

针对隐藏目标检测的太赫兹波站开式全极化 全息雷达成像实验

经文*, 安健飞, 江舸, 成彬彬, 张健

中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999

摘要 将全极化信息引入站开式全息成像系统中,设计了一种频率为 0.14 GHz 的全极化宽带雷达,并基于该系统完成了隐藏目标检测的太赫兹波站开式全极化全息成像实验。利用极化目标分解方法,分析了隐藏目标的低熵极化散射,研究了在不同角度照射下的平均极化散射机制。实验结果表明:在 0.14 THz 频段下,典型衣物材料的遮挡会改变背景杂波的散斑样式,但对强散射回波目标的极化散射影响很小;人造目标的极化散射熵较背景杂波更小;模型手枪的主要散射机理为光滑表面对应的低熵表面散射,其中套筒上的斜纹包含了低熵多次散射,这是该目标交叉极化回波的主要来源。

关键词 太赫兹技术; 全息; 隐藏目标检测; 站开式成像; 太赫兹成像; 极化目标分解

中图分类号 TN26

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614032

Standoff Fully-Polarimetric Holographic-Radar-Imaging Experiments in Terahertz Regime for Concealed Target Detection

Jing Wen*, An Jianfei, Jiang Ge, Cheng Binbin, Zhang Jian

Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

Abstract In this study, fully-polarimetric information is introduced to a standoff holographic imaging system. A 0.14-GHz fully-polarimetric wideband radar is designed for detecting concealed targets in a standoff fully-polarimetric holographic-radar-imaging experiment. The low-entropy polarization scattering of concealed targets is analyzed through the target-polarization decomposition method, and the average polarization scattering mechanism is investigated at different irradiation angles. The experimental results show that in the 0.14 THz band, the covering by the typical clothing materials is found to alter the speckle pattern of the background clutter, but has a negligible impact on the polarization scattering of a strongly scattered echo target. The polarization scattering entropy of the artificial target is smaller than that of the background clutter. The main scattering mechanism of a model pistol is the low-entropy surface scattering from its smooth surface, in which the inclined stripes on the sleeve contribute to the low-entropy multiple scattering, which is the main source of the cross-polarization echo of the target.

Key words terahertz technology; holography; concealed target detection; standoff imaging; terahertz imaging; polarimetric target decomposition

OCIS codes 090.2910; 280.5600; 290.5855

1 引言

目前以金属门探测器结合人工“搜身”的人体安检方式面临效率低下、侵犯隐私等问题,难以适用于对开放式公共场所的隐藏违禁物品快速、有效检测的需求。站开式(standoff)人体安检成像检测有利

于实现对潜在危险的早期预警,保障安检成像系统的隐蔽性,在应用上更为灵活^[1]。太赫兹波是 0.1~10 THz 频段的电磁波,具有对非极性物质良好的穿透能力^[2-3]和对生物无致电离辐射等特点。相比于微波和毫米波频段,太赫兹波频率更高,能够在更小的孔径支撑角下实现毫米级的成像分辨率。基于太

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-07; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家 973 计划(2015CB755406)、国家自然科学基金(61601424)

* E-mail: marty1865@foxmail.com

赫兹波的站开式全极化全息雷达成像技术使得利用毫米级分辨率的站开式安检成像检测成为可能,该技术在人体安检中具有巨大的应用潜力。

但是,一方面,由于站开式成像系统在照射角度上的限制,目标回波在波数域支撑区所提供的目标角散射信息不够充分;另一方面,由衣物和人体体表散射导致的镜面反射杂波和散斑噪声也极大地制约了太赫兹波站开式全极化全息成像系统对人体体表携带违禁品的检测能力。为了在有限的孔径支撑角中增加目标信息量,国内外学者将极化信息引入毫米波和太赫兹波站开式人体安检雷达成像系统中,通过在极化域上增加隐藏目标电磁散射信息,利用目标极化散射机理和特点,实现隐藏违禁品的检测、分类与识别。毫米波和太赫兹波人体违禁品站开式极化检测系统主要包括极化非成像雷达系统和极化成像系统。在针对隐藏目标检测的极化非成像系统的研究中,Harmer等^[4]利用毫米波雷达交叉极化通道信息进行实验研究。Blackhurst等^[5]进一步研究了隐藏违禁目标的全极化响应,并基于Huynen目标参数对毫米波隐藏目标识别进行仿真和实验分析。An等^[6]研究了频率为0.14 THz的极化非成像在雷达照射下人体隐藏目标的检测问题。但是,由于人体目标在毫米和太赫兹波段是包含多种散射机理的复杂目标,只利用高分辨1维距离像结合极化信息的非成像雷达系统会带来虚警和漏警概率过大的问题。在极化成像上,Sheen等^[7]开展了利用线极化和圆极化收发下人体模型微波全息成像实验,虽然成像系统频率比较低,但成像结果仍表明了极化信息具有进一步刻画目标表面纹理和抑制镜面反射杂波的潜力。Robertson等^[8]开发了一款基于极化强度信息、频率为0.34 THz的3维全息雷达成像系统,对人体隐藏违禁品进行极化成像实验,并指出在背景中利用交叉极化通道成像结果更容易实现对隐藏目标的检测。但该研究主要集中在利用双极化系统对人体隐藏违禁品成像现象及解释分析,缺乏极化散射机理的有效刻画。总之,在利用极化信息的站开式太赫兹波人体隐藏目标的检测问题上,仅有高分辨1维距离像的全极化非成像人体隐藏目标检测方法难以刻画分布式目标不同部位的复杂特征,而太赫兹波极化3维雷达全息成像系统缺乏能够获得隐藏违禁品全极化散射机理的实验研究。

