵跃进, 等. 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211006.
- 5 Xu Limin, Fan Wenhui, Liu Jia. De-noising and enhancement for terahertz imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2865–2870.
- 徐利民, 范文慧, 刘 佳. 太赫兹图像的降噪和增强[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2865–2870.
- 6 Xie Yunyu, Hu Changhua, Shi Biao, *et al.*. Super-resolution image reconstruction and its application in terahertz images[J]. *System Simulation Technology*, 2013, (4): 306–309.
- 谢云宇, 胡昌华, 师 彪, 等. 超分辨率重建技术及其在太赫兹图像中的应用[J]. *系统仿真技术*, 2013, (4): 306–309.
- 7 Wang X, Wu J, Wang J, *et al.*. Super-resolution analysis for passive microwave images using FIPOCS[C]. *Fifth International Conference on Machine Vision (ICMV 12)*. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8783: 878305.
- 8 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.
- 9 Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distribution and Bayesian restoration of images[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1984, 6(6): 721–741.
- 10 Li Q, Yin Q, Yao R, *et al.*. Continuous-wave THz image denoising based on Markov random field and simulated annealing algorithm [C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009*. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7385: 73850L.
- 11 Su Binghua, Jin Weiqi. Super-resolution image restoration algorithm based on Poisson-Markov model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 41–44.
- 苏秉华, 金伟其. 基于 Poisson-Markov 场的超分辨率图像复原算法[J]. *电子学报*, 2003, 31(1): 41–44.
- 12 Deng Chao, Zhang Cunlin, Zhang Liangliang, *et al.*. An All Reflective Scanning Device for Imaging: CN, 103257369A[P]. 2013-04-01.
- 邓 朝, 张存林, 张亮亮, 等. 一种全反射式太赫兹波扫描成像装置: 中国, 103257369A[P]. 2013-04-01.
- 13 Deng Chao, Zhang Cunlin, Zhang Liangliang, *et al.*. A Scanning Device for Imaging: CN 103269411A[P]. 2013-08-28.
- 邓 朝, 张存林, 张亮亮, 等. 一种扫描成像装置: 中国, 103269411A[P]. 2013-08-28.
- 14 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on passive terahertz image target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211002.
- 张 馨, 赵源萌, 邓 朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211002.
- 15 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.

栏目编辑: 史 敏