

太赫兹频段粗糙面宽带一维距离像特性*

格根塔娜¹⁾²⁾ 钟凯^{1)2)†} 乔鸿展¹⁾²⁾ 张献中¹⁾²⁾
李吉宁¹⁾²⁾ 徐德刚¹⁾²⁾ 姚建铨¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

(2022年12月9日收到; 2023年7月2日收到修改稿)

基于太赫兹时域光谱技术搭建了近单站宽带太赫兹脉冲一维距离像的测量系统, 其距离分辨率可达亚毫米量级. 首先, 利用该系统测量了多种形状目标的一维距离像, 验证了测量系统的可靠性及通过目标的一维距离像中的散射特征位置分布来识别其外形特征的可行性. 进而, 通过测量不同粗糙度的铝板目标, 结合粗糙表面散射基尔霍夫近似和微扰法理论, 探究了目标表面粗糙度对于一维距离像强度及脉冲宽度的影响规律. 此外, 发现双站系统中一维距离像的时延与目标姿态的改变方向有关. 相关研究结果对太赫兹雷达目标探测与识别具有一定的指导意义.

关键词: 太赫兹雷达, 粗糙目标散射特性, 太赫兹时域光谱系统, 一维距离像

PACS: 41.20.Jb, 87.50.U-, 42.30.-d, 43.30.Hw

DOI: 10.7498/aps.72.20222347

1 引言

太赫兹 (terahertz 或 THz, 0.1—10 THz) 频段处于微波到红外的过渡频段, 覆盖了极大的带宽范围, 大量目标材料在太赫兹频段具有独特的色散特性, 并且部分介质材料的共振吸收峰落在该频段, 其色散关系具有一定突变性^[1-3]. 材料的色散特性可通过其散射特征来反映, 因此研究太赫兹频段目标散射特性, 不仅在民用的安保等领域具有广泛应用^[4], 在军用目标材料 (如涂覆材料) 的物性参数检测^[5] 和目标探测^[6] 等方面也具有重要科学意义和应用价值. 目标的散射特性主要包括雷达散射截面 (RCS)^[7]、双向反射分布函数 (BRDF)^[8] 和一维距离像^[9] 等.

一维距离像体现了目标的 RCS 在探测光入射方向随距离的分布, 通过其细节能够反推目标的形

状特征和姿态, 从而应用于判断军事目标是否携带武器、行进方向和速度等^[10]. Cheville 和 Daniel^[9] 最早报道了太赫兹频段的一维距离像研究, 测量了米格-29 战机缩比模型的脉冲一维距离像, 时间分辨率可达亚皮秒量级. Gente 等^[10] 利用光纤耦合的太赫兹时域光谱 (TDS) 系统, 对 F117 以及 Tornado 战机的缩比模型进行距离成像, 通过距离像特征峰可判断其是否携带导弹以及尾翼情况. 距离像分辨率主要取决于探测脉冲的脉宽, 脉宽越窄, 飞行时间测距精度越高, 频域带宽也越大, 因此距离像分辨率就越高. TDS 系统的发射和接收利用飞秒激光来激发电导天线实现, 太赫兹脉冲的时域脉宽极窄, 在距离分辨率上存在很大优势; 经过傅里叶变换后在频域具有大宽带, 使得目标一维距离像包含了丰富的太赫兹光谱特征. 梁达川等^[6] 搭建了太赫兹时域雷达系统, 测量了坦克目标缩比模型的宽带 RCS, 并进行了单频点 RCS 的提取, 实现了目

* 国家自然科学基金 (批准号: 62175184) 和微光机电系统技术教育部重点实验室开放课题 (批准号: 2022-04) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhongkai@tju.edu.cn

标侧面的时域一维距离成像。

目标的电磁波散射特性主要取决于目标物体的尺寸、形状、表面粗糙度、收发角度及材料介电参数等因素。多数目标的表面粗糙度在微米到百微米之间, 由于微波频段的波长较长, 根据全波法对全波段不同粗糙度金属球散射特性的计算结果可知^[11], 同等条件下微波频段的电磁散射特性对表面粗糙度的依赖性较小, 主要影响因素是目标材料的电磁色散性质; 而在太赫兹频段, 对于以金属作为主要材质的常见军事目标, 材料本身在太赫兹频段的介电参数变化不大, 由于波长与目标表面粗糙度相近, 粗糙度成为目标散射特性的主要影响因素。

在光学和微波频段, 目前已经有大量文献报道了粗糙表面散射特性的研究工作^[12–14], 相比而言, 由于太赫兹频段发射、接收、操控及材料特性等基础研究水平的限制, 太赫兹频段目标散射特性研究仍不充分, 尤其是粗糙面的影响研究较少^[15]。Dikmelik等^[16]实验测定了太赫兹频段不同粗糙度表面的后向散射系数曲线; 在理论上微扰法和积分方程法常用来拟合目标表面粗糙度和散射系数的关系^[17,18]。中国的牟媛、陈刚和高敬坤等^[19–22]对太赫兹频段粗糙金属、介质及完美导体的散射特性进行了理论仿真计算, 史杰等^[23]采用基尔霍夫近似法分析并测量了不同粗糙铝板在 2.52 THz 和 3.11 THz 入射下的峰值散射系数, 证明了峰值散射系数与粗糙度和频率的负相关性, 以及与入射角度的正相关性。清华大学的欧湛等^[24]采用微扰法建立散射成像模型, 分析了粗糙面散射对太赫兹雷达成像的影响, 得出材料粗糙度越大, 后向散射角越宽, 成像质量越好的结论。在粗糙目标的太赫兹频段一维距离像研究方面, 截止目前国内外并没有系统的理论和实验报道。考虑到目标表面粗糙度对散射峰值和角度分布等产生重大影响, 开展太赫兹频段粗糙面的一维距离像测量具有重要意义。