为了进一步利用隐藏违禁品太赫兹波全息成像结果中的全极化信息,本文利用频率为0.14 THz全极化雷达,开展了针对隐藏违禁品检测的太赫兹波站

开式全极化全息成像实验研究。通过对全极化成像结果进行图像配准和极化定标,获得3维全息成像结果中每个像素点的极化散射矩阵。利用子孔径全息成像结果进行多视处理,抑制散斑噪声;在单视成像结果中,对全息成像结果的极化散射矩阵进行基于Pauli基的相干分解,研究了隐藏违禁品在高分辨率全息成像中主要的低熵散射成分;对抑制散斑后的全息成像结果进行基于极化散射熵/极化散射参数(H/α)的非相干分解,分析了在不同照射角度下的隐藏违禁品目标主要的“平均”散射机制。太赫兹波站开式全极化全息成像结果揭示了隐藏违禁品的丰富的目标信息,有助于进一步实现目标分类与识别。

2 毫米波全极化全息成像原理

毫米波全极化全息成像是在毫米波全息的基础上将单极化收发通道扩展为全极化收发通道,其每个极化通道与毫米波全息成像的没有区别。全极化收发可以利用分时发射水平极化与垂直极化电磁波,并通过同时接收水平和垂直极化电磁波等方式实现。

对于毫米波全极化全息成像系统的每个极化通道而言,由于全极化雷达与目标的距离远大于收发天线之间的距离,收发分置天线可以用等效收发同置天线来近似,收发天线的扫描平面位于 $z=0$ 平面。假设发射通道极化为 p 的线性调频信号,其接收通道极化为 q ,其中 $p, q = H$ (水平极化)或 V (垂直极化),经由2维扫描轨道一步一停采集目标回波数据,通过去斜处理,可以得到 p, q 极化通道在2维扫描孔径的每个位置上的差频回波信号,毫米波全极化全息成像示意图如图1所示。

Soumekh^[9]等利用后向投影(BP)算法中的毫

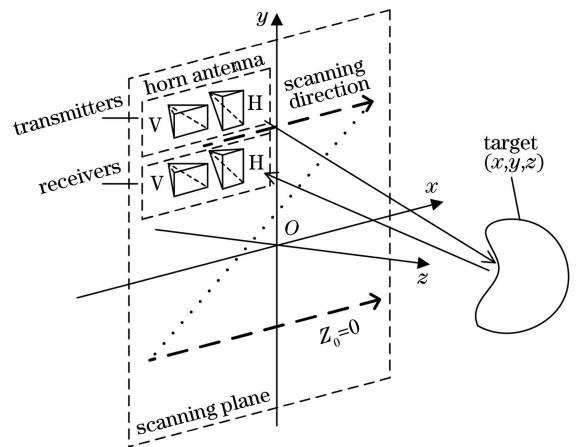


图1 毫米波全极化全息成像示意图

Fig. 1 Schematic of millimeter wave fully-polarimetric holographic imaging

米波全息成像算法对回波数据进行处理,实现在任意深度目标散射系数的重构。BP 算法通过在快时间内对得到的差频信号作傅里叶变换得到距离压缩回波信号,再根据每个极化通道收发天线的位置和待重构目标位置对距离压缩回波数据进行匹配滤波,即可得到各极化通道的 3 维重建图像。为了获得俯仰或方位向的低旁瓣,可对回波数据进行加窗处理,但代价是俯仰和方位向的分辨率损失。

各单极化通道的 3 维全息成像系统的方位向分辨率为 $\rho_x \approx \lambda/[4\sin(\theta_x/2)]$,俯仰向分辨率为 $\rho_y \approx \lambda/[4\sin(\theta_y/2)]$,其中 θ_x 和 θ_y 分别为 x 、 y 方向上的天线波束角和波束域支撑角中较小的值, λ 为系统中心频率所对应的波长。距离分辨率为 $\rho_r \approx c/(2B)$,其中 c 为自由空间光速, B 为系统带宽。

3 成像方法

3.1 频率为 0.14 THz 的全极化雷达系统

站开式人体隐藏目标检测对系统的成像分辨率和衣物的穿透性要求很高。对衣物穿透性很好的频段较低的微波、毫米波全息雷达成像系统难以在远距离条件下满足成像分辨率要求,而频段相对较高的太赫兹波全息雷达成像系统则面临衣物穿透性下降、衣物杂波和散斑噪声对成像质量的影响显著以及退化效应等问题。0.14 THz 频率波段同时位于毫米波(30~300 GHz)与太赫兹波的频段内,针对该频段的距离较远的站开式成像能够获得毫米级的成像分辨率,且该频段对衣物等人体体表遮挡介质仍然有较好的穿透性,是适用于人体安检站开式

成像检测的理想频段之一。

成像系统是基于频率为 0.14 THz 的站开式全极化雷达系统^[6]。在水平极化发射、水平和垂直极化同时接收的双极化基础上,再加一路垂直极化发射通道。该通道将中心频率为 17.05 GHz、带宽为 0.50 GHz 的线性调频信号通过功率放大器(PA)分为两路,两路信号经由微波开关控制,通过 8 倍频和 PA 进行功率放大,经 D 波段扭波导改变其电磁波极化方式,最后通过喇叭天线发射。系统采用分时发射水平和垂直极化电磁波,同时接收水平和垂直极化通道回波,实现目标全极化成像。接收到的回波经谐波混频器(SHM)混频得到中频信号(IF signal),再经过中频放大、滤波和采样模块,将采样信号经 FMC 接口传递到信号处理和显示控制模块,最后利用近场成像算法获得全极化成像结果。发射天线和接收天线的波束宽度均为 8°。该系统发射中心频率为 136.4 GHz、带宽为 4 GHz 的线性调频信号。系统时钟由一个频率为 100 MHz 的高性能恒温晶振通过锁相环变换提供,所有的系统采用全相参结构以满足相干成像的要求。该雷达主要包含频率为 0.14 THz 的全极化收/发(T/R)倍频链、中频处理和采集模块,以及信号处理和显示控制模块等。成像目标固定在能够被全极化雷达照射到的 2 维扫描轨道上,通过目标在轨道上的扫描获得等效的 2 维平面照射孔径,实验中的目标与雷达系统的距离约为 3 m,波束能够覆盖约为 0.4 m×0.4 m 的区域。频率为 0.14 THz 的全极化雷达系统成像系统架构如图 2 所示。

