

基于相关视角多视校正的太赫兹阵列雷达散斑抑制方法

经文¹, 崔振茂², 成彬彬², 江舸¹, 张健^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200)

摘要: 在针对人体安检的站开式太赫兹阵列雷达三维成像中, 散斑效应严重影响了对体表隐藏违禁品的检测和识别性能, 为此, 对全息散斑进行有效抑制有着迫切的需要。利用目标旋转带来的角度自由度, 结合目标散射对角度的敏感性, 提出了一种基于相关视角多视校正的太赫兹全息雷达散斑抑制方法。在理论上推导了全息雷达散斑强度在相关角度照射下的归一化协方差表达式, 给出了相关视角多视处理后的散斑对比度。在实验上利用 340 GHz 站开式 MIMO 阵列成像系统的快速成像的优势, 对低速旋转目标在相关视角下的单视成像结果进行成像空间旋转校正、目标配准和多视处理。处理后散斑对比度降低至单视散斑的 44%, 散斑得到了有效抑制, 目标轮廓明显, 细节更加丰富。该方法能够在不增加系统复杂度的条件下有效抑制散斑噪声, 实现图像增强。

关键词: 太赫兹雷达; 散斑抑制; 多视处理; 相关散斑

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0125005

Terahertz holographic radar speckle suppression method based on multi-look correction of correlation angle

Jing Wen¹, Cui Zhenmao², Cheng Binbin², Jiang Ge¹, Zhang Jian^{1,2}

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China)

Abstract: In the MIMO based terahertz three-dimensional imaging radar for human security screening, the speckle effect affects the detection and recognition performance of hidden contraband seriously. For this reason, effective suppression of terahertz holographic speckle is demanded urgently. By using the angle based degree of freedom for speckle suppression obtained by the target rotation, a terahertz holographic radar speckle suppression method based on multi-look correction of correlation angle was proposed. Meanwhile, the angle sensitivity of the target scattering was carefully considered. In theory, the normalized covariance expression of the holographic radar speckle intensity under the relevant angle illumination was derived, and the speckle contrast after multi-view processing was given. Experimentally, based on the fast speed of the 340 GHz MIMO based imaging system, single-look images of low-speed rotating target were obtained. The imaging space rotation correction, target registration and multi-look processing were performed on each single-look image under the relevant

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB755406); 国家自然科学基金(61601424)

作者简介: 经文(1989-), 男, 博士生, 主要从事太赫兹雷达成像方面的研究。Email: marty1865@foxmail.com

导师简介: 张健(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事太赫兹技术方面的研究。Email: zhangjian@mtrc.ac.cn

viewing angle. The speckle contrast of the averaged reconstructed image was reduced to 44% of a single reconstructed image. The processed speckle was effectively suppressed with distinct target contour and details. The proposed method can effectively suppress speckle noise and achieve image enhancement without increasing system complexity.

Key words: terahertz radar; speckle reduction; multi-look processing; speckle correlation

0 引言

站开式太赫兹阵列雷达三维快速成像技术是一种能够远距离获得人体体表隐藏目标成像结果,快速检测和识别人体携带违禁品的新体制人体安检成像技术^[1-2]。太赫兹波是频率范围在 0.1~10 THz 的电磁波,由于太赫兹低频段(0.1~0.7 THz)对衣物穿透性良好,对人体无致电离辐射,且相较于毫米波频率更高,可以在更小的成像孔径支撑角下能获得很高的成像分辨率,能够实现远距离人体隐藏目标高分辨成像^[3]。利用阵列成像技术可以突破基于准光设计的逐点机械扫描在成像速度上的限制,实现快速成像。但是,对复杂粗糙三维目标的太赫兹阵列雷达成像所带来的散斑噪声^[4]给人体隐藏违禁目标的检测和识别带来严重困难。因此,对太赫兹阵列雷达三维全息成像中的散斑进行有效抑制有着迫切需求并受到了国内外研究学者的广泛关注。

