

## 激光与光电子学进展

## 用于被动太赫兹成像检测的多极化图像评估

程亚运, 田迅, 王楠楠\*, 祁嘉然, 邱景辉

哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 因安全隐蔽性和衣物穿透性等特点,被动太赫兹成像已用于关键场所的人体安检。多极化成像可丰富信息维度,提升系统性能。针对极化模式难以选择和多极化图像特性尚不明确等问题,全面评估用于被动太赫兹成像检测的多极化图像质量。首先,分析人体和隐匿物品的任意极化太赫兹辐射亮温模型;然后,通过成像实验和仿真模拟获得 4 个线极化图像,并计算分析 6 个极化参数图像;接着,利用传统全局无参考评价指标对比分析多极化图像;最后,采用受试者工作特征(ROC)曲线和差异信噪比(DSNR)定量评估用于检测的局部图像质量,并通过观察者主观评价统计实验验证了若干全局和局部指标的合理性。结果表明,合理选择极化并融合多极化对提升成像检测性能具有重要意义。

**关键词** 太赫兹成像; 被动遥感; 极化; 人体安检; 图像评估

中图分类号 TP753;TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231304

## Multipolarization Image Evaluation for Passive Terahertz Imaging Detection

Cheng Yayun, Tian Xun, Wang Nannan\*, Qi Jiaran, Qiu Jinghui

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

**Abstract** Passive terahertz imaging has been utilized in strategic locations for personnel security screening owing to its safety concealment and clothing penetration. Multipolarization imaging can increase the information dimension and enhance the system's performance. In this study, we comprehensively evaluate multipolarization image quality for passive terahertz imaging detection considering the challenges in selecting the polarization mode and the unclear characteristics of multipolarization images. First, a terahertz radiation brightness temperature model of the human body and hidden objects with arbitrary polarization was examined. Then, four linear polarization images were obtained using the polarization adjustable imaging system, and six polarization parameter images were computed and analyzed. Furthermore, multipolarization images were compared using the traditional global no-reference evaluation indexes. Finally, the receiver operating characteristic (ROC) curve and differential signal-to-noise ratio (DSNR) were employed to quantitatively estimate the local image quality used for detection. Observer subjective evaluation statistical tests were also conducted to confirm the reasonability of some global and local indexes. The results show the importance of reasonable polarization selection and multipolarization fusion in improving imaging detection performance.

**Key words** terahertz imaging; passive remote sensing; polarization; personnel security inspection; image assessment

## 1 引言

被动太赫兹成像具有全天时、准全天候、安全隐蔽性和衣物穿透能力等特点,已用于射电天文、对地遥感、目标探测和人体安检等多个领域<sup>[1-2]</sup>。近年来,许多高校和科研院所研制了被动太赫兹人体安检成像系

统,通过在关键场所进行大量试用,验证了该技术对人体携带违禁品检查的可行性和应用潜力<sup>[3-5]</sup>。被动太赫兹人体安检成像系统发展迅速,然而,实际试用中检测的准确率和漏检率离预期仍然有一定差距。

为了从丰富信息维度方面提升性能,多极化成像方法受到关注。除了频率、相位、能量等本质特征,极

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-06-13; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-07-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金资助项目(YQ2023F007)、黑龙江省博士后科研启动金资助项目(LBH-Q21093)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(FRFCU5710052821)、国家自然科学基金(61901242)

通信作者: \*wangnn@hit.edu.cn

化是电磁波的另一个重要特征,表现为电场矢量末端随时间的变化轨迹。太赫兹辐射在人体和隐匿物品表面发生透射或反射时会使极化特性发生变化,因此电磁波在透射场和反射场的极化特性蕴含着分界面的物理信息(如介电特性、粗糙度、几何结构等)。极化测量在海冰分布和海面风场的微波遥感领域已有大量研究<sup>[6-7]</sup>。然而,目前用于成像检测的被动太赫兹成像系统一般是单一极化模式,多极化成像仍然处于探索阶段。例如, Kim 等<sup>[8]</sup>采用线极化求和成像提高用于目标识别的被动图像质量。Su 等<sup>[9]</sup>分析了海面 and 大气辐射特性,分析了双极化被动成像辐射计的船舶探测特性。Cheng 等<sup>[10]</sup>分析了多极化求和图像性能,提出了利用双极化特征和显著性信息的地面倒影干扰去除方法。Bernacki 等<sup>[11]</sup>通过多极化成像获得了室外场景斯托克斯极化参量图像,分析了不同极化参量图像的地面轨迹成像性能。上述研究工作证明了多极化成像在提升目标检测和识别能力方面具有巨大的潜力。

面向人体安检应用,被动太赫兹多极化成像已有一些探索性研究工作。为了解决极化模式难以选择和多极化图像特性尚不明确等问题,本文基于多种客观和主观评价指标,全面评估分析了被动太赫兹人体安检成像的多极化图像质量。采用极化可调成像系统获得了 4 个线极化图像,并计算分析了 6 个极化参数图像。利用传统全局无参考图像评价指标对比分析了多极化图像,并采用受试者工作特征(ROC)曲线和差异信噪比(DSNR)定量评估用于检测的局部图像质量,通过观察者主观局部评价统计实验验证了若干全局和局部评价指标的合理性。研究结果为多极化成像用于提升成像检测能力提供理论指导。

## 2 太赫兹辐射极化亮温模型

太赫兹辐射是普朗克黑体辐射,满足普朗克黑体辐射定律,与微波辐射类似,采用亮温衡量物质自发的太赫兹波能量大小。对于不透明或半无限物体的光滑表面,亮温由该物质自发辐射和环境辐射在其上的反

射组成,任一线极化太赫兹辐射亮温可表示为

$$T_{Ba} = e_a \cdot T_0 + (1 - e_a) \cdot T_{Binc}, \quad (1)$$

式中: $e_a$ 为等效发射率; $\alpha$ 为线极化角; $T_0$ 为物理温度; $T_{Binc}$ 为环境辐射亮温。

对于室内成像, $T_{Binc}$ 来自于墙面、地板和各种室内物品间的大量反射/散射,在大型室内腔体结构中最终形成一个平衡状态。因此,室内环境的  $T_{Binc}$  可以被认为是一个恒定亮温值,近似等于室内环境的物理温度。考虑人体安检实际场景,检测对象是穿着衣物的人体和隐藏在衣物下面的违禁物品,人体和物品的太赫兹辐射均经过衣物的衰减后才被辐射计观测,对于某些有一定透射性的物品,物品亮温还包含人体辐射经过物品和衣物衰减后的部分。到达观测系统天线口面前,人体皮肤和隐匿物品的视在亮温可分别表示为

$$T_A^{hum} = (e^{hum} T_0^{hum} + r^{hum} T_{Binc}^{hum}) t^{clo} + e^{clo} T_0^{clo} + r^{clo} T_{Binc}^{sur}, \quad (2)$$

$$T_A^{obj} = (e^{obj} T_0^{obj} + r^{obj} T_{Binc}^{obj}) t^{clo} + e^{clo} T_0^{clo} + r^{clo} T_{Binc}^{sur}, \quad (3)$$

