

连续太赫兹波偏振成像检测

刘 影 赵国忠 申彦春

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 100048

摘要 研究了一种基于偏振特征的连续太赫兹(THz)波成像检测技术。实验采用相干公司 SIFIR-50 连续 THz 波激光器作为光源, 搭建 THz 实时偏振成像系统。根据目标透射光偏振特性的差异, 利用日本 NEC 公司 IRV-T0831C 型非制冷测微辐射热 THz 相机, 获取金属结构、货币水印和隐藏物体三类典型目标的 THz 波透射图像, 计算目标的斯托克斯参量图像和偏振图像, 分析了 THz 波偏振成像的检测特性。实验表明, THz 偏振成像技术既发挥了 THz 波无损成像的优势, 又能有效提高目标的识别效率, 使不同目标物体的成像差异最大化。

关键词 成像系统; 连续太赫兹波; 实时成像; 偏振成像; 目标检测

中图分类号 TB96

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0111001

Polarization Imaging Detection Based on the Continuous Terahertz Wave

Liu Ying Zhao Guozhong Shen Yanchun

Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, china

Abstract Polarization imaging detection based on continuous terahertz (THz) wave is studied. THz real-time polarization imaging system, which using the SIFIR-50 THz laser as radiation source and a NEC IRV-T0831C THz imager as array detector, is demonstrated. According to the polarization characteristics from transmitted light of the target, THz transmission images for three kinds of typical targets—metallic structures, watermark of cashes and hidden objects—are obtained using the uncooled microbolometer THz camera. The Stokes vector images and polarization images are calculated and analyzed. Experimental results show that THz polarization imaging not only have the advantage of THz noninvasive imaging, but can also improve the performance of target recognition effectively and maximize the differences between the images of different target objects.

Key words imaging systems; continuous terahertz wave; real-time imaging; polarization imaging; target detection

OCIS codes 110.6795; 110.2970; 110.3010

1 引 言

偏振成像技术是近十余年迅速发展的新型成像技术,其不仅可以利用被测物的强度信息,还可以利用被测物的偏振信息,提高了成像系统对目标物体的检测和识别能力^[1]。Vanderbilt等^[2]研究了可见光波段树叶的偏振反射特征,指出树叶的偏振反射数据包含了树叶表面和内部的结构信息。Wolff等^[3]分别研究了由玻璃和塑料材料制作的目标在中红外波段(3~5 μm)的偏振特性,结果表明目标的表面粗糙度是决定目标偏振特性的重要因素。Aron等^[4]分别对车辆和帐篷进行了野外偏振成像实验,研究表明利用偏振成像可以有效地消除背景噪声,提高图像对比度。类似很多基于偏振特性的成像检测实验^[5-7],可以像强度成像一样对物体进行表征和识别。

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(50971094, 61171051)、北京市自然科学基金和北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201310028032)

作者简介: 刘 影(1989—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: swan201161@126.com

导师简介: 赵国忠(1964—),男,博士,教授,主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学等方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn(通信联系人)

太赫兹(THz)辐射是频率在0.1 THz~10 THz区间内的远红外电磁辐射,THz成像因其较低的光子能量便于实现无损检测,同时能够穿透对大多数可见光和红外线不透明的非金属和非极性物质(如纸张、衣物和聚乙烯等)进行隐藏物的探测,在无损检测、医学检查、安全检测、环境监测和空间遥感等方面具有广阔的应用前景。目前关于THz偏振成像的研究,主要基于脉冲THz时域系统。Valk等^[8]提出了一种光学探测方法,实现了对于THz偏振态的测量,利用探测晶体的探测特性,分别测量了两个偏振方向的THz时域信号,实现偏振成像。Zhang等^[9]利用石英晶体作为偏振敏感器件,通过其对两个THz偏振分量时间延迟的不同,进行偏振信息提取,并利用此方法测量了一种绝缘泡沫塑料的偏振特性。Doradla等^[10]利用连续THz波偏振成像技术进行结肠癌检测,通过正交偏振THz反射成像,对比显示了正常组织和癌变组织放射率的差异。相比于脉冲THz成像,CO₂激光抽运的连续波THz成像系统结构紧凑,输出较稳定,功率较高,成本较低,易于操作,具有较大的应用潜力^[11]。本文提出了一种基于偏振特征的目标识别成像技术。采用相干公司SIFIR-50连续THz激光器作为成像光源和NEC Terahertz Imager作为面阵探测器,搭建了THz偏振实时成像系统,以镂空金属板、人民币水印和装有钥匙的信件为目标采集偏振图像进行了实验研究。