本文将 TDS 技术与雷达技术相结合, 充分发挥 TDS 系统发射的太赫兹脉冲的窄脉宽和宽频带优势, 搭建了近单站超宽带一维距离像实验装置, 利用金镜等简单目标测试了系统性能, 测量了不同形状铝合金目标的一维距离像特征, 并讨论了目标形状对于一维距离像的影响。基于不同表面粗糙度的铝合金平板, 结合粗糙度散射理论, 探究了太

赫兹频段超宽带一维距离像的粗糙度响应特性, 同时证明了微小的双站角对距离像的影响有限, 不会使测量结果产生较大误差。

2 超宽带太赫兹一维距离成像系统

以 ADVANTEST 公司生产的 TAS7500TS 太赫兹 TDS 系统作为基础, 搭建了超宽带太赫兹一维距离像测试装置, 如图 1 所示。其中, 利用 1550 nm 波段的光纤飞秒激光 (脉宽为 50 fs, 重频为 50 MHz, 平均功率为 20 mW) 激发电导天线 (TAS1110/TAS1230) 分别用于太赫兹脉冲的产生和探测。系统为紧缩场结构, 光电导天线发射端出射的太赫兹波束经离轴抛物面镜 (有效反射焦距为 50.8 mm, 口径为 50.8 mm, 离轴角为 90°) 准直后形成平行光, 入射到置于可调旋转台上的待测目标, 转台在水平面内旋转, 目标散射的太赫兹信号经同规格离轴抛物面镜聚焦后, 到达探测端的光电导天线被接收。收发两端离轴抛物面镜靠紧放置, 受调整架机械尺寸限制形成约为 9° 的双站角。为避免引入额外的背景噪声, 目标由对太赫兹波高透的聚四氟乙烯柱固定在转台上。此外, 为抑制空气中水蒸气对太赫兹波的吸收, 测量系统整体放置在亚克力密封罩中, 其中充入干燥空气, 湿度可控制在 5%RH (relative humidity) 以下。

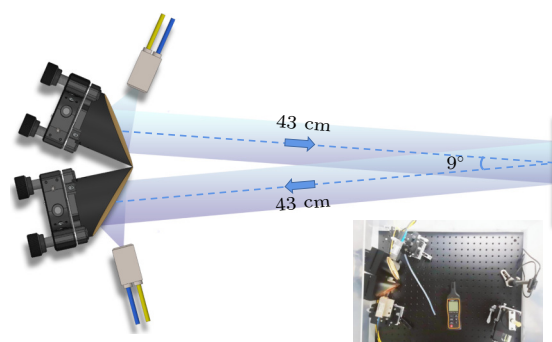


图 1 宽带太赫兹一维距离像测量系统

Fig. 1. Measurement system of broadband terahertz one-dimensional (1D) range profiles.

采用金镜作为参考目标, 测得的标准太赫兹时域反射信号如图 2(a) 所示, 其峰值强度为 280 mV, 信噪比约为 34.5 dB, 脉冲宽度表示为信号主峰由峰值下降至 0 的时域全宽 (后文中的脉宽描述与此相同), 为 0.52 ps。傅里叶变换后的频域信号如图 2(b) 所示, 可看出太赫兹光谱覆盖范围为 0.1—2.5 THz,

峰值频率约为 0.9 THz.

为测试系统的测量光斑大小及分辨率等参数,加工了台阶高度差 1 mm、每一阶宽度 3 mm、长度 30 mm 的阶梯形目标. 系统采样窗口最大为 300 ps, 为提高测量准确性, 实验中采样窗口设置为 120 ps, 采样精度为 0.02 ps, 采样平均次数为 2048 次. 测量时, 阶梯面竖直放置, 其时域一维距离像如图 3(a) 所示. 根据飞行时间测距原理, 相邻 2 个反射峰反演的距离与阶梯目标每阶的高度差 (1 mm) 的 2 倍相符, 证明了系统距离分辨率优于 1 mm, 即可达亚毫米量级; 光斑直径为峰值个数和每一阶宽度的乘积, 可得太赫兹光斑的空间分布在竖直方向宽度约为 4 cm, 强度在此方向上为近高斯分布. 每一阶散射信号的频谱分布如图 3(b) 所示, 由此可以获得太赫兹光斑的频谱分布规律: 沿着光斑半径方向由中心向外, 高频分量逐渐减少, 即高频分量主要集中在光斑中心, 发散角较小, 而边缘处低频分量占比较大, 低频部分的发散角较大.

3 简单体及其组合的太赫兹脉冲一维距离像

使用上述系统测量了不同形状简单体目标及其组合在特定姿态下的太赫兹脉冲一维距离像. 样品均为铝合金材质, 表面进行了光学抛光, 可被太赫兹光斑全覆盖, 测量过程中, 调整样品转台角度使目标表面法线方向与双站角的角平分线一致. 距离成像原理与激光脉冲飞行时间测距法类似, 在探测方向上的目标形状特征可通过太赫兹脉冲返回时间和强度的差异得到体现, 一维距离像中峰值的时间间隔为样品特征散射位置距离间隔的两倍, 峰值强度反映目标特征散射位置 RCS 大小. 实验结果如图 4 所示.