式中: $e^{hum}$ 和 $r^{hum}$ 分别为人体皮肤发射率和反射率; $e^{obj}$ 和 $r^{obj}$ 分别为物品发射率和反射率; $e^{clo}$ 、 $r^{clo}$ 和 $t^{clo}$ 分别为衣物的发射率、反射率和透射率; $T_0^{hum}$ 、 $T_0^{obj}$ 和 $T_0^{clo}$ 分别为人体皮肤、物品和衣物的物理温度; $T_{Binc}^{sur}$ 为成像场景环境亮温。

一般地,室内亮温基本认为是均匀的, $T_{Binc}^{hum}$ (或 $T_{Binc}^{obj}$ )为环境亮温 $T_{Binc}^{sur}$ 经过衣服衰减入射到人体皮肤(或物品)的亮温,该亮温还包含人体亮温(或物品)在衣物上反射回来的部分和衣物自身辐射部分。图 1 给出了人体皮肤、陶瓷和钢材的发射率和亮温特性。由图 1 可知:人体皮肤和陶瓷的发射率差异很小,较大入射角( $60^\circ \sim 80^\circ$ )对应的水平和垂直极化发射率差异很大;钢材的水平和垂直极化发射率均接近于 0,说明钢材几乎没有自发辐射,主要反射环境辐射;人体皮肤的物理温度通常高于隐匿物品,且发射率也高于钢材,导致人体皮肤亮温明显高于钢材;对于大多数非金属物品(如陶瓷、汽油、酒精等),尽管人体皮肤发射率可能更小,但物理温度的优势仍起主要作用,因此人体皮肤

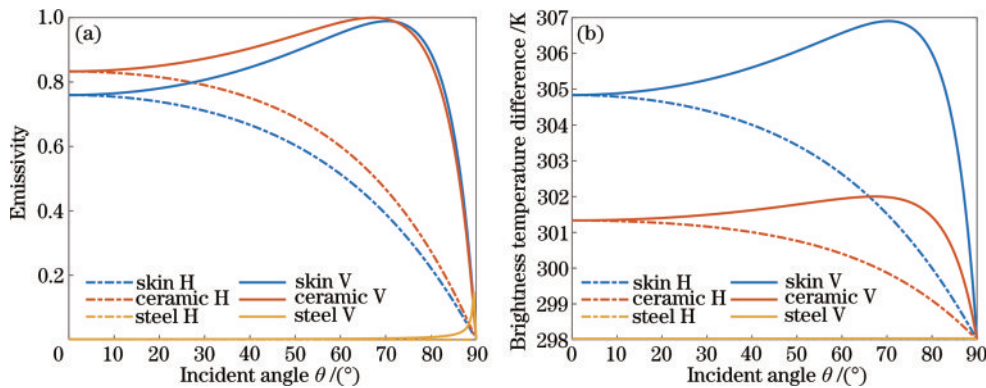


图 1 典型材质的发射率和亮温特性,H和V分别表示水平和垂直极化。(a) 发射率;(b) 亮温

Fig. 1 Emissivity and brightness temperature properties of typical materials, H and V represent horizontal polarization and vertical polarization, respectively. (a) Emissivity; (b) brightness temperature

亮温也高于非金属隐匿物品。通过感知这种亮温差异,被动太赫兹成像可实现对人体携带隐匿违禁物品的有效检测。

### 3 多极化成像实验与仿真模拟

#### 3.1 实测实验成像参数

为了获取多极化图像,采用前期工作中研制的 W 波段被动太赫兹极化可调扫描成像系统<sup>[12]</sup>。该系统采用焦平面扫描成像体制,工作频段为 75~110 GHz(即带宽为 35 GHz),辐射计通道噪声系数优于 3.5 dB,积分时间 300  $\mu$ s 对应的辐射测量灵敏度优于 0.5 K。用于会聚毫米波的高密度聚乙烯介质透镜的直径为 460 mm,观测距离 2.5 m 对应的空间分辨率优于 2 cm。通过将辐射计连同馈源天线绕观测轴旋转,可实现不同线极化的观测成像。利用该系统在物理温度大约为 27  $^{\circ}$ C 的室内场景对携带隐匿物品的人体进行成像,获得 0 $^{\circ}$ 、45 $^{\circ}$ 、90 $^{\circ}$ 和 -45 $^{\circ}$ 四个不同角度的线极化

图像。本实验中,选择了金属刀、金属枪、纸币和袋装面粉 4 种隐匿物品,隐藏在待测人员的衣物中。

#### 3.2 实测实验成像结果

图 2(a)~(d)给出了被动太赫兹成像系统获得的 4 个线极化图。金属刀放置在人体胸部中央,金属枪放置在腰部右侧,纸币放置在腰部左侧,袋装面粉放置在大腿左侧。对于不同线极化图像,均可见 4 个隐匿物品与人体背景具有一定的亮温对比度,但局部对比度在不同极化图像中存在差异。根据图 1 中的变化规律,大入射角时(人体边缘附近面元符合该情形),不同线极化发射率和亮温差异较大。人体主要是柱状结构,边缘区域的大入射角特征导致存在较大极化差异。隐匿物品由于尺寸小且平面结构较多,太赫兹辐射传输到成像系统后极化差异较小。然而,人体是隐匿物品的背景,对于放置于人体边缘处的隐匿物品,人体背景的极化差异对目标检测有着重要影响。以人体头部为例,图 2(a)水平极化图中头部两侧区域亮温最高,