2 偏振成像原理

偏振是光的三大特征之一,偏振光与目标发生相互作用后的透射光(散射光、反射光)中会包含由目标自身特性所决定的偏振信息,而这样的偏振信息与平时所探测到的光谱、光强以及相位等信息有所不同。不同物体或同种物体不同状态(粗糙程度、空气隙、含水量)可能产生不同的偏振状态,通过这些偏振信息也可以准确清晰地得到探测目标的相关信息^[12]。例如,根据反射光和透射光的偏振特性可以获取被测物体的表面粗糙程度和内部结构情况^[13],可以在粒子散射光干扰下清晰地获取水下图像等。这种探测物体光波偏振态的成像技术就是偏振成像。

偏振成像主要有三个部分组成:1)对景物光波的偏振态分解,从探测器的光强响应中解算出景物光波的偏振信息;2)在获取的景物光波偏振原始图像基础上,进行数字图像处理、增强和融合,最后可视化显示偏振图像;3)根据偏振图像提取目标特征^[14]。

通常描述光波偏振态的方法有琼斯矢量表示法和斯托克斯矢量表示法。与琼斯矢量不同的是,4个斯托克斯参量均是光强的时间平均值,具有强度的量纲,可以直接被探测器探测。由斯托克斯矢量运算的穆勒矩阵元素均为实数,运算也较简单,因此通常利用斯托克斯矢量来描述光波的偏振态^[15]:

$$\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T, \quad (1)$$

$$I = \langle E_x E_x^* + E_y E_y^* \rangle, Q = \langle E_x E_x^* - E_y E_y^* \rangle \quad (2)$$

$$U = \langle E_x E_y^* + E_y E_x^* \rangle, V = i \langle E_x E_y^* - E_y E_x^* \rangle$$

式中 $E(t) = E_x(t) + E_y(t)$, I 表示总光强, Q 表示0°与90°方向上的线偏振分量, U 表示45°与135°方向上的线偏振分量, V 表示与左旋、右旋有关的圆偏振分量。在偏振成像探测中,圆偏振分量 V 在仪器可以检测的范围内很小,可以近似认为 $V=0$ 。偏振元器件等光学介质使入射光的偏振参量发生改变,可以用穆勒矩阵来描述该过程。出射光的斯托克斯参量和入射光的斯托克斯参量满足关系式:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M} \mathbf{S}_{in}. \quad (3)$$

对于理想的线偏振器,透振方向与参考方向(X 轴正方向)成 θ 方位角,其穆勒矩阵表示式如下:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在实验探测中采用直接旋转线栅偏振片的方式来测量不同偏振方向的THz偏振强度图像^[16]。利用THz金属线栅偏振的穆勒矩阵,将(4)式代入(3)式,得:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad (5)$$

从而,得到下式:

$$\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta \\ I \cos 2\theta + Q \cos^2 2\theta + U \sin 2\theta \cos 2\theta \\ I \sin 2\theta + Q \sin 2\theta \cos 2\theta + U \sin^2 2\theta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $(I' \ Q' \ U' \ V')^T$ 和 $(I \ Q \ U \ V)^T$ 分别表示偏振片出射光和入射光的斯托克斯矢量;那么,从探测器的输出中得到的光强响应和入射光斯托克斯参量之间的关系:

$$I' = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta). \quad (7)$$

偏振态的表征还可以用偏振度 P 和偏振角 A 来描述:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} (V=0), \quad (8)$$

$$A = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right), \quad (9)$$

式中偏振度 P 是一个从 0 到 1 的无量纲数, $P=0$ 表示非偏振光, $P=1$ 表示完全线偏振光, $0 < P < 1$ 表示部分偏振光, 偏振角 A 表示光波偏振方向与参考方向(X 轴正方向)的夹角, 对于部分偏振光, 则是振幅较大的振动方向与参考方向的夹角。