图 4(a) 是底面直径 3 cm、高 3 cm 的圆柱侧面的一维距离像, 其与平板目标的一维距离像类似, 为单个峰值. 圆柱侧面完全后向散射的 RCS 远小于同尺寸平板, 因此在一维距离像上其峰值也

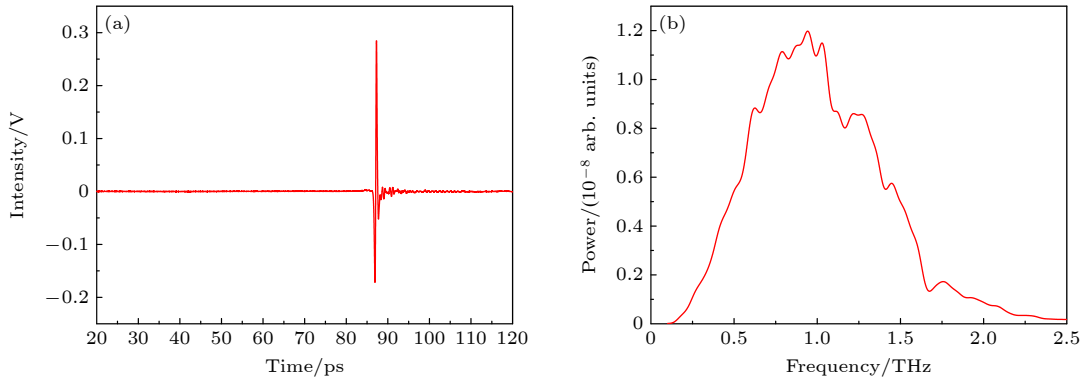


图 2 金镜反射信号 (a) 时域; (b) 频域

Fig. 2. Reflected signal of gold mirror: (a) Time domain; (b) frequency domain.

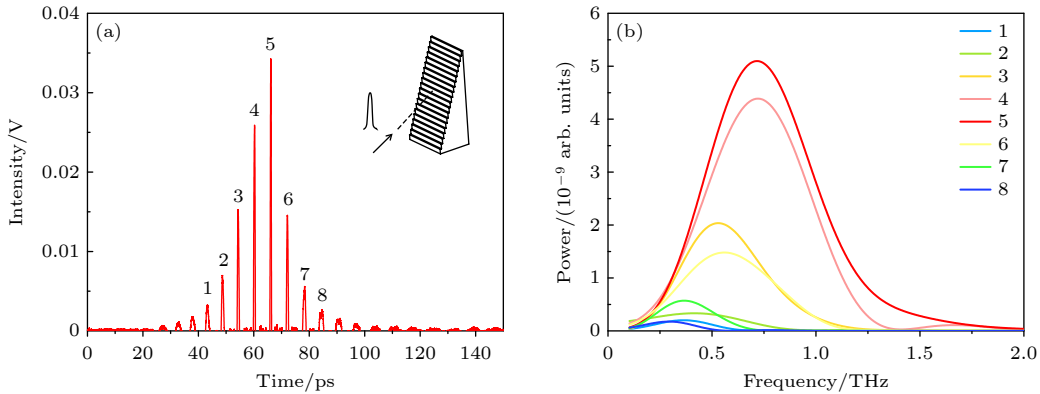


图 3 阶梯目标一维距离像 (a) 时域; (b) 频域

Fig. 3. 1D range profile of step: (a) Time domain; (b) frequency domain.