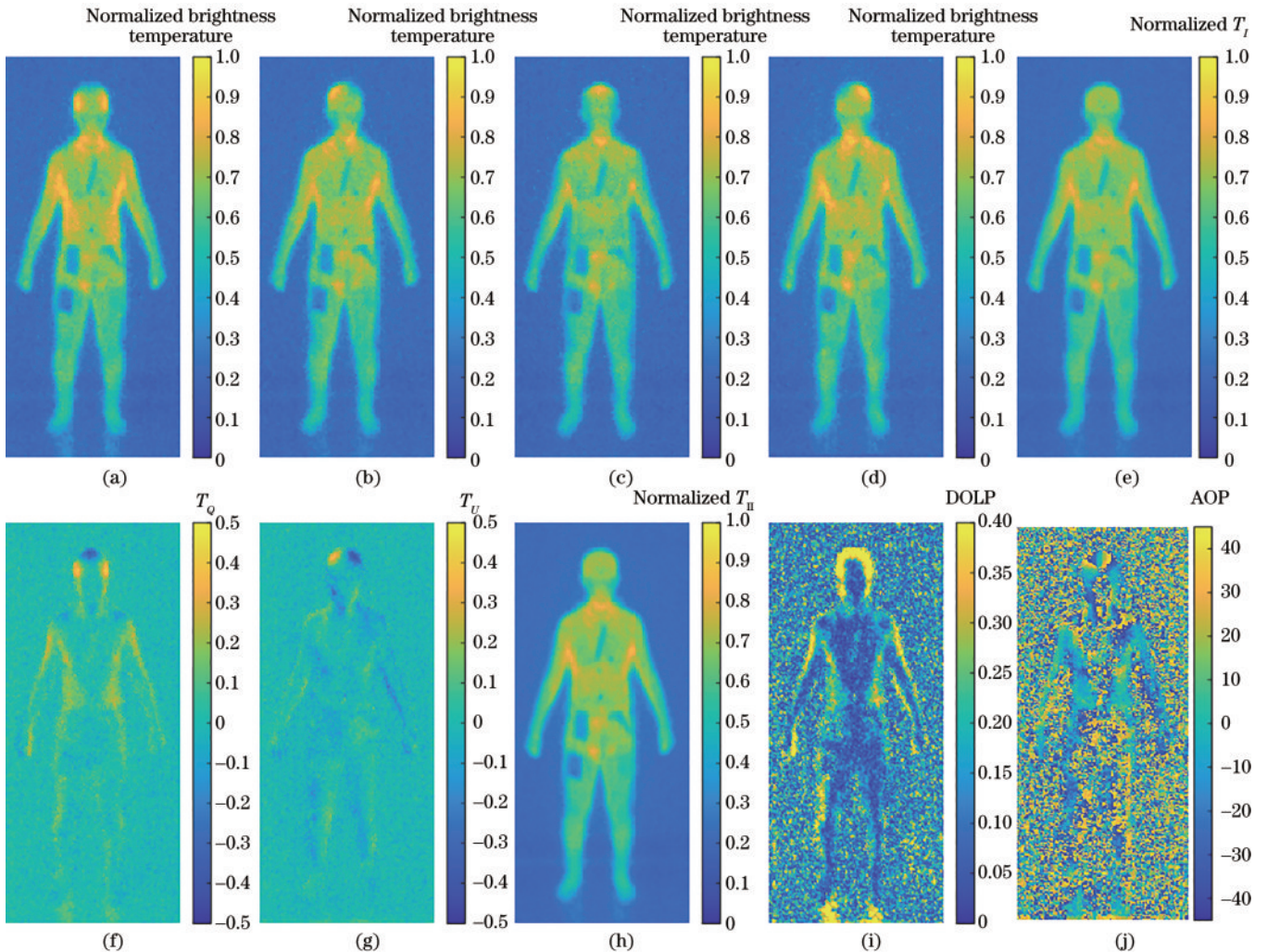


图 2 成像实验获得的 4 个线极化图和 6 个极化参数图。(a) 0 $^{\circ}$ ; (b) 45 $^{\circ}$ ; (c) 90 $^{\circ}$ ; (d) -45 $^{\circ}$ ; (e)  $T_I$ ; (f)  $T_Q$ ; (g)  $T_U$ ; (h)  $T_{II}$ ; (i) DOLP; (j) AOP

Fig. 2 Four linear polarization and six polarization parameter images from imaging experiment. (a) 0 $^{\circ}$ ; (b) 45 $^{\circ}$ ; (c) 90 $^{\circ}$ ; (d) -45 $^{\circ}$ ; (e)  $T_I$ ; (f)  $T_Q$ ; (g)  $T_U$ ; (h)  $T_{II}$ ; (i) DOLP; (j) AOP

图 2(c)垂直极化图中头顶区域亮温最高,图 2(b)45°线极化和图 2(d)-45°线极化图中则是在头部左右倾斜 45°区域亮温最高。以金属枪所在位置为例,水平极化图中金属枪局部对比度最大,垂直极化图中金属枪局部对比度最小。以金属刀为例,由于放置于胸部中央,人体和金属枪的极化差异均比较微弱,因此,不同线极化图中金属刀的局部对比度基本一致。

为进一步分析多极化特性,根据 4 个线极化图可计算极化参数图,如 Stokes 矢量参数、线极化平均( $T_{II}$ )、线极化度(DOLP)和极化角(AOP),计算式分别表示为

$$\begin{pmatrix} T_I \\ T_Q \\ T_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (T_{A0^\circ} + T_{A90^\circ})/2 \\ T_{A0^\circ} - T_{A90^\circ} \\ T_{A45^\circ} - T_{A-45^\circ} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$T_{II} = (T_{A0^\circ} + T_{A45^\circ} + T_{A90^\circ} + T_{A-45^\circ})/4, \quad (5)$$

$$D_{DOLP} = \sqrt{T_Q^2 + T_U^2} / (2 \cdot T_I), \quad (6)$$

$$D_{AOP} = \arctan(T_U/T_Q)/2, \quad (7)$$

式中: $T_{A0^\circ}$ 、 $T_{A45^\circ}$ 、 $T_{A90^\circ}$ 和 $T_{A-45^\circ}$ 分别表示 0°(水平)、45°、90°(垂直)和-45°四种线极化视在亮温; $T_I$ 、 $T_Q$ 和 $T_U$ 组成 Stokes 矢量的线极化元素。

图 2(e)~(j)为由 4 个线极化图计算获得的 $T_I$ 、 $T_Q$ 、 $T_U$ 、 $T_{II}$ 、DOLP 和 AOP 6 个极化参数图。图 2(e)为水平极化和垂直极化亮温平均图 $T_I$ ,图 2(h)为 4 个线极化亮温平均图 $T_{II}$ ,图 $T_I$ 和图 $T_{II}$ 比单一极化图具有更低的噪声水平,两者对不同线极化图中隐匿物品的对比度也起到了平均作用,隐匿物品的轮廓变得更为

清晰。图 2(f)和图 2(g)分别为水平与垂直极化亮温差异图 $T_Q$ 和±45°线极化亮温差异图 $T_U$ ,它们对存在大入射角的人体边缘区域比较敏感,但由于隐匿物品的极化差异非常小且实验中隐匿物品位置不够靠近人体边缘,故图 $T_Q$ 和图 $T_U$ 中的隐匿物品对比度很小,几乎不可见。图 2(i)为衡量线极化差异程度的线极化度 DOLP,人体边缘区域具有大入射角特点,故该区域的 DOLP 值较大,DOLP 突显了人体轮廓特征。图 2(j)为表征面元法向量方位的极化角 AOP,对于环境背景和垂直入射的人体表面,因无极化差异,导致 $T_Q$ 和 $T_U$ 均在 0 左右随机波动,使得式(5)AOP 计算值在值域 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 内大范围几乎均匀随机波动;对于斜入射的人体其他表面,面元法向量方位角具有一定数值,故 AOP 计算值会集中在该数据左右小范围随机波动。