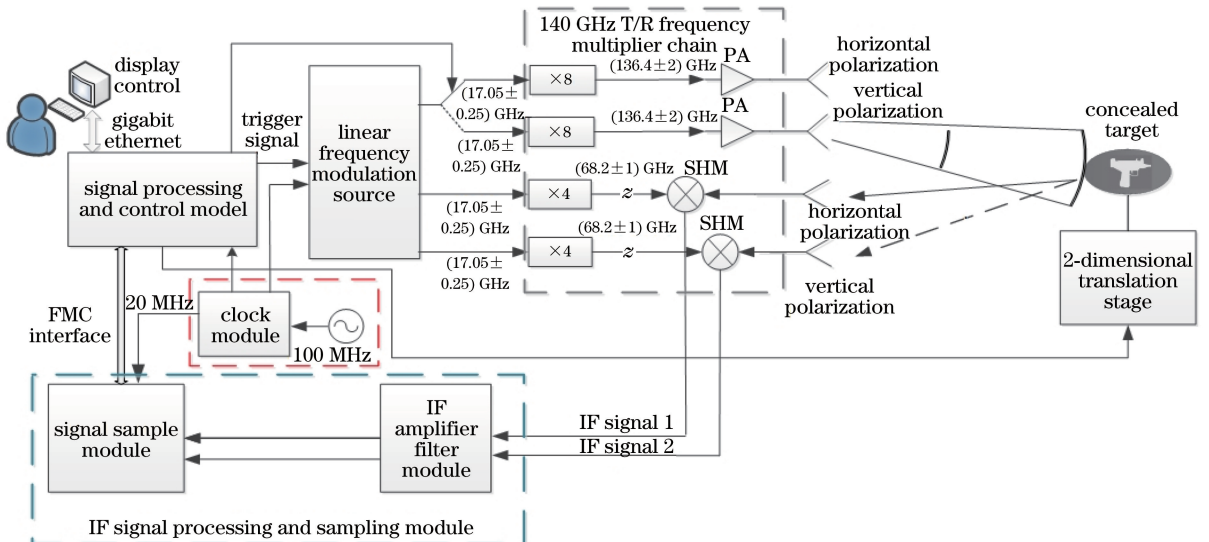


图 2 频率为 140 GHz 的全极化全息雷达成像系统架构

Fig. 2 Structural diagram of 140 GHz fully-polarimetric holographic radar imaging system

3.2 成像目标

成像目标包括位于成像区域 4 个角落的 0° 二面角、 45° 二面角和方向相反的两个三面角, 并作为成像定标和校准的参考点目标。成像区域中部为待测隐藏违禁品(实验中为手枪模型), 隐藏违禁品紧贴着杂波背景板(可更换具有不同介电常数和粗糙度的非金属板, 实验中选用粗糙泡沫板), 隐藏违禁品表面可以覆盖不同的衣物材料(实验中选用毛巾), 以模拟包含人体杂波和遮挡物效应的隐藏违禁品全息成像场景。成像目标通过长为 0.5 m 的非金属固定杆固定于 2 维扫描平台前侧, 可利用距离选通抑制成像区域外的背景杂波影响。成像目标的光学图像如图 3 所示。目标水平和垂直方向上的全孔径扫描长度均为 450 mm, 扫描间隔为 5 mm, 水平和垂直方向的扫描点数均为 91 点。

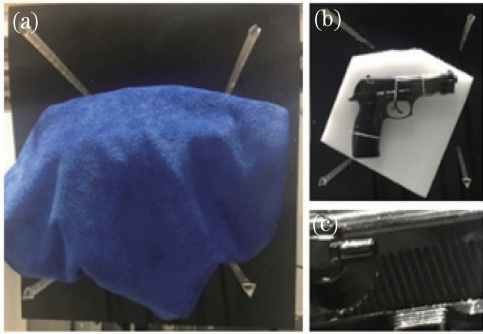


图 3 成像目标的光学图像。(a)覆盖毛巾的手枪模型;
(b)无遮挡手枪模型;(c)手枪模型的放大表面纹理

Fig. 3 Optical images of imaging targets. (a) Pistol model covered by towel; (b) uncovered pistol model; (c) enlarged surface texture of pistol model

3.3 全极化全息成像结果预处理

由于收发天线在位置上的偏差、极化通道不一致性和目标的相干斑噪声等影响, 在进一步利用全极化信息前, 需要在图像域对 4 个极化通道进行预处理。预处理主要包括图像配准、极化校准和子孔径多视抑制散斑。

1) 图像配准

由于收发天线分置, 不同极化通道的等效相位中心在其位置上会有偏差, 因此需要对 4 个极化通道的全息成像结果进行 3 维图像配准。为了实现亚像素级别的图像配准, 对各通道的定标点目标的插值 BP 成像结果进行相关处理, 解算该通道收发天线的等效相位中心与预设的等效相位中心的位置偏差, 用修正后的收发天线等效相位中心代替预设的位置, 重新进行 BP 成像, 从而获得图像配准的全极化图像。对每个极化通道全息成像结果进行图像配

准后, 可以获得 3 维重构结果, 利用水平极化 H 与垂直极化 V 系统, 测量得到每个像素的目标极化观测矩阵 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: M_{pq} 表示以极化方式 q 发射、极化方式 p 接收所得到的测量结果, $p, q = H$ 或 V 。

2) 极化校准

由于全极化全息成像系统获取的数据会受到极化串扰、极化收发通道幅相不平衡等系统误差的影响, 得到的 \mathbf{M} 需要进一步极化定标校准, 才能获得能够反映目标信息的极化散射矩阵。该实验根据成像区域内的极化校准点目标, 通过无源定标算法来获取太赫兹波全极化全息成像中的极化散射矩阵。