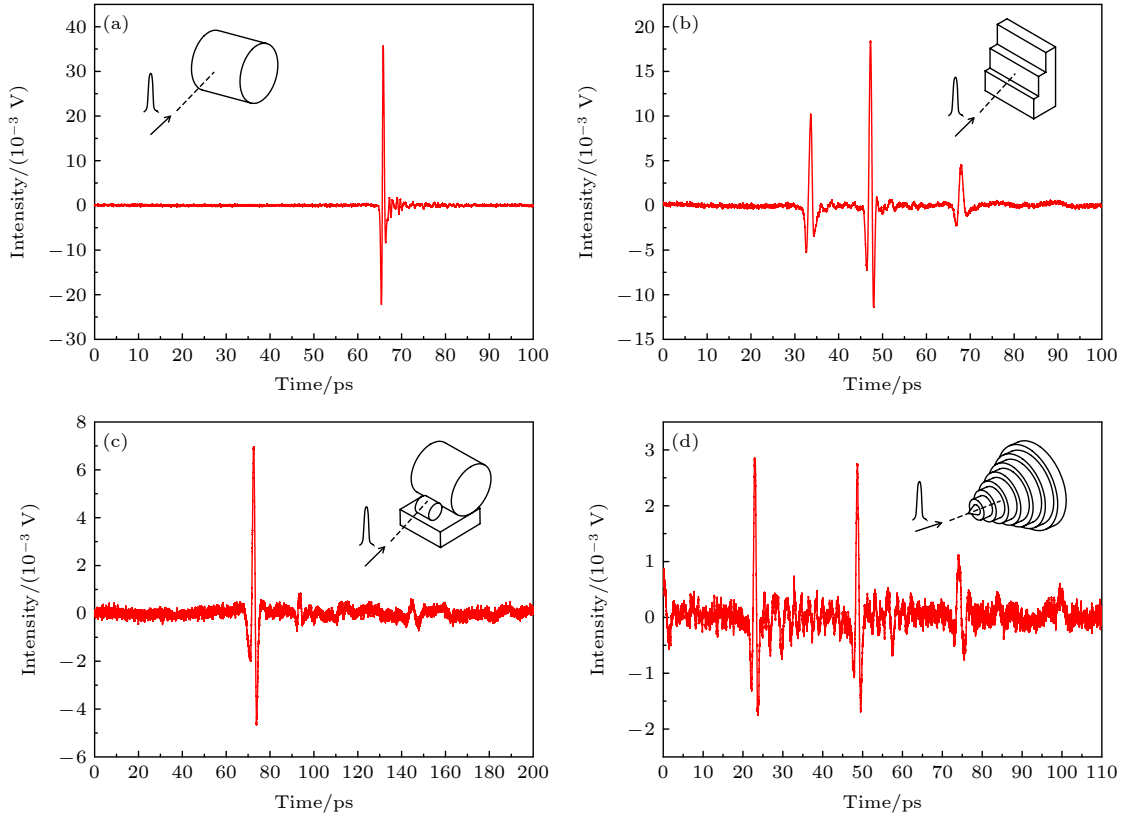


图 4 不同形状简单目标及其组合的一维距离像 (a) 圆柱; (b) 台阶体; (c) 组合体; (d) 阶梯圆锥

Fig. 4. 1D range profiles of different simple objects and their combination: (a) Cylinder; (b) step; (c) combination; (d) step cone.

明显减弱. 图 4(b) 为台阶体的一维距离像, 台阶体的 3 个散射平面的间距分别为 2 和 3 mm, 不同位置的散射平面在一维距离像上体现为不同采样时间处的峰值, 其中 3 个峰值的时间间距分别为 13.5 和 20.5 ps, 对应的探测距离间隔为 2.025 和 3.075 mm, 误差来自于采样精度的限制和双站角的影响. 强度分布呈现中间高两边低的趋势, 体现了太赫兹光斑在空间上的高斯分布特征. 图 4(c) 为组合体的测量结果, 组合体包含 3 cm×3 cm×1 cm 的平板、底面直径 3 cm、高 3 cm 的圆柱以及底面直径 1 cm、高 1 cm 的圆柱. 其一维距离像中的 3 个峰值分别来自组合体中平板矩形侧面、小圆柱侧面和大圆柱侧面, 其时间间隔与探测方向上各部分之间的距离互相对应. 由于组合体总尺寸较大, 2 个圆柱受高斯光斑边缘部分照射, 入射能量较低, 且圆柱侧面与平板侧面相比 RCS 较小, 因此后 2 个峰值的强度较低. 图 4(d) 为阶梯圆锥的一维距离像, 阶梯圆锥的台阶高度差为 4 mm, 直径从 4 mm 到 32 mm 以 4 mm 为步长等间距递增. 由于采样窗口的限制, 仅获得前 5 个台阶的散射特征峰, 相邻峰值的间隔与台阶高度差对应良

好, 峰值强度受竖直散射圆环面积和光斑强度的高斯分布共同影响.

所测样品在探测光方向的 RCS 分布以及形状特征均可通过其一维距离像中的峰值强度大小和出现位置得到表征.

4 粗糙金属平板的太赫兹脉冲一维距离像

目标表面的粗糙程度会对其散射特征产生影响, 对于一维距离像的影响主要体现在散射峰值强度和一维距离像脉宽展宽上. 接下来, 分别采用基尔霍夫近似法和微扰法来具体分析粗糙度对于太赫兹脉冲一维距离像的影响.

基尔霍夫近似散射理论最早由粗糙目标表面的电学雷达反射率统计数据得出, 该理论对粗糙目标表面具有以下适用条件: 目标表面均方根粗糙度 σ 小于波长 λ ; 目标表面材料是理想导体, 保证在表面完全光滑的情况下只存在镜面反射; 目标表面的粗糙度满足高斯分布规律; 表面的自协方差分布满足高斯型. 根据基尔霍夫近似, 在平行光入射

粗糙表面时, 反射光可认为由镜面反射和漫反射(散射)两部分组成^[25].

在微波及太赫兹波段, 常见金属材料可以认为是理想导体. 正入射时, 金属粗糙表面的反射率可以表示为

$$R = R_S + R_D = R_0 \exp \left[-(4\pi\sigma/\lambda)^2 \right] + R_0 \frac{2^5 \pi^4}{m^2} (\sigma/\lambda)^4 (\Delta\theta)^2, \quad (1)$$

其中, R_S 和 R_D 分别表示镜面反射率和漫反射率, R_0 是理想光滑表面的反射率. 金属的镜面反射率主要由表面均方根粗糙度 σ 和入射波长 λ 的比值决定, 而漫反射率的影响因素除上述比值外, 还包括表面粗糙度的均方根斜率 m 以及正入射接受角 $\Delta\theta$. 由 (1) 式可知, 当波长远大于目标表面均方根粗糙度, 即波长足够长时, 漫反射对于表面整体反射的影响可以忽略; 当接收角 $\Delta\theta$ 足够小, 而 R_S/R_0 相对较大时, 漫反射对于整体的影响也可忽略.