### 3.3 仿真模拟成像结果

由于实测成像可能存在系统噪声不易估计和场景复杂性的问题,为了重点关注人体和隐匿物品的多极化太赫兹辐射特性,采用本课题组早期开发的被动太赫兹成像计算模拟仿真平台对典型室内人体安检场景进行多极化成像仿真模拟。表 1 给出了人体携带隐匿物品的被动太赫兹成像仿真模拟参数设置。隐匿物品处于人体皮肤和环境之间,故物理温度设置为中间值,根据实际测量,衣物内部物品的物理温度大约为 302 K。衣物对光的衰减量与材质、编制结构、厚度和温度等参数相关,为了简化,仿真中综合考虑一个典型值为 0.4 dB、厚度为 2.13 mm 的毛线衫对 94 GHz 电磁波的衰减量<sup>[13]</sup>。

表 1 人体携带隐匿物品的被动太赫兹成像仿真模拟参数设置

Table 1 Parameter setting of passive terahertz imaging simulation for hidden objects carried by human body

Parameter	Value	Parameter	Value
Center frequency /GHz	94	Skin physical temperature /K	307
Polarization mode /(°)	0, 45, 90, -45	Object physical temperature /K	302
3 dB beamwidth /(°)	0.4	Ambient physical temperature /K	298
Thermal sensitivity /K	0.5	Skin permittivity	7.1-j3.6
Observation distance /m	3	Ceramic permittivity	5.67-j0.0085
Pixel size	240×130	Clothing attenuation /dB	0.4

图 3(a)~(d)为由仿真平台获得的 4 个线极化图。人体衣物内放置了 5 个隐匿物品,其中,放置在人体肩部的物品是陶瓷柱,放置在人体左侧的物品是石刀,人体右侧的物品是木刀,放置在人体左大腿处的是塑料壳打火机,人体右大腿处是陶瓷枪。与实测成像实验结果类似,对于不同线极化图像,均可见 5 个隐匿物品与人体背景具有一定的亮温对比度,但局部对比度在不同线极化图像中存在差异。以人体肩部的陶瓷柱为例,图 3(a)水平极化图中的局部对比度明显小于图 3(b)45°线极化图和图 3(c)垂直极化图。以人体左侧的石刀为例,图 3(a)水平极化图中局部对比度最大,而图 3(c)垂直极化图中局部对比度最小,甚至形

状已不再清晰。

图 3(e)~(j)为由 4 个线极化图计算获得的 $T_I$ 、 $T_Q$ 、 $T_U$ 、 $T_{II}$ 、DOLP 和 AOP 6 个极化参数图。与实测成像实验结果类似,图 3(e) $T_I$ 和图 3(h) $T_{II}$ 两类极化平均图像中局部对比度也起到了对所有极化平均的作用,隐匿物品的轮廓变得更为清晰。正交极化差异主要体现在较大入射角的局部区域,故图 3(f) $T_Q$ 和图 3(g) $T_U$ 中的隐匿物品对比度很小,但人体边缘区域对比度较大,突显了人体边缘特征。图 3(i)中,人体边缘区域具有大入射角特点,故该区域的 DOLP 值较大,DOLP 突显了人体轮廓特征。图 3(j)中,对于环境背景和垂直入射的人体表面,AOP 计算值在值域 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 内几