全极化全息成像系统的极化定标模型与极化 SAR 系统的极化定标模型相同, 可表示为

$$\mathbf{M} = A e^{j\varphi} \mathbf{RST}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为目标的真实极化散射矩阵; S_{pq} 为 \mathbf{S} 矩阵的各个分量; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示系统接收和发射的失真矩阵; A 为系统绝度幅度增益因子; φ 为系统绝对相位。

经典的点目标无源校准算法利用具有特殊极化散射矩阵的点目标定标体, 如金属球、 0° 二面角、 45° 二面角和三面角等, 通过一定的合理假设推导出误差矩阵的显示表达式。利用 Whitt 等^[10]提出的点目标定标算法时, 不需要对雷达收发失真矩阵作任何假设, 在定标体的选择上有很大的灵活性, 但要求获得精确的目标极化散射矩阵。由于太赫兹波频率高, 对目标的取向角比较敏感。此外, 实验中固定二面角的支架对 0° 二面角极化散射矩阵理论值的影响不可忽略, 不同于单个二面角的极化散射矩阵, 在此需要利用电磁散射仿真软件获得包含支架的二面角的极化散射矩阵。利用 Altair FEKO 的时域有限差分(FDTD)求解器计算包含支架的定标体目标极化散射系数随照射角度的变化情况。图 4 给出了带支架的 0° 二面角 HH 与 VV 极化散射系数比值的幅度和幅角随入射角 θ (天线俯仰方向) 的变化情况。由图可见, 当入射角变化大于 4° 时, 带支架的 0° 二面角 HH 与 VV 极化散射系数比值的幅度和相位失真较大, 而当入射角在 0° 附近时, $|S_{HH}|$ 也略小于 $|S_{VV}|$, 且 HH 与 VV 通道的相位差也略大于 180° 。用考虑了支架影响的计算结果代替 0° 二面角的理论结果, 可保证极化校准的有效性。

为了保证极化校准时孔径照射的入射角在 0°

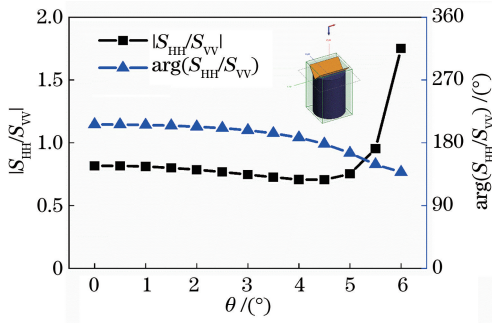


图4 带支架的 0° 二面角HH与VV极化散射系数比值的幅度和幅角随入射角 θ (天线俯仰方向)的变化情况

Fig. 4 Amplitude and argument of S_{HH}/S_{VV} of dihedral reflector with 0° fixed to holder versus angle of incidence

附近,改善入射角过大带来的目标散射矩阵估计误差,对定标体目标选取入射角小于 2° 的子孔径进行成像处理,用子孔径成像结果代替全孔径成像结果,获得特定定标体的极化散射测量数据,再基于Altair FEKO计算入射角为 0° 的理论极化散射矩阵,通过Whitt等^[10]提出的算法对成像结果进行极化校准。

3) 子孔径多视抑斑

当目标相对于相干成像系统的波长而言比较“粗糙”时,在成像结果中就会表现出颗粒状的噪声,即散斑噪声。在针对人体隐藏目标的站开式太赫兹波全极化全息成像结果中,散斑噪声不可忽略,散斑增加了人体隐藏目标检测的难度。当成像分辨率不是首要的考虑因素时,可以借鉴合成孔径雷达散斑抑制中的多视处理方法^[11],在2维成像阵列中利用水平和竖直方向划分出的子孔径多视处理来抑制散斑噪声。

将成像2维孔径划分为 N 个子孔径,分别对每个子孔径的全极化回波数据进行成像处理,获得 N 组太赫兹波全极化全息强度结果,将 N 组图像按极化相加生成极化 N 视强度图像。当对粗糙目标在不同照射角度下的子全息图像的相干斑强度进行独立统计时, N 视处理后散斑的标准差与均值的比值将降为原来的 $1/\sqrt{N}$,散斑噪声得到抑制,且方位

分辨率将随着孔径的减小而降低。对原孔径进行无重叠等孔径地划分得到子孔径,假设方位向子孔径划分为 N_1 个,俯仰向子孔径划分为 N_2 个,那么 $N=N_1N_2$ 。因为全孔径都能对目标进行有效照射,方位向的成像分辨率由方位向子孔径确定的方位向波束域支撑角确定,并减小到全孔径的 $1/N_1$,因此方位向分辨率将降为原孔径方位向分辨率的 $1/N_1$ 。同理,俯仰向分辨率将降为原孔径的 $1/N_2$ 。在成像速度上,全孔径BP成像算法的计算复杂度约为 $O(N_{Ax}N_{Ay}N_{1x}N_{1y}N_{1z})$,其中 N_{Ax} 和 N_{Ay} 分别为全孔径在 x 和 y 方向的阵列个数, N_{1x} 、 N_{1y} 和 N_{1z} 分别为待重构区域的 x 、 y 和 z 方向的坐标点数,对于相同的待重构区域的坐标点,子孔径多视处理的计算复杂度为 $N_1N_2 \cdot O[(N_{Ax}/N_1)(N_{Ay}/N_2)N_{1x}N_{1y}N_{1z}] = O(N_{Ax}N_{Ay}N_{1x}N_{1y}N_{1z})$,所以 N 视处理的成像速度与全孔径成像相当。但在实际处理中,一方面由于成像分辨率的降低,成像空间 x 、 y 方向的坐标点数 N_{1x} 、 N_{1y} 也可以相应地减小,这会加快 N 视处理的速度;另一方面子孔径之间可以重叠,并增加每个子孔径的阵列数目,提高最终的成像分辨率,但这也降低 N 视处理的速度。总之, N 视处理的BP成像速度取决于实际处理中子孔径的重叠和成像空间 x 、 y 方向的坐标点数。若要进一步抑斑,则需采取进一步的散斑滤波处理。