当入射波与表面呈一定角度, 即非正入射时, 金属粗糙表面的斜入射反射率可以表示为

$$R = R_S + R_D = R_0 \exp \left[-(4\pi\sigma/\lambda)^2 \cos^2 \theta \right] + R_0 \frac{2^5 \pi^4}{m^2} (\sigma/\lambda)^4 (\Delta\theta)^2 \cos^3 \theta \Delta\omega, \quad (2)$$

其中, θ 为入射角, $\Delta\omega$ 为接收立体角. 由此可得, 金属目标粗糙表面的散射强度影响因素包括表面粗糙度、入射角和入射波波长. 当漫反射分量可忽略时, 镜面反射对目标散射强度起主要贡献, 此时粗糙度越大、频率越高, 散射强度越小; 入射角越大, 散射强度越大. 若入射波长远大于表面均方根粗糙度, 即 $\lambda \gg \sigma$, 或近乎掠入射 (θ 接近 90°) 时, 粗糙面的反射率接近于理想光滑表面的镜面反射率. 例如, 对于微波雷达, 目标表面的粗糙度对于散射强度的影响则可忽略不计, 仅考虑镜面反射的影响即可. 而在太赫兹波段, 波长 λ 为几十微米至毫米量级, 和常见粗糙表面的 σ 值相当, (2) 式中镜反射分量的 e 指数项将对散射强度产生重要影响, 波长或粗糙度的改变会带来散射强度的显著变化.

选取表面粗糙度均方根高度分别为 0.3, 7, 12 和 20 μm 、尺寸均为 5 cm \times 5 cm 的铝合金平板样品进行实验. 将不同粗糙度铝合金平板分别置于

样品转台, 调整角度, 记录实现最大峰值强度的一维距离像结果, 与基于基尔霍夫近似理论计算的 0—25 μm 粗糙度表面的峰值散射系数曲线比较, 如图 5 所示. 其中, 理论计算选取的太赫兹频率为 0.9 THz, 与 TDS 发射光谱的峰值频率一致; 入射角设定为实验装置中双站角的一半, 即 4.5° .

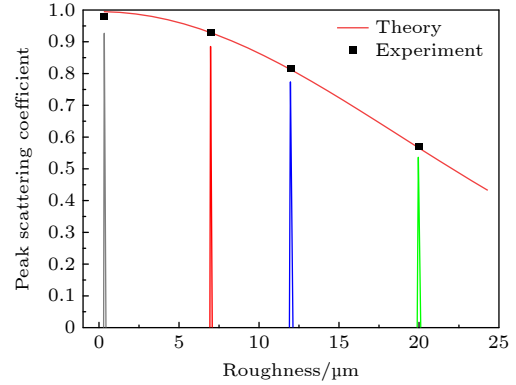


图 5 不同粗糙度铝合金平板的一维距离像实验与基尔霍夫近似理论对比结果. 其中理论计算中选取太赫兹频率为 0.9 THz, 光滑铝合金表面反射率设为 0.995

Fig. 5. Comparison of 1D range profile experimental results with Kirchhoff approximation theoretical results of Al plates with different surface roughness. The terahertz frequency is 0.9 THz and reflectance of smooth Al surface is 0.995 in theoretical calculation.

由图 5 可见, 铝合金平板的峰值散射强度随粗糙度增加呈现明显减小趋势, 散射强度与粗糙度负相关, 实验结果与理论计算曲线吻合良好. 当目标表面粗糙度为 0.3 μm 时, 实验测得的峰值散射系数接近理论中光滑表面的镜面反射率, 可以认为 0.3 μm 粗糙度的目标表面在太赫兹低频段 (0.1—2.5 THz) 可以按光滑处理. 当表面粗糙度增加为 20 μm 时, 峰值散射系数下降近一半, 而这一粗糙度范围与多数实际目标表面相当, 因此太赫兹频段目标特性对粗糙度非常敏感, 太赫兹雷达与微波雷达相比, 能够反映更多的目标表面细节信息. 此外, 从图 5 可以看出, 随着粗糙度增加, 回波信号脉冲宽度变大. 为探究这一问题, 进一步测量了不同入射角时粗糙铝板的一维距离像脉冲宽度变化, 如图 6 所示.

图 6 中横轴为入射角, 4.5° 对应目标铝板垂直于测量系统双站角的角平分线, 入射角 5.5° , 6.5° 和 7.5° 即目标铝板相对于原位置在水平面内分别旋转了 1° , 2° 和 3° ; 图 6 的纵轴为实验测得的不同粗糙度铝板的一维距离像信号的脉宽. 可见, 在不

同入射角下, 金属目标表面的粗糙度均可影响距离像曲线的形状, 具体体现为回波距离像时域脉冲的展宽. 对于同一粗糙度的目标, 随着入射角度的增大, 其一维距离像的脉宽增加; 同时, 在同一入射角度下, 粗糙度越大, 一维距离像脉宽的展宽也越明显. 因此, 通过一维距离像的脉宽变化可以在一定程度上反映平面目标的姿态信息.

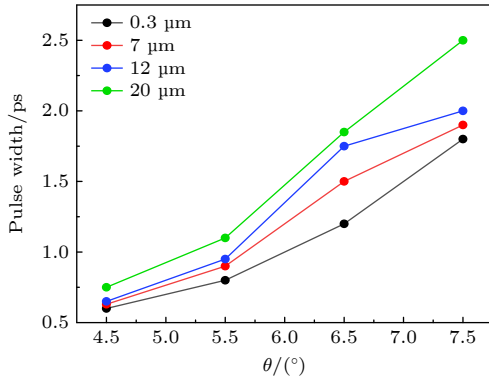


图 6 实验测得的不同粗糙度铝板一维像脉宽展宽与入射角度的关系

Fig. 6. Relationship between 1D profiles pulse widths of Al plates with different surface roughness and the incident angle.