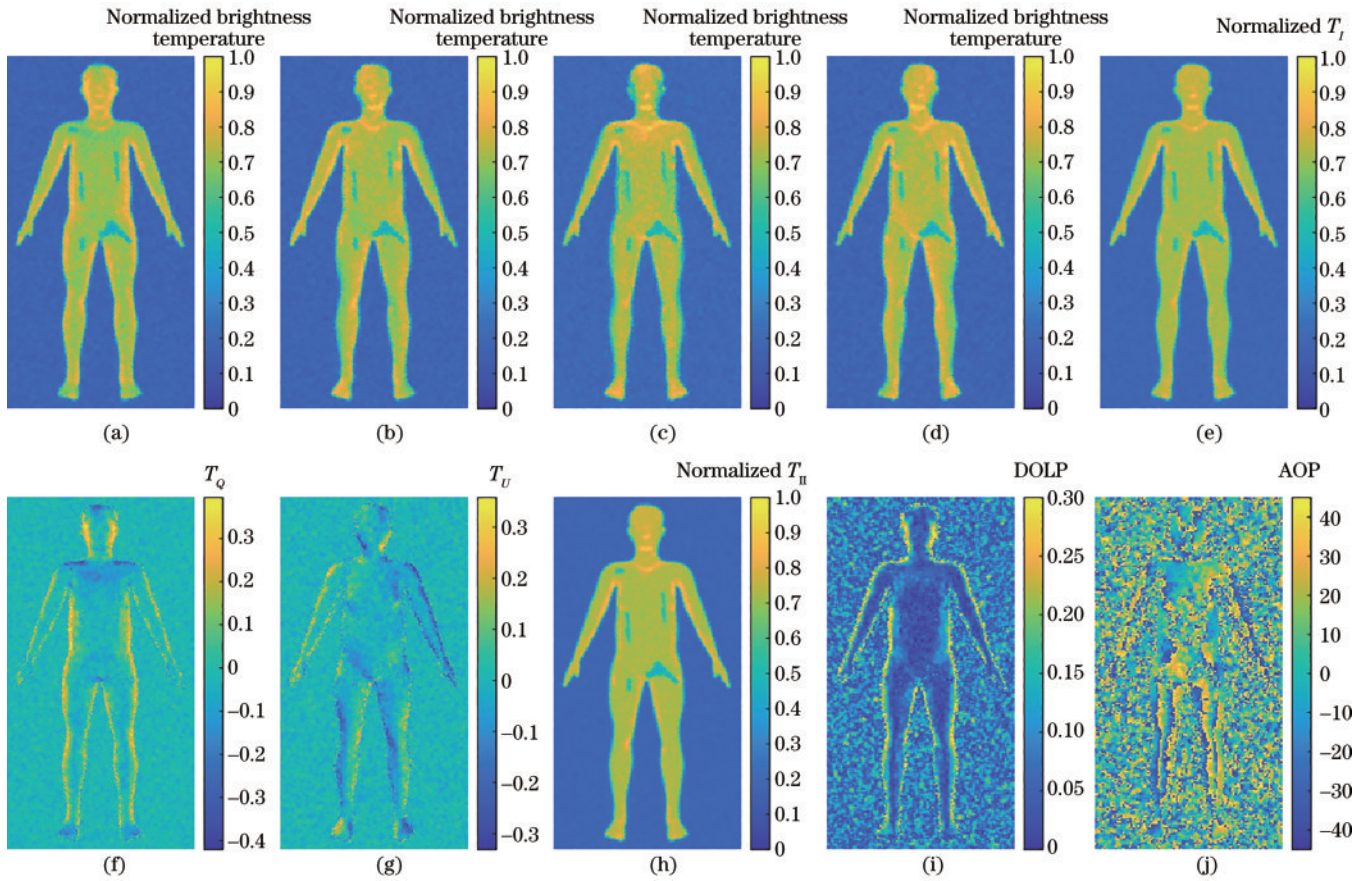


图 3 仿真模拟获得的 4 个线极化和 6 个极化参数图。(a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $-45^\circ$ ; (e)  $T_I$ ; (f)  $T_Q$ ; (g)  $T_U$ ; (h)  $T_V$ ; (i) DOLP; (j) AOP

Fig. 3 Four linear polarization and six polarization parameter images from imaging simulation. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $-45^\circ$ ; (e)  $T_I$ ; (f)  $T_Q$ ; (g)  $T_U$ ; (h)  $T_V$ ; (i) DOLP; (j) AOP

乎均匀随机波动;对于斜入射的人体其他表面, AOP 计算值集中在该数据左右小范围随机波动。

综上所述,图  $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 中人体背景局部特征较为突出,而隐匿物品特征很微弱。尽管这一现象表明这些图像不能直接用于目标检测,但由于目标检测是基于目标与背景对比度的,极化参数先验信息可指导多极化图像中人体背景局部特征信息融合,从而间接作用于目标检测。

#### 4 多极化图像质量评估

图像质量评估分为主观评价和客观评价。对于主观评价,通过人眼观察图像,由大脑直接对其进行主观评价,定性地反映出人眼视觉感受。对于客观评价,通过计算用于描述图像中某种物理特征的数学指标量,定量地衡量图像质量。前者对于不同人具有一定差异,因此需要大量数据进行统计分析;后者对指标量数学定义的合理性要求比较高,特定场景和性能导向应该需要特定的评价指标。本文先采用传统全局图像指标定量评估多极化图像,再利用受试者工作特征(ROC)曲线和差异信噪比(DSNR)两种局部评价指标对比不同多极化图像,最后通过观察者主观评价局部

图像质量验证了若干全局和局部评价指标的合理性。

##### 4.1 传统全局评价指标

传统全局图像质量客观评价通常分为无参考、全参考和部分参考这 3 种类型。由于实验测量时无法获取理想的参考图,因此,利用信息熵类、梯度类和频域类等若干无参考评价函数进行指标分析<sup>[14-17]</sup>。信息熵类为熵(Entropy)评价函数,反映了图像平均信息量,以信息论标准衡量图像中信息的多少,计算的 Entropy 越大,说明图像包含信息越多。梯度类函数包括平均梯度(MG)和拉普拉斯梯度(Laplacian),反映图像中纹理变换和细节反差,一定程度上能评判图像的清晰度,计算结果越大,代表图像越清晰。频域类的函数有离散傅里叶变换(DFT)和离散余弦变换(DCT)评价函数,反映的是图像清晰程度,计算结果越大,代表图像越清晰。此外,还计算了标准差(STD)、盲/无参考图像空间质量评估器(BRISQUE)、自然图像质量评估器(NIQE)和感知图像质量评估器(PIQE)。其中,STD 是图像像素值相对于均值的离散程度,STD 越大,表明图像中像素值越分散,图像质量越好。BRISQUE、NIQE 和 PIQE 则是为精密模仿图像质量的主观评价而提出的无参考评价算法,计算结果越小,

则代表图像质量越高<sup>[18-20]</sup>。

利用实测实验数据和仿真模拟数据,计算上述传统全局无参考图像评估指标,得到的评估结果分别如表 2 和表 3 所示。对于前 5 个评估指标,4 个线极化图中没有哪一种线极化图具有绝对优势。 $T_I$ 和  $T_{II}$ 由于平均操作平滑了图像,降低了极化和噪声对图像轮廓和细节的复杂度,故细节比单一线极化图要少,计算的 Entropy、MG、Laplacian、DFT 和 DCT 均低于单一线极化图,且图  $T_{II}$ 的指标更劣于图  $T_I$ ;  $T_Q$ 、 $T_U$ 和 DOLP 三个极化参数图中主要特征在人体边缘区域,信息量相对较少,Entropy 的表现不如单一线极化图,但 MG、Laplacian、DFT 和 DCT 这 4 个能代表图像清晰度的评估指标要优于单一线极化图。对于 STD 评估指标,图

$T_I$ 和图  $T_{II}$ 的 STD 值均优于单一线极化图,  $T_Q$ 、 $T_U$ 和 DOLP 三个极化参数图的 STD 值明显低,符合主观视觉感受。AOP 图由于存在大量的随机噪声,灰度值波动较大,故前 6 个评估指标的表现均是最优的;然而,相反地,AOP 图中目标对比度几乎为 0,能提供给目标检测的有用信息反而最少。可见,前 6 个评估指标不适用于人体安检成像的目标对比度评估。对于后 3 个评估指标,图  $T_I$ 和图  $T_{II}$ 的表现最好,且图  $T_{II}$ 是最优的,单一线极化图均优于图  $T_Q$ 、 $T_U$ 和 DOLP,AOP 的表现最差,该结果与基于隐匿物品对比度高低为判断标准的人眼主观感受较为相近。可见,BRISQUE、NIQE 和 PIQE 较为适用于人体安检成像的目标对比度水平评估。

表 2 实测实验数据的传统全局无参考评价指标计算结果

Table 2 Calculation results of traditional global no-reference evaluation indexes for experimental data

Parameter	$T_{A0^\circ}$	$T_{A45^\circ}$	$T_{A90^\circ}$	$T_{A-45^\circ}$	$T_I$	$T_Q$	$T_U$	$T_{II}$	DOLP	AOP
Entropy	6.887	6.855	6.783	6.808	6.589	6.265	6.186	6.374	6.006	7.992
MG	0.047	0.047	0.046	0.046	0.033	0.068	0.068	0.024	0.064	0.319
Laplacian	0.034	0.033	0.033	0.033	0.017	0.072	0.074	0.008	0.072	1.560
DFT	2823	2768	2721	2756	2156	3442	3436	1727	3201	14491
DCT	9.517	9.439	9.423	9.426	6.786	13.715	13.825	4.8640	13.631	63.038
STD	0.229	0.221	0.226	0.231	0.244	0.053	0.051	0.256	0.056	0.286
BRISQUE	39.328	38.667	37.979	39.191	38.357	43.655	44.794	34.303	44.351	65.803
NIQE	14.838	11.314	14.051	13.312	11.637	20.436	20.887	10.844	21.464	64.810
PIQE	57.268	57.498	57.706	57.479	48.090	70.061	70.750	38.674	68.829	80.672