实验中的多视处理采用重叠的子孔径,其中全孔径的大小为 $450\text{ mm} \times 450\text{ mm}$,4视子孔径的大小为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,9视子孔径的大小为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,16视子孔径的大小为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 。成像目标中的二面角和三面角近似认为是点目标,利用子孔径多视处理结果中的点目标成像结果沿水平和竖直方向的成像截面3 dB宽度,获得子孔径多视处理后的HH、HV、VH和VV这4个极化通道的成像分辨率。表1展示了不同视数在不同极化通道中的多视成像结果沿水平和竖直方向的成像分辨率。

表1 多视处理后的HH、HV、VH、VV这4个极化通道的成像分辨率

Table 1 Imaging resolution for four polarimetric channels of HH, HV, VH, and VV after multilook processing

Number of looks	Resolution of x dimension ρ_x / mm				Resolution of y dimension ρ_y / mm			
	HH	HV	VH	VV	HH	HV	VH	VV
Full aperture	8.6	8.7	8.7	8.5	9.1	8.6	8.7	8.9
4 looks	11.4	11.9	12.1	11.5	12.1	12.0	12.1	12.3
9 looks	16.8	17.3	17.6	17.2	17.4	17.7	17.8	17.6
16 looks	21.8	22.0	22.4	22.2	21.7	22.5	22.7	22.2

定义全极化总功率 $S_{\text{span}} = |S_{\text{HH}}|^2 + |S_{\text{HV}}|^2 + |S_{\text{VH}}|^2 + |S_{\text{VV}}|^2$, 图 5 显示的是针对遮挡目标 [图 3(a)] 的多视处理后的 S_{span} 沿距离维的最大值投影成像结果, 图 3(a)~(d) 分别为全孔径、将扫描孔径分解为 2×2 个子孔径进行 4 视处理、 3×3 个子孔径进行 9 视处理和 4×4 个子孔径进行 16 视处理的 S_{span} 沿距离维的最大值投影成像结果。由于孔径的限制, 视数越多的子孔径的波束域支撑角越小, 则子孔径多视处理后的成像分辨率越低。随着成像分辨率的降低, 成像目标从包含边缘轮廓和细节信息的图像向包含若干强散射中心图像过渡。选取成像结果中粗糙泡沫板的区域计算散斑对比度,

全孔径、4 视、9 视和 16 视的散斑对比度分别为 0.76, 0.56, 0.38, 0.33。经过多视处理后, 散斑噪声得到抑制, 而且视数越大, 得到的图像越平滑, 背景杂波由颗粒状的噪声向连续的背景杂波平台过渡。子孔径多视处理抑制了全息雷达图像中的散斑噪声, 但同时降低了成像分辨率, 因此, 要根据实际检测需要来确定系统的成像视数。不同子孔径对目标照射的孔径中心入射角不同, 入射角度的变化均小于天线波束宽度。对子孔径进行多视处理, 也可以视为对不同照射角度下的目标进行平均处理, 通过分析多视处理结果, 能够获得更为稳健的目标极化散射“平均”机制。

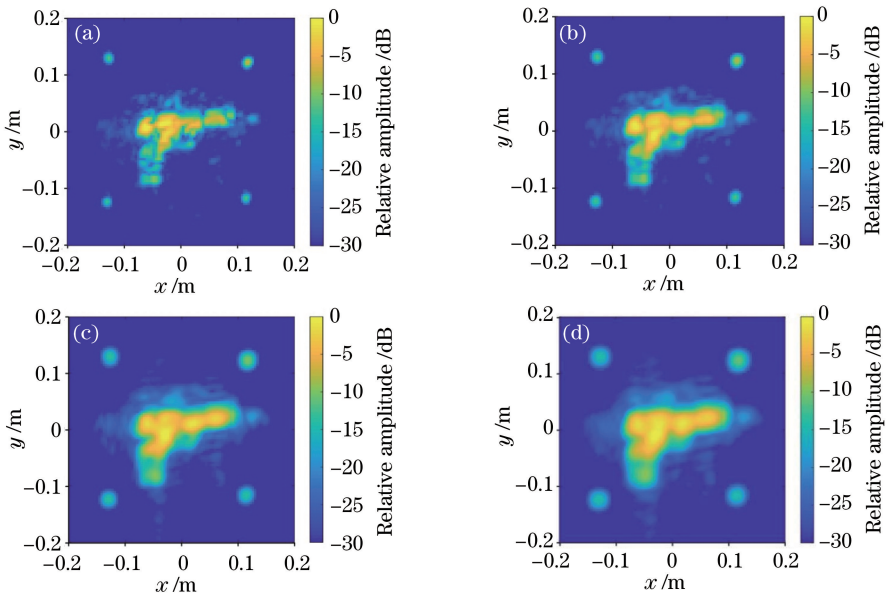


图 5 多视处理后的 S_{span} 沿距离维的最大值投影成像结果。(a)全孔径;(b)4 视;(c)9 视;(d)16 视
Fig. 5 Maximum projection imaging results along range dimension of S_{span} after multilook processing.
(a) Full aperture; (b) 4 looks; (c) 9 looks; (d) 16 looks

4 目标极化分解分析

目标极化分解分析是研究目标极化散射特性的主要方法之一。根据研究对象的不同, 目标极化分解又可以分为相干分解和非相干分解。相干分解主要针对低熵的确定性目标, 而非相干分解主要针对分布式目标。在针对人体隐藏目标的太赫兹波全极化全息成像中, 目标镜面反射分量是重要的回波组成, 而镜面反射分量对照射角度十分敏感, 目标成像结果的角度敏感性会提高多角度照射下的多视处理结果的熵值。故针对隐藏目标的太赫兹波全极化全息成像结果, 既可以进行相干分解, 研究目标极化散射的低熵成分, 又可以进行子孔径多视处理和散斑抑制后的非相干分解, 研究目标的极化散射机理。