采用微扰法来分析粗糙度对于目标一维距离像脉冲展宽的影响. 微扰法是建立在 Rayleigh 假设基础上的电磁散射计算近似方法, 适用于小粗糙度的表面^[26]. 当粗糙表面均方根高度 δ 远小于入射电磁波波长 λ , 且表面平均斜率与波数 $k = 2\pi/\lambda$ 和均方根高度 δ 之积处于同一数量级时, 粗糙面散射可用微扰法进行计算. 在入射角为 θ 时, 后向散射系数可表示为

$$\sigma_{\text{pq}} = 8k^4\delta^2\cos^4\theta|\alpha_{\text{pq}}|^2W(2k\sin\theta), \quad (3)$$

其中, α_{pq} 为极化系数.

绝大部分目标在任意姿态角下, 对不同极化波的散射是不同的, 本文中一维像测量系统中发射端和探测端的天线均为水平极化, 因此此处仅考虑水平极化过程, 极化系数 α_{pq} 可用 α_{HH} 代替:

$$\alpha_{\text{HH}} = \frac{1 - \varepsilon_r}{\left[\cos\theta + (\varepsilon_r - \sin\theta)^{1/2}\right]^2}, \quad (4)$$

其中, α_{HH} 是水平极化系数, ε_r 为目标材料的相对介电常数.

若目标粗糙表面的相关函数为高斯型, 其相应的各向同性粗糙面高斯谱为

$$W(2k\sin\theta) = \frac{1}{2}l^2\exp\left[-(kl\sin\theta)^2\right]. \quad (5)$$

与实验测量目标对应, 选取 δ 分别为 7, 12, 20 μm 的 3 种金属平板进行理论计算, 其相关长度 l 分别为 4.8, 2.4, 1.2 mm, 设定入射电磁波频率为 TDS 系统的峰值频率 0.9 THz, 目标相对介电常数 $\varepsilon_r = 10$, 代入 (3) 式可以计算后向散射系数与入射角的关系. 将其与各向同性的理想漫反射表面朗伯体, 以及小散射角 ($\theta_s = 0.1^\circ$)、散射系数为常数的理想光滑反射表面进行对比, 结果如图 7 所示. 可见, 后向散射系数曲线的宽度随粗糙度增大而增加, 即目标表面粗糙度越大, 漫反射特征越明显, 散射信号角度分布范围越广, 也就意味着系统可接收到更多方向上的散射回波. 各方向上的散射回波由于经过的光程不同, 在时域上到达探测光电导天线的时间有所区别, 因此一维距离像的脉冲展宽越显著.

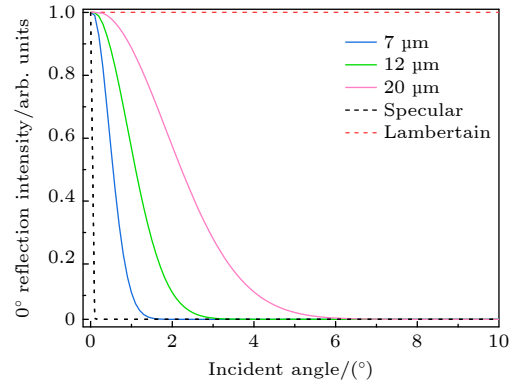


图 7 不同粗糙程度铝质表面后向散射系数与入射角度的关系

Fig. 7. Relationship between back scattering coefficient of Al surfaces with different roughness and the incident angle.

此外, 实验发现旋转目标铝合金平板使得一维距离像脉冲展宽的同时, 脉冲出现位置在时域上会发生前移, 如图 8 所示. 以目标铝板中线为轴心, 顺时针或逆时针旋转均会使一半的平板相对于平板原来所在平面发生前移, 因此其散射回波提前到达探测器, 脉冲前沿在时域窗口发生前移. 由于双站角的存在, 向入射角增大的逆时针方向旋转平板, 与顺时针旋转相比回波脉冲的前移量更大. 实验测得粗糙度为 7 μm 的太赫兹一维距离像如图 9 所示. 随着目标铝板和平板原来所在平面位置的偏角增大, 脉宽展宽量和前移量均增大.

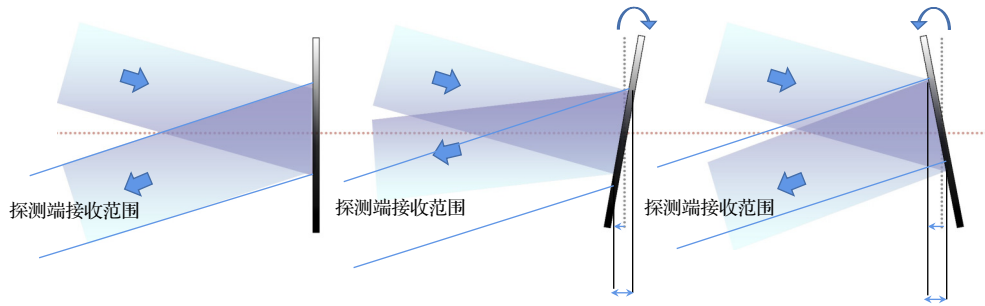


图 8 目标平板旋转示意图

Fig. 8. Schematic of objects rotation.