基于光学方法的散斑抑制是在系统设计上增加散斑抑制自由度来获得多张不相关的成像结果,再通过非相干叠加抑制散斑,由此利用更多的信息维度将带来额外散斑抑制增益效果。散斑抑制自由度主要包括相位多样性、频率多样性和角度多样性等。对于全息雷达成像系统,在相位多样性上,I. Jaeger 等利用机械移动 Hadamard 掩模或频率选择表面来获得经 Hadamard 矩阵相位调制的成像结果,通过非相干叠加抑制散斑^[5],但收发阵元数目很大时高阶 Hadamard 掩模难以设计,机械移动会降低成像速度,频率选择表面则受到带宽限制;在频率多样性上,Jaeger 指出两个单频散斑成像结果非相干叠加对散斑的抑制效果随频率差的增大而提升^[6],但将原系统分割成多个子频带,非相干叠加后将带来距离分辨率的损失;在角度多样性的获得上,合成孔径雷达成像中广泛应用多视处理抑制散斑,但在孔径有限的条件下,对子孔径图像进行多视处理将损失

成像分辨率。在激光成像中,角度多样性散斑抑制主要通过改变入射到屏幕上的角度使散斑图样发生变化^[7]。在太赫兹全息成像中,D. T. Patkie 通过 643.2 GHz 接收机前加入模式混合器^[8],M. A. Patrick 利用模式混合器和旋转摆镜改变入射角度^[9-10],获得多角度照射下太赫兹目标图像,但改变聚焦光路的方法难以应用于阵列雷达成像系统。因此,在不改变成像光路或牺牲成像分辨率的条件下,太赫兹阵列雷达成像系统仍然缺乏有效的散斑抑制方法。

文中针对站开式太赫兹阵列雷达三维快速成像系统的散斑抑制问题,利用目标旋转获得的散斑抑制角度自由度,提出了一种基于相关视角目标旋转校正多视处理的散斑抑制方法。首先考察在太赫兹雷达三维成像中散斑对照射角度的依赖性,建立了全息雷达散斑强度归一化协方差与照射角度的关系。结合复杂目标散射对照射角度敏感性,该方法选取散斑尚未完全去相关的小角度变化间隔,推导了在相关视角下子视图多视处理后散斑对比度的表达式。通过快速获得旋转目标在多个相关视角照射下的单视成像数据,对单视成像图像进行旋转校正、图像配准和多视处理,在不改变成像系统光路或牺牲成像分辨率条件下实现散斑抑制。最后,利用 340 GHz 站开式稀疏 MIMO 阵列实时成像系统的实测处理结果证明了该方法的有效性。

1 基于角度多样性的太赫兹全息散斑抑制

1.1 太赫兹全息散斑的角度依赖性

利用站开式太赫兹三维成像系统对粗糙面目标进行成像时,收发天线距离较近,可以视为收发同置。通过改变成像系统的入射方向,使获得的散斑图样发生变化,当角度足够大时,可以使两幅不同角度的全息成像散斑图样去相关。全息散斑对角度的依赖性可以用不同角度照射下,两个由粗糙面散射引起的全息散斑图样的强度归一化协方差来反映。

在粗糙面目标表面建立局部坐标系 (α, β, z) , 如图 1 所示。在频率不变、收发同置的条件下, 忽略在阵列孔径波束域支撑区 K 内照射角度的变化, 则平均的散射波矢为 $\mathbf{q} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i = 2\mathbf{k}_s$, \mathbf{k}_s 的长度 $k_s = 2\pi f/c$, 其中 f 为成像系统的中心频率, c 为自由空间光速, 进一步将散射波矢 \mathbf{q} 分解为横向分量和垂直分量:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_t + q_z \hat{\mathbf{z}} \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{z}}$ 为垂直于平面 (α, β, z) 的单位矢量; \mathbf{q}_t 为 \mathbf{q} 的横向分量。