表 3 仿真模拟数据的传统全局无参考评价指标计算结果

Table 3 Calculation results of traditional global no-reference evaluation indexes for simulation data

Parameter	$T_{A0^\circ}$	$T_{A45^\circ}$	$T_{A90^\circ}$	$T_{A-45^\circ}$	$T_I$	$T_Q$	$T_U$	$T_{II}$	DOLP	AOP
Entropy	6.441	6.460	6.440	6.477	6.140	6.469	6.440	5.831	6.530	7.993
MG	0.050	0.051	0.050	0.052	0.041	0.079	0.083	0.032	0.089	0.317
Laplacian	0.038	0.039	0.037	0.039	0.024	0.095	0.106	0.015	0.126	1.531
DFT	2312	2311	2225	2329	2093	2620	2668	1944	3019	9416
DCT	8.372	8.481	8.245	8.582	6.885	12.560	13.146	5.646	14.573	49.506
STD	0.221	0.216	0.205	0.220	0.233	0.089	0.083	0.248	0.107	0.285
BRISQUE	40.724	40.478	38.219	39.012	38.977	44.079	44.491	37.320	49.882	65.156
NIQE	17.071	16.206	15.318	16.689	17.026	21.091	21.798	14.084	25.444	79.137
PIQE	58.754	57.491	57.274	59.863	53.744	70.283	72.086	49.964	70.957	80.152

上述传统全局图像指标是对整张图像进行评估的,人体安检的隐匿物品检测关注的是局部区域的对比度,局部评价指标有助于更加深入地了解图像局部的分布特性,为目标检测与识别提供更多先验信息。因此,本文进一步采用局部指标对多极化图像进行评估分析,挖掘不同线极化图和极化参数图中的局部优势。

#### 4.2 ROC 曲线局部评价指标

为了定量比较多极化成像性能,计算比较 4 个隐匿物品在不同的线极化以及极化参数图像下的 ROC

曲线,即比较从单一图像直接检测隐匿物品的性能。在 ROC 曲线中,每个点对应的 FPR 值为横坐标,TPR 为纵坐标,定义为

$$R_{TP} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}}, \quad (8)$$

$$R_{FP} = \frac{N_{FP}}{N_{FP} + N_{TN}}, \quad (9)$$

式中:TP 表示将正类预测为正类,FP 表示将负类预测为正类,FN 表示将正类预测为负类,TN 表示将负类预测为负类。TPR 为真阳率,含义是检测出来的真阳

性样本数占所有真实阳性样本数的比例,TPR 值越大,代表检测阳性中实际阳性数越多,检测灵敏度越高。FPR 为假阳率,含义是检测出来的假阳性样本数占所有真实阳性样本数的比例,FPR 越小,代表检测阳性中实际负类数越少,误判率越低。对于某一检测器,根据其在测试数据样本上的表现,能够计算出一个 TPR 和 FPR 点对,那么该检测器可映射成 ROC 平面上的一个点。通过设置检测分类时的不同阈值,就可得到一个经过(0, 0)和(1, 1)的曲线,这就是 ROC 曲线。ROC 曲线能够直观地反映一个检测器在某个阈值时对样本的识别能力,ROC 曲线越是靠近左上角,表明 TPR 越高、FPR 越低,即灵敏度越高、误判率越低,则检测方法的性能越好。若 ROC 曲线经过点(0, 1),代表能够正确检测所有样本,真阳率为 1,假阳率为 0,即理想 ROC 曲线。对于上述参数的计算,将隐匿物品的像素区域归为正类,将在人体区域内部但不包含隐匿物品的像素区域归为负类,在全域内进行图

像阈值分割,每次分割均计算 TPR 和 FPR,从而绘制出 ROC 曲线。值得一提的是,由于需要图像阈值分割,务必要对  $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 进行归一化操作,后续相关计算也是如此。

图 4 给出了 4 个不同隐匿物品的 ROC 曲线。对于不同隐匿物品,多极化 ROC 曲线不尽相同。综合考虑 4 个隐匿物品,可见  $T_{II}$  的 ROC 曲线表现是最好的,最接近理想曲线;4 个单一线极化在个别情况下的 ROC 曲线表现良好,但均不具有绝对优势;相反地,对于  $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 这 4 种极化参数,每一种隐匿物品的 ROC 曲线表现均比较差,对物品检测几乎没有意义。因此,从 ROC 曲线的表现看,4 个单一线极化、图  $T_I$  和  $T_{II}$  都可用于目标检测,而图  $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 均无法直接用于隐匿物品检测。需要指出的是,有许多因素会影响到目标检测性能,比如物理温度、材料种类、隐匿物品尺寸、厚度、形状等<sup>[21]</sup>,因此,极化只是影响 ROC 曲线的检测性能差异的要素之一。