在此,借助于 Matlab 软件的图像处理工具,解算出物光波的两个斯托克斯参量图,并可进一步解算出物光波偏振度 P 和偏振角 A 参量图。

3 THz 偏振成像实验

在搭建的 THz 偏振成像系统中,采用美国相干公司的 SIFIR-50 THz 激光器,这种 CO₂ 激光抽运 THz 激光器,结构紧凑,输出功率较高且相对稳定。实验中选择输出频率为 3.11 THz,较其他频率,此频率处激光器的输出功率相对稳定,输出功率约为 30 mW,光斑呈高斯分布。采用非制冷型测微辐射热 THz 相机 (IRV-T0831C, NEC) 作为面阵探测器,焦平面探测器像元数为 320 pixel×240 pixel,像元间距为 23.5 μm,工作频率范围为 1 THz~7 THz。偏振成像技术可分为时序探测和同步探测两种模式,本文在获取不同方向的偏振图像时采用时序探测模式,依次旋转 THz 金属线栅偏振片,分别在 0°、45°、90° 和 135° 4 个不同的方向,拍摄 4 幅不同偏振方向的强度图。偏振信息的提取是利用计算机基于 MatLab 软件从 4 幅强度图解算出斯托克斯参量图、偏振度图和偏振角图像。

图 1 是 THz 实时偏振成像系统的示意图。波长为 96.5 μm(即频率为 3.11 THz)的连续 THz 波经过金属线栅偏振片 P1 滤除杂散光;通过调节偏振片的偏振方向,判定出射光为垂直偏振的线偏振光,本文取平行于实验台为参考方向;再经由 90° 反射的离轴抛物面镜 M1 聚焦,由 90° 离轴抛物面镜 M2 扩束为平行光束, M2 的焦点与 M1 共焦,使得成像光束经过离轴抛物面镜 M2 扩束准直;样品置于平行光束中的位置可以随意调整,

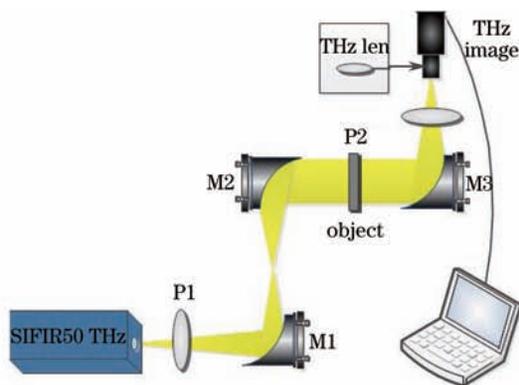


图 1 THz 实时偏振成像实验装置示意图

Fig.1 Schematic of THz real-time polarization imaging setup

对成像质量不会产生较大影响;最后由90°离轴抛物面镜M3聚焦,并经过检偏器P2,在THz相机的焦平面上成像;值得注意的是,这款THz相机自带有一个焦距为28.2 mm的锗透镜。采用90°离轴抛物面镜在理论上可以消除球差的影响^[17],得到高质量的光斑,但是调整难度大,对光轴失准的敏感度高,细微的偏差会引发像散,应尽量做到精密调节,从探测器中观察成像质量,最大程度地避免光轴失准。旋转偏振片P2从不同的方向获取THz强度图像,THz相机焦平面处采集到的成像光斑如图2所示;像平面功率为4.53 mW左右,由于高斯光束强度分布不均匀,边缘和中心存在差异,中心强度相对较高,边缘有一定的衍射条纹,这是由成像系统的元件孔径造成的。

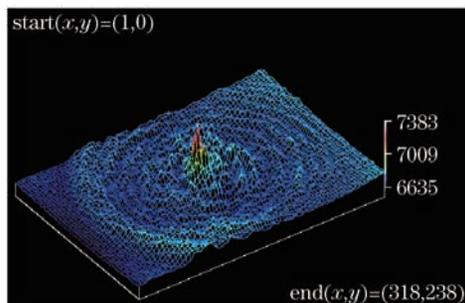


图2 THz相机焦平面处的光斑轮廓

Fig.2 THz beam spot image captured by THz imager

4 实验结果与分析讨论

为了说明基于此方法搭建的上述实验系统的成像性能,对以下三类物品进行成像,其可见光照片如图3所示。图3(a)是镂空十字金属板,其中十字尺寸大小为20 mm×20 mm,缝隙宽度为2 mm;图3(b)是100元人民币,成像区域为黄色矩形方框标注的水印“100”;图3(c)是即将隐藏在信封内的钥匙。



图3 实验样品照片。(a) 镂空十字金属板;(b) 人民币水印“100”;(c) 隐藏物钥匙(将装在信封中)

Fig.3 Photos of the experimental samples. (a) Hollow-out metal plate; (b) watermark “100” RMB; (c) key hidden in the envelope