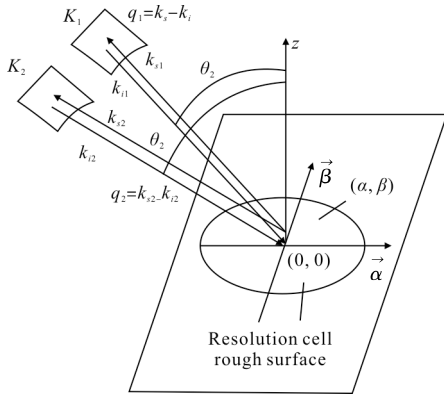


图 1 粗糙面目标在多角度照射下的局部坐标系

Fig.1 Local coordinate system for rough surface scattered by multi-angle illumination

粗糙表面位于 $z=0$ 平面附近, 高度起伏函数为 $h(\alpha, \beta)$, 假设随机粗糙面是平稳的, 不同角度照射下的全息成像散斑统计可以用坐标 $(0,0)$ 处的成像结果的统计来刻画, 进而研究两个散斑图样的相关程度。定义两次成像在坐标 $(0,0)$ 处的成像结果的归一化交叉相关函数为 μ_A , 它表征全息成像中的散斑对角度的依赖性, 此时^[11]:

$$\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) = M_h(\Delta\mathbf{q}_z) \Psi(\Delta\mathbf{q}_t) \quad (2)$$

假设成像系统 K_1 与 K_2 的入射方向位于 (α, z) 平面内, 那么 \mathbf{q} 的横向分量 \mathbf{q}_t 沿 $\hat{\alpha}$ 方向, 入射角为 θ_1 和 θ_2 , 夹角 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, 有:

$$\begin{aligned} \Delta q_z &= \frac{4\pi}{\lambda} [\cos\theta_2 - \cos\theta_1] \\ \Delta\mathbf{q}_t &= \Delta q_z \hat{\alpha} = \frac{4\pi}{\lambda} [\sin\theta_2 - \sin\theta_1] \hat{\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

对于一个高度涨落为高斯分布的表面:

$$M_h(\Delta\mathbf{q}_z) = \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2 \Delta\mathbf{q}_z^2\right) \approx$$

$$\exp\left(-8\pi^2 \left(\frac{\delta^2}{\lambda}\right) \Delta\theta^2 \sin^2 \theta\right) \quad (4)$$

式中: δ 为高斯粗糙面的均方根高度; $M_h(\Delta\mathbf{q}_z)$ 取决于照射角度、旋转角度以及粗糙面均方根高度和波长的比, 当粗糙面的均方根高度相比于波长很大时, 很小的角度变化也能引起散斑图样去相关。另一方面:

$$\Psi(\Delta\mathbf{q}_t) = \frac{\iint_{\Omega} |I(\alpha, \beta)|^2 \exp(-j(\Delta q_\alpha \alpha + \Delta q_\beta \beta)) d\alpha d\beta}{\iint_{\Omega} |I(\alpha, \beta)|^2 d\alpha d\beta} \quad (5)$$

式中: $I(\alpha, \beta)$ 是当入射角为 θ_1 时, 位于 $(0,0)$ 处点目标成像结果在成像平面 (α, β) 上的投影, 即成像系统的点目标扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 在成像平面 (α, β) 上的投影。对太赫兹全息雷达成像系统, PSF 近似为三维上解耦的 sinc 函数的乘积, 即 $\text{PSF}(\mathbf{r}) \approx \text{sinc}(\alpha/\delta_\alpha) \text{sinc}(\beta/\delta_\beta) \text{sinc}(z/\delta_z)$, 其中 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$, $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_z$ 分别 α, β 和 z 方向成像分辨率。当入射角 θ 不会引起距离单元的限制时, PSF 在成像平面 (α, β) 上的投影主要由 $\delta_\alpha, \delta_\beta$ 决定, 即:

$$I(\alpha, \beta) = \text{sinc}(\alpha/(\delta_\alpha/\cos\theta)) \text{sinc}(\beta/(\delta_\beta)) \quad (6)$$