4.1 相干分解

相干分解^[11]是将确定性目标理解为某种或几种散射机制的合成, 以建立测量数据与目标物理构成之间的联系。该方法主要针对极化散射矩阵, 将其分解为一些简单目标的极化散射矩阵的加权和, 即

$$\mathbf{S} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \mathbf{S}_k, \quad (3)$$

式中: \mathbf{S}_k 表示第 k 个简单目标的极化散射矩阵; α_k 表示该目标对应的加权系数。在每个像素中, 理论上相干分解在只存在一种主要的目标成分时是有效的(如用作定标体的二面角或三面角散射), 并能够应用于高分辨率和低熵散射中。但对于一个给定的极化散射矩阵, 存在无穷种相干分解方法, 在缺乏信

息的情况下,很难确定使用哪种方法。该实验场景包含二面角和三面角等目标,可采用 Pauli 分解来研究目标极化散射机理。Pauli 分解的基本原理是将散射中心的极化散射矩阵在 Pauli 矩阵中展开,得到对应的极化散射矢量。在(H,V)极化基下,目标第 l 个散射中心的相干极化散射矩阵 \mathbf{S} 在 Pauli 矩阵基下分解可得

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} = a\mathbf{S}_a + b\mathbf{S}_b + c\mathbf{S}_c + d\mathbf{S}_d = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{b}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \frac{c}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{S}_a 表示平面一次散射; \mathbf{S}_b 表示 0° 二面角散射; \mathbf{S}_c 表示 45° 二面角散射; \mathbf{S}_d 表示反对称散射; a 、 b 、 c 和 d 表示复分解系数,具体可表示为

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{HH} + S_{VV}), \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{HH} - S_{VV}), \\ c = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{HV} + S_{VH}), \quad d = \frac{j}{\sqrt{2}}(S_{HV} - S_{VH}). \quad (5)$$

由 4 个分解系数之间的相对大小可以判定该散射中心的主散射机理。在静态情况下,绝大多数目标具有互易性,对应的极化散射矩阵为对称矩阵,所以 Pauli 分解的复分解系数中的反对称散射系数 d 恒为零。图 6 显示了基于 Pauli 基极化分解的归一化最大值投影成像结果,图 6(a)~(c) 分别展示了放置遮挡物的模型手枪目标全极化全息图像的 Pauli 基分解系数 $|a|^2 = |S_{HH} + S_{VV}|$ 、 $|b|^2 = |S_{HH} - S_{VV}|$ 和 $|c|^2 = |S_{HV} + S_{VH}|$ 的图像,图 6(d)~(f) 分别展示了未放置遮挡物的模型手枪目标全极化全息图像的 Pauli 基分解系数 $|a|^2 = |S_{HH} + S_{VV}|$ 、 $|b|^2 = |S_{HH} - S_{VV}|$ 和 $|c|^2 = |S_{HV} + S_{VH}|$ 的图像。

分布于图像四周的点目标可以在 Pauli 基分解结果中被有效区分,由于 $|a|^2$ 主要表示球体、平面和三面角的单次(或奇次)散射分量,在图 6(a)与图 6(d)的成像结果中,下方的两个三面角清晰可见,上方的两个二面角由于目标支撑杆等杂波背景对极化散射矩阵存在影响,仍然能看到目标,但能量已经减弱很多。同样地,从图 6(b)与图 6(e)的成像结果中可以有效地检测出 0° 二面角;从图 6(c)与图 6(f)的成像结果中可以有效地检测出 45° 二面角。对于成像中心区域的隐藏模型手枪而言,图 6(a)与图 6(d)

给出的 $|a|^2$ 的成像结果中的手枪轮廓最为明显,这也表明镜面反射等一次散射分量对获得目标结构和轮廓信息最有意义,在手枪部件的极化散射机制上,枪杆、枪体和击锤等光滑表面都主要以平面一次散射为主;图 6(b)、图 6(e)给出的 $|b|^2$ 成像结果与图 6(c)、图 6(f)给出的 $|c|^2$ 成像结果都在手枪相同位置出现了一个强的散射点,而在 $|a|^2$ 成像结果中,该位置相对临近像素的能量反而更弱,结合实际目标分析,这是手枪套筒位置的连续斜纹[图 3(c)],其散射机制以二面角散射为主,这也是该模型手枪目标交叉极化回波的主要贡献来源。 $|c|^2$ 成像结果中的相对背景杂波水平比 $|a|^2$ 和 $|b|^2$ 成像结果更低。从 Pauli 基分解结果来看,毛巾的遮挡对极化散射的影响不大,这是由于频率为 0.14 THz 的光在毛巾等衣物上仍然有很好的穿透性。但通过仔细比较仍能发现衣物的遮挡对背景杂波的纹理有一定影响,没有遮挡目标的 $|a|^2$ 成像结果相比于存在遮挡目标的结果更光滑,这是由于衣物的遮挡带来的插入相位增大了散斑噪声。

4.2 非相干分解

将得到的极化散射矩阵与典型目标散射矩阵(如 Pauli 矩阵)进行对比,可能得到目标的散射机制。但当全极化全息成像结果经多视相干斑抑制平均处理后,匹配结果将不再准确。在隐藏目标检测中,测量结果受散斑噪声、人体杂波及遮挡物的体散射效应的影响。采用非相干极化分解方法可以分析“分布式目标”的“平均”散射机制。当每个分辨单元内都存在一种主要的“散射机制”时,可进行极化相干矩阵的特征矢量分析,提供散射体的基不变描述。这就是在极化合成孔径雷达目标解译中常使用的 H/α 极化分解方法^[12]。利用该方法可获得隐藏目标散射中“主导”的散射机理,进而为人体隐藏目标检测与识别提供更多的信息量。