对镂空十字金属板进行THz成像实验,依次旋转THz金属线栅偏振片P2,使其透过方向与参考方向夹角分别为0°、45°、90°和135°,利用面阵THz探测器拍摄4幅不同偏振方向的强度图,如图4所示。由于十字狭缝宽度接近THz波长,可以看出存在衍射现象。

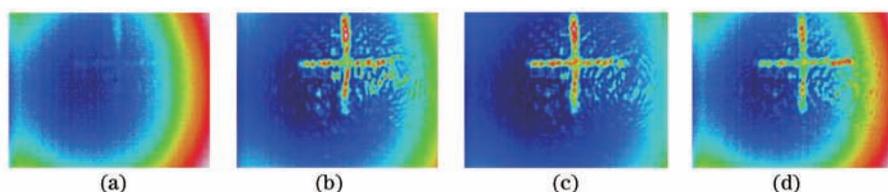


图4 不同偏振方向的镂空十字金属板强度图。(a) 0°;(b) 45°;(c) 90°;(d) 135°

Fig.4 THz intensity images of the hollow-out metal plate at different polarization directions. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

根据(7)式可解算出入射物光波斯托克斯参量 I 、 Q 和 U 的图像,如图5所示, I 参量代表强度信息, Q 参量和 U 参量包含由两个相互正交的偏振分量之差得到的差分图像,蕴含了目标景物的偏振信息。可以看出,背景光强得到明显抑制,图像灰度分布更为均匀。

再按照(8)式和(9)式,利用斯托克斯参量 I 、 Q 和 U 图像解算出线偏振度 P 和偏振角 A 的图像,如图6所示。另外,可根据需要将其分别与强度图进行融合^[18-19],结果表明融合后的图像可视性好,既包括目标强度



图5 镂空十字金属板的斯托克斯参量(a) I 、(b) Q 和(c) U 的THz图像

Fig.5 THz image of Stokes vector (a) I , (b) Q and (c) U of the hollow-out metal plate

信息也包含强度图中表征不出来的目标偏振信息,有效地抑制了背景噪声的干扰,提高了目标与背景的对比度。

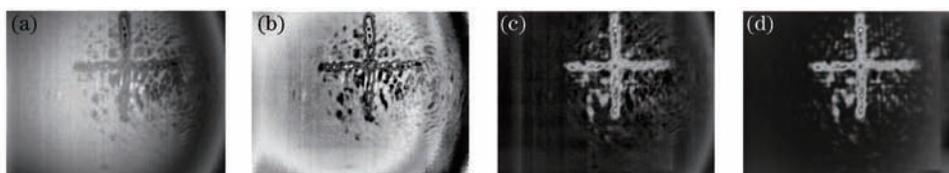


图6 镂空十字金属板线的(a)偏振度 P 、(b) 偏振角 A 、(c) P 和强度以及(d) A 和强度融合图

Fig.6 THz images of (a) linear polarization degree P , (b) linear polarization azimuth A and fusion image of (c) P and its intensity and (d) A and its intensity

同样地,对100元人民币的水印“100”部分进行THz偏振成像,结果如图7所示,由于水印的明暗是由纸钞内的纤维含量所决定的,所以对对比度相对不高。此时激光输出功率22.5 mW,采集到的原始图如图7所示,背景噪声较大。

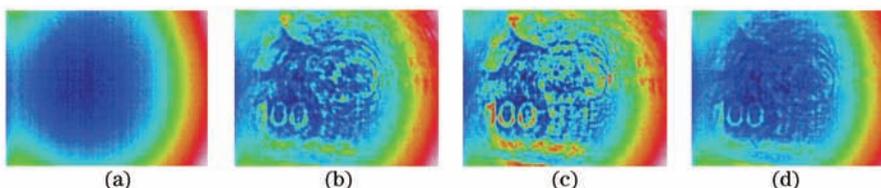


图7 不同偏振方向的人民币水印“100”强度图。(a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135°

Fig.7 THz intensity images of the watermark "100" RMB at different polarization directions. (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135°

类似于上述同样的解算过程,获取斯托克斯参量 I 、 Q 和 U 的图像,如图8所示。进而解算出线偏振度 P 和偏振角 A 的图像,如图9所示。实验结果表明,对于隐藏水印,偏振角 A 成像较偏振度 P 成像更能凸显目标。由于人民币表面对THz波的散射,偏振图像噪声较大,与强度图融合的效果差异不是很明显。