其中, 成像分辨率 $\delta_\alpha, \delta_\beta$ 波束域谱窗函数在 α, β 上的分量利用傅里叶变换关系给出, 若成像系统在 α, β 方向上的波束域支撑角分别为 θ_α 和 θ_β , 那么:

$$\delta_i = \lambda/4\sin(\theta_i/2), \quad i = \alpha, \beta \quad (7)$$

将 $\Delta\mathbf{q}_z, \Delta\mathbf{q}_t$ 和 $I(\alpha, \beta)$ 的结果代入公式 (5) 中, 可以计算得到:

$$\Psi(\Delta\mathbf{q}_t) \approx \begin{cases} 1 - \frac{|\Delta\theta|}{2\sin(\theta_\alpha/2)}, & |\Delta\theta| < \theta_\alpha \\ 0, & |\Delta\theta| \geq \theta_\alpha \end{cases} \quad (8)$$

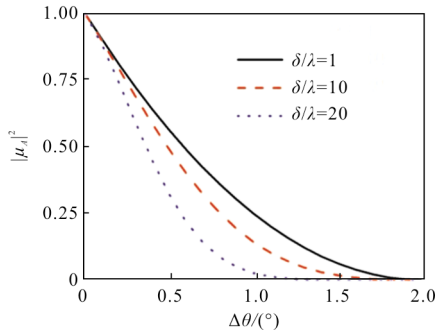
将公式 (4)、(8) 代入公式 (2) 中, 可以得到全息雷达在对粗糙目标的入射角度变化条件下散斑图样的归一化交叉相关函数:

$$\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) = \begin{cases} (1 - |\Delta\theta|/2\sin(\theta_\alpha/2)) \cdot \exp(-8\pi^2 \delta^2 \Delta\theta^2 \sin^2 \theta/\lambda^2), & |\Delta\theta| < \theta_\alpha \\ 0, & |\Delta\theta| \geq \theta_\alpha \end{cases} \quad (9)$$

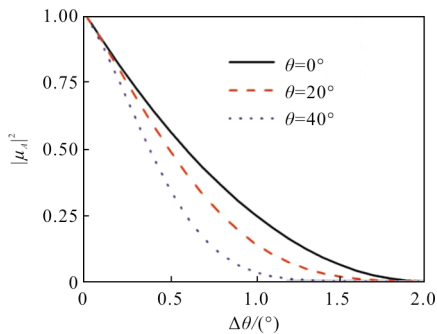
强度的归一化协方差定义为 $|\mu_A|^2$ 。 $|\mu_A|^2$ 反映了两个散斑图样的相关性, 从公式 (9) 可知, 当角度变

化 $\Delta\theta$ 大于波束域支撑角时,散斑图样的强度相关降低至 0。在 $|\mu_A|^2$ 的表达式中未出现 β ,是因为在成像场景设置中,假设入射方向沿 (α, z) 平面,即在 β 方向是垂直入射的,其影响在归一化中被去除,如果入射方向在 β 方向的变化存在,那么强度归一化协方差的表达式中将包含 β 。

假设波束域支撑角 θ_α 和 θ_β 均为 2° ,全息雷达成像散斑强度图样的归一化协方差 $|\mu_A|^2$ 在不同粗糙面均方根高度 δ 、入射角 θ 下,与照射角改变量 $\Delta\theta$ 的关系如图 2 所示。当粗糙度比较小或者 θ 接近 0° 时, $|\mathbf{M}_h(\Delta\mathbf{q}_z)|^2 \approx 1$,散斑图样强度相关对照射角改变量 $\Delta\theta$ 的敏感度主要由 $|\Psi(\Delta\mathbf{q}_t)|^2$ 支配,当粗糙度均方根高度 δ 和入射角 θ 比较大时, $|\mathbf{M}_h(\Delta\mathbf{q}_z)|^2$ 开始起作用,而且随着粗糙度均方根高度 δ 和入射角 θ 的增大,散斑强度图样的去相关所需要旋转的角度越小。



(a) 不同粗糙面均方根高度 δ
(a) Under different RMS height δ of rough surface



(b) 不同入射角度 θ (波束域支撑角为 2°)
(b) Under different illumination angle (the angle subtended by the aperture is 2°)

图 2 散斑强度归一化协方差 $|\mu_A|^2$ 与角度改变量 $\Delta\theta$ 的关系
Fig.2 Relation between normalized covariance of speckle intensity $|\mu_A|^2$ and variation of illumination angle $\Delta\theta$