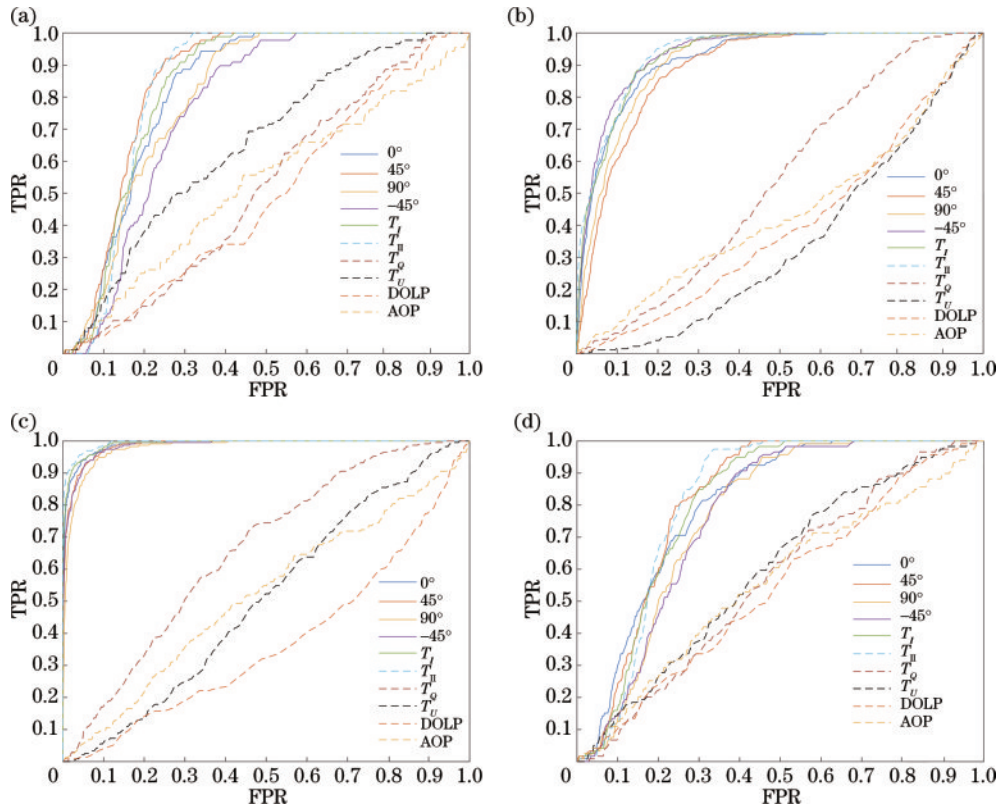


图 4 实测成像结果的 ROC 曲线。(a) 金属刀;(b) 纸币;(c) 面粉;(d) 金属枪

Fig. 4 ROC curves of imaging experiment. (a) Metal knife; (b) paper money; (c) wheat flour; (d) metal gun

### 4.3 DSNR 局部评价指标

隐匿物品和人体区域背景之间的亮温对比度是影响目标检测的关键指标。被动太赫兹图像一般具有较高图像噪声,为了同时考虑图像噪声影响,利用 DSNR 来评估图像对比度性能。DSNR 表示为

$$R_{DSN} = 10 \log \left[ \frac{|\langle I_{body} \rangle - \langle I_{object} \rangle|}{\sigma(I_{body})} \right], \quad (10)$$

式中: $\langle I_{body} \rangle$ 和 $\sigma(I_{body})$ 分别表示隐匿物品周围人体区域内像素值的平均值和标准差; $\langle I_{object} \rangle$ 表示隐匿物品区域内像素值的平均值; $|\cdot|$ 表示模运算。式(10)中,分子表示亮温对比度,分母表示背景像素值波动程度。若隐匿物品与其周围人体背景区域的对比度越大,而且背景像素波动越小,则 DSNR 值越大,说明越有利于隐匿物品检测。

表 4 给出了实测成像数据中对 4 个隐匿物品的

表 4 实测成像数据中 4 个隐匿物品的 DSNR 评估结果

Table 4 Assessment results of DSNR of four hidden objects from imaging experiment

Hidden object	$T_{A0^\circ}$	$T_{A45^\circ}$	$T_{A90^\circ}$	$T_{A-45^\circ}$	$T_I$	$T_Q$	$T_U$	$T_{II}$	DOLP	AOP
Metal knife	2.907	3.585	3.216	3.002	3.627	-4.234	-2.373	4.136	-1.036	-16.407
Paper money	5.278	5.168	4.213	5.439	5.747	-2.341	-8.753	6.319	-5.187	-11.024
Wheat flour	3.815	3.503	1.942	3.003	3.278	-3.379	-5.857	3.640	-6.620	-7.590
Metal gun	3.689	3.323	2.414	3.226	3.975	-5.121	-7.222	4.411	-12.528	-10.507

DSNR 评估结果。可见,4 种线极化、图  $T_I$  和  $T_{II}$  比其他极化参数图像具有更高的 DSNR,这一特点和 ROC 曲线的表现类似。4 个单一线极化图像都有各自部分优势,但不具备比其他极化有更好 DSNR 的绝对优势。对于金属刀、纸币和金属枪,  $T_{II}$  的 DSNR 值最高;对于塑料袋装面粉,由于放置在人体大腿左侧而且紧邻人体边缘,故水平极化的 DSNR 值最高,  $T_{II}$  的 DSNR 值仅低于水平极化;对于图  $T_I$ ,4 种隐匿物品的 DSNR 值均保持在比较高的水平;由于 AOP 图像具有较强的随机噪声特性,因此 DSNR 值是最低的。

综上所述:水平、45°极化、垂直、-45°极化、 $T_I$  和  $T_{II}$  均可用于隐匿物品检测,而且  $T_{II}$  在绝大部分场景都存在优势;对于靠近人体左右边缘的隐匿物品,水平极化更有利; $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 不能直接进行隐匿物品检测,但可提供人体边缘信息,有望为检测提供间接作用。

#### 4.4 观察者主观局部评价

通过统计观察者人眼对图像局部质量的视觉感知评价分数,对图像质量进行主观评估<sup>[22]</sup>。基于上述实测实验数据和仿真模拟数据,选择了四个单一线极化、 $T_I$  和  $T_{II}$  6 个图像,对局部区域的隐匿物品的对比度视觉感知度进行评估。本文的主观局部评价方式为相对评价,即在无参考图像下,观察者对一组(6 个)待评估图像进行比对,判断每张图像的优劣顺序,并给出相应评分。针对图像中局部区域的隐匿物品,对 6 张图像进行评分,分值范围为从 1 分到 5 分,分值越高则代表质量越高。本文研究中共有 54 名观察者参与图像的主观评价,为避免评分时观察者因具备极化特性先验知识而有偏向性,每个评分图像的极化角度或极化参数对于观察者是未知的。所有评分完成后统计每张图像的平均分。

表 5 和表 6 给出了对不同隐匿物品的评分统计结果。由表可见:所有隐匿物品的图  $T_{II}$  平均分都比较

表 5 实测实验数据的观察者主观局部评价结果

Table 5 Observer subjective local evaluation results of experimental data

Object	$T_{A0^\circ}$	$T_{A45^\circ}$	$T_{A90^\circ}$	$T_{A-45^\circ}$	$T_I$	$T_{II}$
Metal knife	2.54	3.39	3.31	2.43	3.85	4.28
Paper money	3.85	2.80	2.63	3.39	3.78	4.02
Wheat flour	3.33	2.41	3.22	3.15	3.72	4.33
Metal gun	2.91	2.67	2.39	3.69	3.46	4.09

表 6 仿真模拟数据的观察者主观局部评价结果

Table 6 Observer subjective local evaluation results of simulation data

Object	$T_{A0^\circ}$	$T_{A45^\circ}$	$T_{A90^\circ}$	$T_{A-45^\circ}$	$T_I$	$T_{II}$
Ceramic rod	2.17	3.89	2.85	3.02	3.15	4.44
Wood knife	2.83	2.80	2.37	3.26	4.17	4.28
Stone knife	3.20	2.81	2.09	3.24	3.94	4.35
Ceramic gun	3.41	3.41	2.7	3.57	4.06	4.37
Cigarette lighter	3.26	2.37	2.87	2.91	4.26	4.22