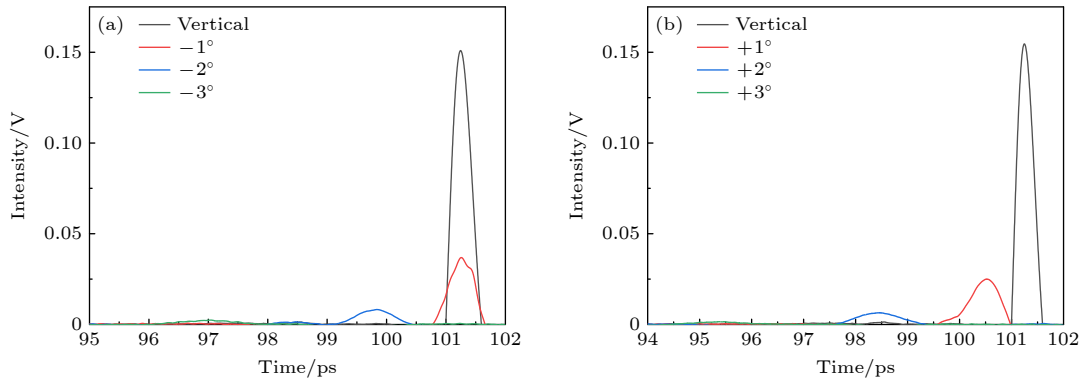


图 9 粗糙度为 $7\ \mu\text{m}$ 的粗糙铝合金平板在不同转角下的一维距离像. 其中, “-”代表顺时针, “+”代表逆时针

Fig. 9. 1D range profiles of Al plate with roughness of $7\ \mu\text{m}$ at different incident angle. “-” means clockwise, “+” means anticlockwise.

5 结 论

基于太赫兹 TDS 系统搭建了宽带太赫兹脉冲一维距离像测量系统, 其距离分辨率为亚毫米量级, 频率覆盖 $0.1\text{--}2.5\ \text{THz}$. 首先, 利用该系统实现了多种形状简单目标及组合一维距离像的测量, 距离像峰值位置与实际样品散射特征符合良好, 一维距离像可真实反映目标形状特征, 验证了系统的可靠性. 进而, 基于基尔霍夫近似和微扰法等理论, 研究了粗糙表面的散射特性, 通过理论计算与实验数据的对比, 总结了目标表面粗糙度对于其太赫兹脉冲一维距离像的影响规律: 目标表面粗糙度越大, 其太赫兹脉冲一维距离像的峰值强度越低, 且脉冲宽度发生展宽. 此外, 实验还发现, 在一定姿态角下一维距离像的特征峰也会发生展宽, 由于系统双站角的影响, 一维距离像峰值发生前移, 向远离探测方向旋转时前移量更大. 因此, 在研究特定问题, 或者测量特定形状的一维距离像时, 双站角的影响不可忽略. 本文宽带太赫兹一维距离像研究具有一定的指导意义, 相关结论可对太赫兹雷达目标探测与识别提供新的思路.

参考文献

- [1] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7146
- [2] Lee S, Baek S, Kim T T, Cho H, Lee S, Kang J H, Min B 2020 *Adv. Mater.* **32** 2000250
- [3] Naftaly M, Miles R E 2007 *Proc. IEEE* **95** 1658
- [4] Sheen D M, Fernandes J L, Tedeschi J R, McMakin D L, Jones A M, Lechelt W M, Severtsen R H 2013 *Proc. SPIE* **8715** 871509
- [5] Jiang Y S, Nie M Y, Zhang C H, Xin C W, Hua H Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024101 (in Chinese) [江月松, 聂梦瑶, 张崇辉, 辛灿伟, 华厚强 2015 物理学报 **64** 024101]
- [6] Liang D C, Wei M G, Gu J Q, Yin Z P, Ouyang C M, Tian Z, He M X, Han J G, Zhang W L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214102 (in Chinese) [梁达川, 魏明贵, 谷建强, 尹治平, 欧阳春梅, 田震, 何明霞, 韩家广, 张伟力 2014 物理学报 **63** 214102]
- [7] Jansen C, Krumbholz N, Geise R, Enders A, Koch M 2009 *3rd European Conference on Antennas and Propagation Berlin, Germany, March 23–27, 2009* p3645
- [8] Brooks L D, Wolfe W L 1980 *Proc. SPIE* **257** 177
- [9] Chevillon R A, Daniel R G 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 1960
- [10] Gente R, Jansen C, Geise R, Peters O, Gente M, Krumbholz N, Moller C, Busch S F, Koch M 2012 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **2** 424
- [11] Wang R H 2015 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [王瑞君 2015 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [12] Li Y, Tong L, Yang X, Li M 2018 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*