对 3 维图像中的每个分辨单元进行 Pauli 基复分解系数矢量化,可得到第 n 个子视数下的 4 维 Pauli 特征矢量:

$$\mathbf{k}(n) = [a(n) \quad b(n) \quad c(n) \quad d(n)]^T. \quad (6)$$

对于满足互易性的单站后向散射机制,忽略反对称散射系数的 $d(n)$,则 4 维 Pauli 特征矢量退化为 3 维 Pauli 特征矢量。计算第 n 个子视数下每个 3 维分辨单元的相关矩阵 $\mathbf{T}(n) = \mathbf{k}(n) \cdot \mathbf{k}^H(n)$,利用子视图像的相关矩阵可估计得到各像素单元的相关矩阵为

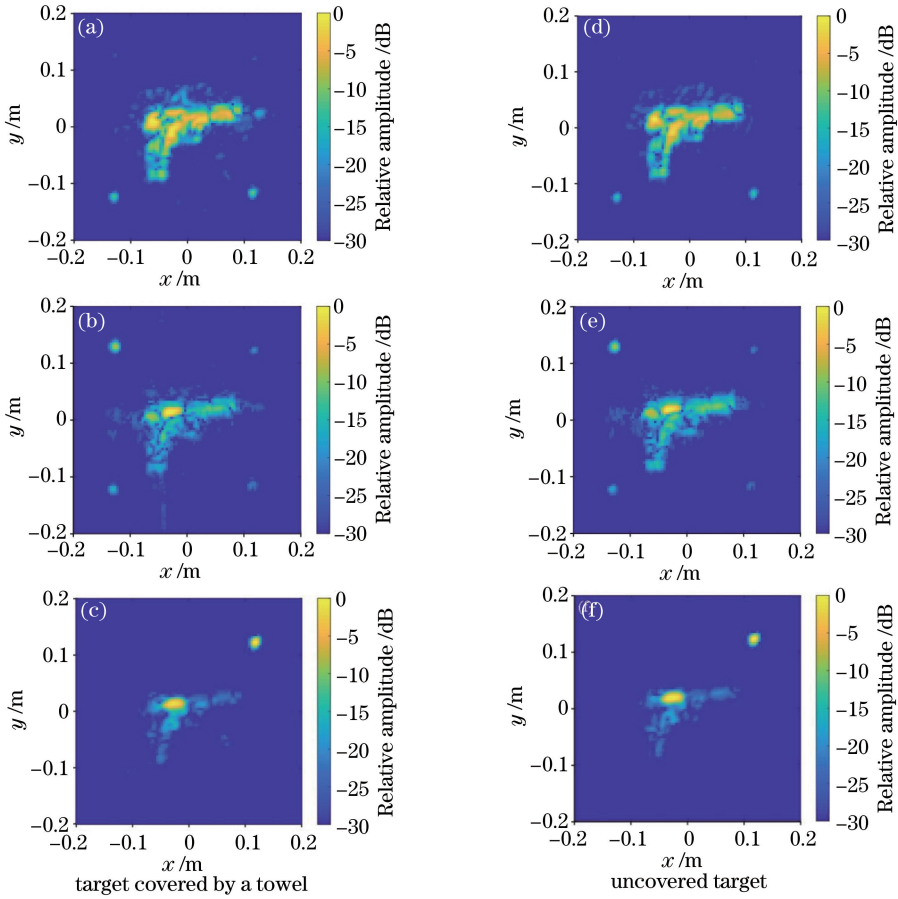


图 6 基于 Pauli 基极化分解的归一化最大值投影成像结果。(a)(d) $|a|^2 = |S_{HH} + S_{VV}|$;
(b)(e) $|b|^2 = |S_{HH} - S_{VV}|$; (c)(f) $|c|^2 = |S_{HV} + S_{VH}|$

Fig. 6 Normalized maximum projection imaging results by polarization decomposition based on Pauli basis.

(a)(d) $|a|^2 = |S_{HH} + S_{VV}|$; (b)(e) $|b|^2 = |S_{HH} - S_{VV}|$; (c)(f) $|c|^2 = |S_{HV} + S_{VH}|$

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{T}(n) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{T}(n). \quad (7)$$

将相关矩阵进行特征值分解,可得

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{u}_i^H, \quad (8)$$

式中: λ_i 表示第 i 个特征值,且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$; \mathbf{u}_i 表示归一化的第 i 个特征矢量。假设 \mathbf{u}_i 的第一个元素的幅度为 $\cos \alpha_i$,可以定义极化散射熵 H 为

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i. \quad (9)$$

定义极化散射参数 α 为

$$\alpha = p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 + p_3 \alpha_3, \quad (10)$$

式中: p_i 为特征矢量 \mathbf{u}_i 出现的伪概率,可定义为

$$p_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3). \quad (11)$$

H 取值于 $[0, 1]$,描述了目标散射随机性。 $H=0$,说明目标只有一种主要散射机理,相关矩阵只有一个特征值不为 0,此时处于完全极化状态;随着 H 的增大,去极化程度增加,表明目标散射机理

不再由单一散射过程构成;当 $H=1$ 时,所能获得的极化信息为 0,目标处于完全非极化状态,目标散射完全是一个随机噪声过程。

α 取值于 $[0, \pi/2]$,反映了目标的主散射机理。当 $\alpha=0$ 时,表明目标的主要散射机理是各向同性的表面散射; α 逐渐增加时,目标的散射机理由各向同性趋向各向异性; $\alpha=\pi/4$ 时为偶极子散射模型; $\alpha=\pi/2$ 时为二面角散射模型。图 7(a)、(c)展示了成像区域内的 S_{span} 沿距离最大值像素处的 H/α 分解投影结果的 H 。在成像区域内,存在人造目标的 H 小于空背景的成像系统噪声和旁瓣所带来的 H ,其 α 也在人造目标处连续变化,而不会像噪声区域剧烈起伏。所以,在 3 维极化成像目标分解之前,有必要先完成目标检测。图 7(b)、(d)展示了归一化 S_{span} 大于 -25 dB 区域的 H/α 分解投影结果的 α 。总体而言,实验中的二面角、三面角和手枪模型等人造目标的 H 小于 0.5,其极化散射在子孔径多视平均处理下是以低熵散射为主的极化散射,在目标轮