高,均高于 4 个单一线极化图;次高分可能是 4 个单一线极化图,也可能是图  $T_I$ ;对于实测实验中放置在靠近人体边缘的隐匿物品,如纸币和塑料袋装面粉,水平极化图的分数是 4 种线极化图像中最高的;对于实测实验中的金属枪和仿真模拟中的陶瓷枪,均放置在人体腰部位置,放置姿态一致,-45°线极化图的分数是 4 个线极化图中最高的;对于实测实验中放置在人体胸部的金属刀和仿真模拟中放置在人体左肩上方的陶瓷棒,45°线极化图的分数是 4 个线极化图中最高的。因此,从观察者主观局部评价结果上看,图  $T_{II}$  更适合人眼区分隐匿物品场景,同样地,任何单一线极化图在人眼视觉感知上均没有绝对优势。

## 5 结 论

通过全面评估用于被动太赫兹人体安检成像检测的多极化图像质量,解决极化模式难以选择和多极化图像特性尚不明确等问题。分析人体和隐匿物品的任意极化太赫兹辐射亮温模型,结果表明较大入射角时的水平和垂直极化发射率和亮温差异更为明显。通过实测实验和仿真模拟获得了水平、45°、垂直和-45° 4 个线极化图像,并计算分析了  $T_I$ 、 $T_Q$ 、 $T_U$ 、 $T_{II}$ 、DOLP 和 AOP 6 个极化参数图像。传统全局评价指标、ROC 曲线局部评价指标、DSNR 局部评价指标和观察者主观评价结果表明:水平极化、45°线极化、垂直极化、-45°线极化、 $T_I$  和  $T_{II}$  适合于检测隐匿物品;对于靠近人体左右边缘的隐匿物品,水平极化更有利;对于靠近人体上下边缘的隐匿物品,垂直极化更为有利;图  $T_Q$ 、 $T_U$ 、DOLP 和 AOP 不太适合直接用于隐匿物品检测,但可提供人体边缘信息;图  $T_{II}$  更适合观察者人眼感知隐匿物品场景;传统全局无评价指标中 BRISQUE、NIQE 和 PIQE 适合用于评价图像中隐匿物品检测能力。评估分析结果表明,人



体表皮不同局部区域的最佳目标对比度可能对应不同线极化成像模式,不存在具有绝对优势的单一线极化成像模式,任意单一线极化总具有一定的局部最优特点。未来研究中,将对更多数据进行统计分析,研究如何有选择性地智能融合优势极化信息,从而提升成像检测性能。

### 参 考 文 献

- [1] Yujiri L, Shoucri M, Moffa P. Passive millimeter wave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, 4(3): 39-50.
- [2] Fu P, Zhu D, Hu F, et al. A near-field imaging algorithm based on angular spectrum theory for synthetic aperture interferometric radiometer[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(7): 3606-3616.
- [3] Chandel S, Bhatnagar G, Kowalski M. Saliency and superpixel improved detection and segmentation of concealed objects for passive terahertz images[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(2): 023101.
- [4] Yang H, Zhang D H, Hu A Y, et al. Transformer-based anchor-free detection of concealed objects in passive millimeter wave images[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5012216.
- [5] Cheng Y Y, Tian X, Zhu D, et al. Regional-based object detection using polarization and fisher vectors in passive millimeter-wave imaging[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(6): 2702-2713.
- [6] Parinussa R M, Holmes T R H, de Jeu R A M. Soil moisture retrievals from the WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2683-2694.
- [7] Ruf C S, Hu Y, Brown S T. Calibration of WindSat polarimetric channels with a vicarious cold reference[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 470-475.
- [8] Kim W G, Moon N W, Kim H K, et al. Linear polarization sum imaging in passive millimeter-wave imaging system for target recognition[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 136: 175-193.
- [9] Su J L, Wu H F, Li P F, et al. Detection for ship by dual-polarization imaging radiometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27830-27844.
- [10] Cheng Y Y, You Y, Zhu D, et al. Reflection removal using dual-polarization and saliency in millimeter-wave and terahertz imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(11): 9439-9447.
- [11] Bernacki B E, Kelly J F, Sheen D M, et al. Passive fully polarimetric W-band millimeter-wave imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8259: 82590F.
- [12] Cheng Y Y, Qiao L B, Zhu D, et al. Passive polarimetric imaging of millimeter and terahertz waves for personnel security screening[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1233-1236.
- [13] Gatesman A J, Danylov A, Goyette T M, et al. Terahertz behavior of optical components and common materials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6212: 62120E.
- [14] 刘斌, 谯倩, 赵静, 等. 基于高频方差熵清晰度评价函数的聚焦三维测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20200326.
- [15] Liu B, Qiao Q, Zhao J, et al. 3D profile measurement based on depth from focus method using high-frequency component variance weighted entropy image sharpness evaluation function[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200326.
- [16] 袁伟聪, 郝俊明. 用于红外自动调焦的图像离焦深浅度判定算法[J]. *红外*, 2021, 42(11): 33-40.
- [17] Yuan Y C, Hao J M. An algorithm for judging the depth of image defocusing used for infrared automatic focusing[J]. *Infrared*, 2021, 42(11): 33-40.
- [18] 李洪宇, 杨帆, 谭文斌, 等. 基于HVS算子的自适应清晰度自动调焦评价函数[J]. *红外技术*, 2017, 39(7): 632-637.
- [19] Li H Y, Yang F, Tan W B, et al. A self-adaptive clarity auto focus evaluation function based on HVS operator[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 632-637.
- [20] 余海洋, 范之国, 金海红, 等. 融合图像灰度比值的离焦图像自动判别分离方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(22): 2210001.
- [21] Yu H Y, Fan Z G, Jin H H, et al. Automatic discrimination and separation method of defocused image based on image gray ratio images[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2210001.
- [22] Mittal A, Moorthy A K, Bovik A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(12): 4695-4708.
- [23] Mittal A, Soundararajan R, Bovik A C. Making a "completely blind" image quality analyzer[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(3): 209-212.
- [24] Venkatanath N, Praneeth D, Bh M C, et al. Blind image quality evaluation using perception based features[C]// 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC), February 27-March 1, 2015, Mumbai, India. New York: IEEE Press, 2015.
- [25] Kowalski M. Hidden object detection and recognition in passive terahertz and mid-wavelength infrared[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(11): 1074-1091.
- [26] Avrahamy R, Milgrom B, Zohar M, et al. Improving object imaging with sea glinted background using polarization method: analysis and operator survey[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 8764-8774.