- Valencia, Spain, July 22–27, 2018 p2131
- [13] Li J, Guo L X, Zeng H 2008 *Prog. Electromagn. Res.* **88** 197
- [14] Jiang D, Xu X J 2010 *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* Sydney, Australia, September 20–24, 2010 p847
- [15] Erich N G, Nina P, Richard A C, Joshua G, David N 2017 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **7** 546
- [16] Dikmelik Y, Spicer J B, Fitch M J, Osiander R 2006 *Opt. Lett.* **31** 3653
- [17] DiGiovanni D A, Gatesman A J, Goyette T M, Giles R H 2014 *Proc. SPIE* **9078** 90780A
- [18] Wei J C, Chen H, Qin X, Cui T J, 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 3154
- [19] Gao J K, Wang R J, Deng B, Qin Y L, Wang H Q, Li X 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 975
- [20] Mou Y, Wu Z S, Zhao H, Wu G L 2018 *J. Radars* **7** 83 (in Chinese) [牟媛, 吴振森, 赵豪, 武光玲 2018 雷达学报 **7** 83]
- [21] Chen G, Dang H X, Tan X M, Chen H, Cui T J 2018 *J. Radars* **7** 75 (in Chinese) [陈刚, 党红杏, 谭小敏, 陈琿, 崔铁军 2018 雷达学报 **7** 75]
- [22] Jun C W, Chen H, Cui T J 2016 *Geoscience and Remote Sensing Symposium* Beijing, China, July 10–15, 2016 p3680
- [23] Shi J, Zhong K, Liu C, Wang M R, Qiao H Z, Li J N, Xu D G, Yao J Q 2018 *Infrared Laser Eng.* **47** 194 (in Chinese) [史杰, 钟凯, 刘楚, 王茂榕, 乔鸿展, 李吉宁, 徐德刚, 姚建铨 2018 红外与激光工程 **47** 194]
- [24] Ou Z, Zheng X P, Geng H 2019 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Technol.)* **59** 388 (in Chinese) [欧湛, 郑小平, 耿华 2019 清华大学学报 (自然科学版) **59** 388]
- [25] Bennett H E, Porteus J O 1961 *J. Opt. Soc. Am.* **51** 123
- [26] Guo L X, Wang R, Wu Z S 2010 *Basic Theories and Methods of Random Rough Surface Scattering* (Beijing: Science Press) p47 (in Chinese) [郭立新, 王蕊, 吴振森 2010 随机粗糙面散射的基本理论与方法 (北京: 科学出版社) 第 47 页]

Broadband one-dimensional range profiles characteristic of rough surface in terahertz band*

Gegen Tana¹⁾²⁾ Zhong Kai^{1)2)†} Qiao Hong-Zhan¹⁾²⁾ Zhang Xian-Zhong¹⁾²⁾
Li Ji-Ning¹⁾²⁾ Xu De-Gang¹⁾²⁾ Yao Jian-Quan¹⁾²⁾

1) (*School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 9 December 2022; revised manuscript received 2 July 2023)

Abstract

The one-dimensional (1D) range profile is an important back scattering characteristic of objective, which reveals the longitudinal distribution of radar cross section (RCS) along the detection beam. Since the shape and posture can be reflected by the 1D range profile, it is of great significance in military to determine the target orientation, velocity and whether it is armed. In this paper, broadband terahertz 1D-range-profile measurement system is built based on the time-domain spectroscopy (TDS) system. It is in bistatic configuration (bistatic angle of 9°) and the signal-to-noise ratio (SNR) is 34.5 dB, with a gold mirror used as a reflector. Benefiting from the ultrashort terahertz pulse width (full pulse width of 0.52 ps), the bandwidth covers the frequency range from 0.1 THz to 2.5 THz (peaked at 0.9 THz), corresponding to the range resolution on a submillimeter scale.

Firstly, the 1D range profiles of several objects in different shapes are measured, including the step, cylinder, step cone and their combination, which indicates that the geometric profile of the target in the detection direction is adequate to identify the shape feature of the target and proves the reliability of the 1D range profile measuring system based on TDS. Secondly, aluminum plates with different surface roughness in a range of 0–25 μm are also characterized. The Kirchhoff approximation theory and small perturbation method (SPM) are introduced to illustrate the characteristics of broadband terahertz 1D range profile related to the surface roughness of target. It is found that the scattering characteristic of metal object in the terahertz range is sensitive to surface roughness. If the surface roughness of the object is larger, the peak intensity of the 1D range profile will be weaker and the echo signal pulse width becomes wider. The rule is also applicable for the cases with different incident angles. Furthermore, it is revealed that the time delay of the 1D range profile in the bistatic system is related to the rotation direction of the target, which is useful in estimating the posture of the target. In summary, the characteristics of 1D range profile for metal objects relating to shape, surface roughness and posture are studied. The conclusions have certain guiding significance for the target detection and recognition of terahertz radar.

Keywords: terahertz radar, rough surface scattering characteristic, terahertz time-domain spectroscopy system, one-dimensional range profile

PACS: 41.20.Jb, 87.50.U–, 42.30.–d, 43.30.Hw

DOI: [10.7498/aps.72.20222347](https://doi.org/10.7498/aps.72.20222347)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62175184) and the Open Fund of the Key Laboratory of Micro Opto-electro Mechanical System Technology, Ministry of Education (Grant No. 2022-04).

† Corresponding author. E-mail: zhongkai@tju.edu.cn



太赫兹频段粗糙面宽带一维距离像特性

格格塔娜 钟凯 乔鸿展 张献中 李吉宁 徐德刚 姚建铨

Broadband one-dimensional range profiles characteristic of rough surface in terahertz band

Gegen Tana Zhong Kai Qiao Hong-Zhan Zhang Xian-Zhong Li Ji-Ning Xu De-Gang Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 184101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222347

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222347>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

α -乳糖水溶液太赫兹吸收光谱实验研究及模拟分析

Experimental study and simulation analysis of terahertz absorption spectra of α -lactose aqueous solution

物理学报. 2021, 70(24): 243202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211716>

太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

风洞模拟等离子体绕流场回波频谱调制特性实验研究

Echo spectrum modulation characteristics of plasma flow field simulated by wind tunnel

物理学报. 2022, 71(3): 035203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211471>

太赫兹时域光谱中脉冲太赫兹波全息探测

Holographic detection of pulsed terahertz waves in terahertz time-domain spectroscopy

物理学报. 2022, 71(18): 188704 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220983>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

基于自适应随机共振理论的太赫兹雷达信号检测方法

Adaptive stochastic resonance system in terahertz radar signal detection

物理学报. 2018, 67(16): 160502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172367>