廓边沿或者散射机理发生突变之处会抬高, α 在二面角目标和手枪枪套斜纹理处接近 $\pi/2$, 该处为低熵二面角散射, 在其余位置 α 接近 0, 为低熵表面散

射。全极化目标分解与 3 维高分辨成像的有效结合, 给出了比成像强度更丰富的目标极化散射机制, 有利于改善隐藏目标检测和识别性能。

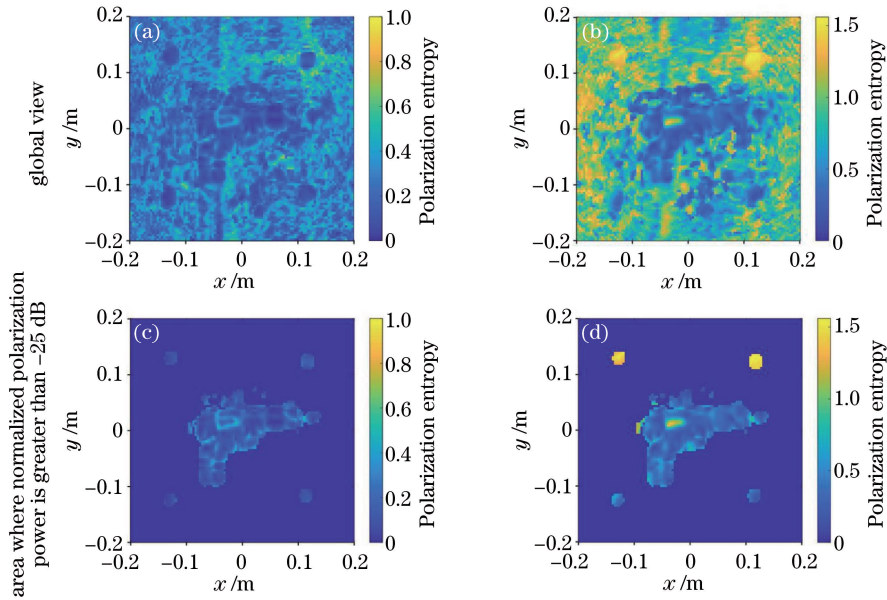


图 7 S_{span} 沿距离维最大值像素处的 H/α 分解投影结果。(a)(c) H ; (b)(d) α

Fig. 7 H/α decomposition projection results along range dimension pixel of maximum of S_{span} . (a)(c) H ; (b)(d) α

5 结 论

为改善太赫兹波站开式雷达系统对人体隐藏目标的检测和识别性能, 将全极化信息引入太赫兹波站开式全息雷达成像系统中, 开展了基于频率为 0.14 THz 的全极化雷达系统的隐藏目标太赫兹波全极化全息成像实验研究。对获得的 4 个通道全极化全息成像结果进行图像配准和极化校准, 获得 3 维图像的极化散射矩阵。在全孔径成像结果中, 对 S_{span} 沿距离维最大值像素的极化散射矩阵进行 Pauli 分解, 分析目标的低熵散射分量, 考察衣物遮挡对隐藏目标极化散射的影响; 在子孔径多视处理结果中, 对由不同子视图获得的极化相干矩阵进行 H/α 分解, 分析了典型隐藏目标的极化散射熵 H 和极化散射参数 α , 获得了由目标表面纹理起主要作用的目标极化散射机制。研究表明: 在 0.14 THz 频段, 典型衣物材料的遮挡会改变背景杂波的散斑样式, 但对强散射回波目标的极化散射影响很小; 以平滑表面为主的模型手枪的 H 较小, 在纹理改变处的 H 略有增加, 其主要极化散射机理为低熵表面散射, 而套筒上具有二面角结构的斜纹的散射机理为低熵多次散射, 这是该目标交叉极化回波的主要来源。所设计的频率为 0.14 THz 的站开式全极化全息雷达成像实验系统为进一步研制实际

系统提供了支撑, 但该频段下的典型违禁品在不同衣物和不同背景下的全极化散射机理仍有待进一步地研究。

参 考 文 献

- [1] Cheng B B, Li H P, An J F, *et al.* Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(6): 843-848.
成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6): 843-848.
- [2] Liu J, Jiang J, Cheng B B, *et al.* D-band transmittance of typical clothing [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0711001.
刘杰, 蒋均, 成彬彬, 等. 典型衣物的 D 波段透射率研究[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0711001.
- [3] Li Q, Ding S H, Yao R, *et al.* Experiments on continuous-wave terahertz reflection-mode imaging for concealed objects[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0811001.
李琦, 丁胜晖, 姚睿, 等. 隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0811001.
- [4] Harmer S, Bowring N, Andrews D, *et al.* A review of nonimaging stand-off concealed threat detection with millimeter-wave radar [application notes] [J].

- IEEE Microwave Magazine, 2012, 13(1): 160-167.
- [5] Blackhurst E, Salmon N, Southgate M. Full polarimetric millimetre wave radar for stand-off security screening[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10439: 1043906.
- [6] An J F, Cheng B B, Sang Z R, *et al.* Method of standoff detection of concealed body-worn targets based on radar polarization properties[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(7): 1612-1618.
安健飞, 成彬彬, 桑子儒, 等. 基于目标极化特性的人体隐藏危险品检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1612-1618.
- [7] Sheen D M, McMakin D L, Lechelt W M, *et al.* Circularly polarized millimeter-wave imaging for personnel screening[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5789: 117-127.
- [8] Robertson D A, Cassidy S L, Jones B, *et al.* Concealed threat detection with the IRAD sub-millimeter wave 3D imaging radar[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9078: 907805.
- [9] Soumekh M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms [M]. New York: Wiley, 1999.
- [10] Whitt M W, Ulaby F T, Polatin P, *et al.* A general polarimetric radar calibration technique [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(1): 62-67.
- [11] Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009.
- [12] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498-518.