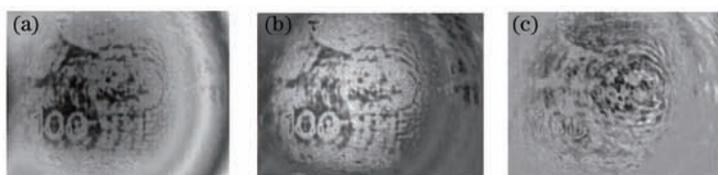


图8 人民币水印的斯托克斯参量(a) I 、(b) Q 和(c) U 的THz图像

Fig.8 THz image of Stokes vector (a) I , (b) Q and (c) U of the watermark "100" RMB

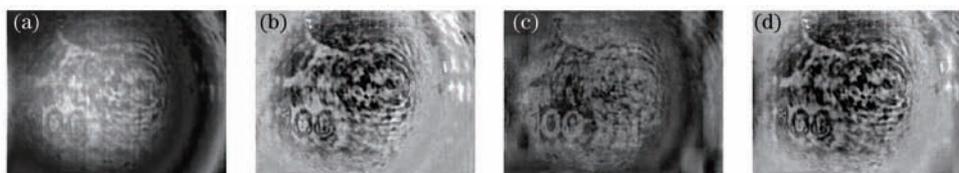


图9 人民币水印的(a) 偏振度 P 、(b) 偏振角 A 、(c) P 和强度以及(d) A 和强度的THz融合图

Fig.9 THz images of (a) linear polarization degree P , (b) linear polarization azimuth A and fusion image of (c) P and its intensity and (d) A and its intensity of the watermark "100" RMB

最后,对隐藏在信封中的钥匙进行THz偏振成像,图10给出了隔双层牛皮纸信封隐藏起来的钥匙在不同偏振方向的THz波图像,可见THz波能够穿透信封,可以清晰地对其中的隐藏物品成像。这里的钥匙内环

直径为 0.5 mm, THz 光源波长 $\lambda=96.5 \mu\text{m}$, 仍有衍射效应存在, 所以内环图像有些失真。虽然牛皮纸信封造成能量衰减而引入噪声影响了成像质量, 然而目标轮廓依然可见。

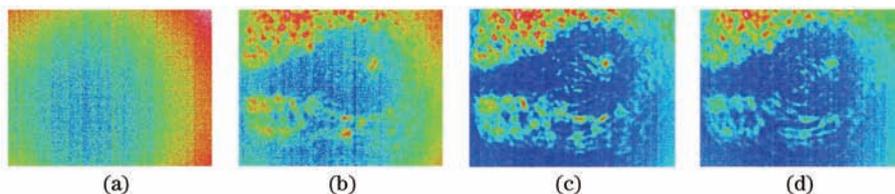


图 10 不同偏振方向装在信封中的隐藏物钥匙的 THz 强度图。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

Fig.10 THz intensity images of the key hidden in the envelope at different polarization directions. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135°

同样可以得出斯托克斯参量 I 、 Q 和 U 的灰度图像, 如图 11 所示。进而解算出线偏振度 P 和偏振角 A 的图像, 如图 12 所示。通过与强度图像对比, 结果显示偏振成像有效地滤除了杂乱背景散射光的影响, 明显提高了目标成像的对比度。由于噪声较大, 融合效果不好, 这里已省略。



图 11 装在信封中的隐藏物钥匙的斯托克斯参量(a) I 、(b) Q 和(c) U 的 THz 图像

Fig.11 THz image of Stokes vector (a) I , (b) Q and (c) U of the key hidden in the envelope



图 12 装在信封中的隐藏物钥匙的(a) 偏振度 P 和(b) 偏振角 A 的 THz 图像

Fig.12 THz images of (a) linear polarization degree P and (b) linear polarization azimuth A of the key hidden in the envelope

线偏振度 P 表示透过物体后出射光偏振性的大小, 是偏振成像检测的一个本质特性, 上述所有灰度图中灰度分布表征其偏振度的大小。偏振度反映了物体结构、轮廓、材料和粗糙度等性质, 能为目标的探测识别提供有效依据。偏振角 A 表示光波偏振方向与参考方向的夹角, 与物体表面及固有特性直接相关, 是偏振成像探测的一个重要信息。与线偏振度 P 图相比, 偏振角 A 图对噪声敏感, 更容易受到噪声影响。

5 结 论

研究了基于连续 THz 波激光器和面阵 THz 探测器进行实时偏振成像的检测技术。根据目标透射光偏振特性的差异, 利用面阵探测器分别对三类典型成像物体进行偏振成像, 结果表明: 基于斯托克斯-穆勒公式的偏振成像方法得到的偏振图像能够有效地滤除杂乱背景散射光的影响, 明显提高目标成像的对比度。偏振成像作为强度成像的有力补充, 能够消除噪声, 提高目标识别效率, 但由于实验中使用 90° 离轴抛物面镜聚焦、准直, 对光轴失准的灵敏度极高, 光路还需要进一步优化, 寻找最佳的子午像面, 才能获得更好的实验结果; 另外, 也可以将偏振图像和强度图像根据需要进行图像融合。总之, THz 偏振成像技术既发挥了 THz 无损成像的优势, 又可有效地提高目标识别效率, 使不同目标物体的成像差异最大化。

参 考 文 献

- 1 Sparks W, Germer T, Mackenty J, *et al.*. Compact and robust method for full Stokes spectropolarimetry[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5495-5511.
- 2 Vanderbilt V C, Grant L, Daughtry C S T. Polarization of light scattered by vegetation[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(6): 1012-1024.
- 3 Wolff L B, Lundberg A, Tang R. Image understanding from thermal emission polarization[C]. IEEE Computer Society Conference on

- Computer Vision and Pattern Recognition, 1998: 625–631.
- 4 Aron Y, Gronau Y. Polarization in the LWIR—a method to improve target acquisition[C]. SPIE, 2005, 5783: 653–661.
- 5 Chen Weili, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.*. Experiment of target detection based on medium infrared polarization imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 7–11.
陈伟力, 王霞, 金伟其, 等. 采用中波红外偏振成像的目标探测实验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 7–11.
- 6 Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin, *et al.*. Experimental study on polarization characteristic of man-made object[J]. High Technology Letters, 2003, 13(8): 23–27.
孙晓兵, 乔延利, 洪津, 等. 人工目标偏振特征实验研究[J]. 高技术通讯, 2003, 13(8): 23–27.
- 7 Tang Kun, Zou Jiwei, Jiang Tao, *et al.*. IR polarization properties of a target and its background[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 611–614.
唐坤, 邹继伟, 姜涛, 等. 目标与背景的红外偏振特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 611–614.
- 8 Van Der Valk N C J, Van Der Marel W A M, Planken P. Terahertz polarization imaging[J]. Opt Lett, 2005, 30(20): 2802–2804.
- 9 Zhang L L, Zhong H, Deng C, *et al.*. Terahertz polarization imaging with birefringent materials[J]. Opt Commun, 2010, 283(24): 4993–4995.
- 10 Doradla P, Alavi K, Joseph C, *et al.*. Detection of colon cancer by continuous-wave terahertz polarization imaging technique[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(9): 090504.
- 11 Li Qi, Yao Rui, Yin Qiguo, *et al.*. Recent advance of CO₂-pumped THz imaging[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 151–155.
李琦, 姚睿, 尹奇国, 等. CO₂激光泵浦 THz 成像研究新进展[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 151–155.
- 12 Nie Jinsong, Wang Zhen. Summarize of infrared polarization imaging detection technology[J]. Infrared Technology, 2006, 28(2): 63–67.
聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 63–67.
- 13 Michel T, Laurent B, Marie A B. Contribution of polarimetric imaging for the characterization of fibrous surface properties at different scales[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(1): 75–82.
- 14 Xu Canjun, Zhao Jinsong, Cai Yi, *et al.*. Several schemes of infrared polarization imaging technology[J]. Infrared Technology, 2009, 31(5): 262–266.
徐参军, 赵劲松, 蔡毅, 等. 红外偏振成像的几种技术方案[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 262–266.
- 15 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- 16 Sun Wei, Liu Zhengkai, Shan Lie. Manmade objects recognition with polarization information[J]. Optical Technology, 2004, 30(3): 267–269.
孙玮, 刘政凯, 单列. 利用偏振技术识别人造目标[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 267–269.
- 17 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 682–687.
罗曦, 陈培锋, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 682–687.
- 18 Qiao Yulong, Zhao Yuanmeng, Zhang Cunlin, *et al.*. Terahertz/visible dual-band image registration based on hybrid Powell algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211005.
乔玉龙, 赵源萌, 张存林, 等. 基于混合 Powell 法的太赫兹/可见光双波段图像配准[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211005.
- 19 Li Qi, Yang Yongfa. Comparisons of restoration algorithm for terahertz confocal scanning image[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s111005.
李琦, 杨永发. 太赫兹共焦扫描图像复原算法比较[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s111005.

栏目编辑: 张浩佳