散斑对比度能有效评估散斑的噪声水平,定义为:

$$C = \sigma_I / \mu_I \quad (10)$$

式中: I 为散斑的强度, $I = A^2$; σ_I 为散斑图样强度的标准差; μ_I 为散斑图样强度的均值; C 为散斑图样中强度涨落水平与平均强度的比值,一般在 0~1 之间取值。当 $C=1$ 时,强度涨落与平均值有相同的水平,此时散斑噪声十分严重;若 $C=0$,则代表几乎没有散斑噪声。假设第 k 个照射角度下的散斑强度为 $I_k (k=1 \dots L)$, L 为视数,对于均匀粗糙漫射体,散斑强度服从负指数分布,单视散斑强度图像的对比度 $C=1$ 。若 I_k 间独立同均值,那么 L 视处理后的平均强度 I_s 的散斑对比度将下降为 I_k 散斑对比度的 $1/\sqrt{L}$,图像的信噪比提高 \sqrt{L} 倍。若 I_k 是相互独立但均值 μ_k 不同, L 视的平均强度 I_s 的散斑对比度为:

$$C = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L \mu_k^2}{\sum_{k=1}^L \mu_k}} \quad (11)$$

公式(11)表明,当各单视强度统计独立且均值 μ_k 相同时, L 视的平均强度 I_s 的散斑对比度达到最小值 $1/\sqrt{L}$,散斑抑制效果最好;当各单视强度均值 μ_k 不同时, L 视散斑对比度将大于 $1/\sqrt{L}$,散斑抑制效果变差。

当散斑强度图像中被平均的各视之间存在相关性时, L 个相关的散斑图样的和可以变换为 L 个不相关的散斑图样的和,和的总平均强度在这个变换下保持不变,但构成和的各个特定的平均强度一般会发生明显变化。因此,存在相关性或强度均值变化较大的散斑强度图样通过多视叠加的散斑对比度不能达到理想的散斑抑制水平。若相关散斑图样的强度均值相同,利用公式(9)的结果可以获得散斑图样的归一化交叉相关矩阵 $[\mu_A(\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_n)]$,假设其本征值为 λ_k , L 视处理后的散斑对比度为:

$$C = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L \lambda_k^2}{\sum_{k=1}^L \lambda_k}} \quad (12)$$

1.2 基于相关视角多视校正的散斑抑制方法

利用站开式太赫兹阵列雷达三维成像系统能够快速获得单视成像数据的优势,通过目标的旋转获得散斑抑制的角度多样性。目标沿垂直方向的旋转

轴低速旋转,对于快速成像扫描系统而言,在获得的每一张单视回波数据过程中,可视目标静止。

利用多张旋转目标单视成像结果进行多视叠加需要解决两个问题,一是旋转角速度的选择,二是不同视角单视结果的旋转校正。

对于目标旋转角度的选择,由公式(9)可知,在目标表面粗糙度与成像系统工作频率接近时,去相关角度将接近成像孔径到目标的孔径波束域支撑角。大的旋转角度虽然能够降低散斑图样间的相关性,但由于三维复杂目标散射对照射角度敏感,尤其是在垂直照射方向附近的目標,使得相同位置的图像强度随大角度后有很大的起伏。由公式(11)可知,当散斑强度均值的起伏很大时,多视叠加后的散斑主要由散斑强度均值较大视角下的单视图像所决定,散斑抑制效果受到限制甚至达不到散斑抑制的效果。此时,只能选择相关视角下的单视图像做多视处理。在小角度旋转的相关视角下,L视处理后的散斑对比度由公式(12)给出。

对于旋转目标单视成像的校正,假设第一张单视成像数据获取时目标的初始角度为 0° ,每两次单视数据获取间目标旋转角度为 φ ,则第 n 张单视成像数据获取时目标的角度为 $(n-1)\varphi$,对第 n 张单视三维成像结果的坐标网格按目标旋转轴做角度为 $-(n-1)\varphi$ 的旋转变换,对旋转变换后的成像结果,利用特显点进行图像像素配准,并沿距离方向做最大值投影,通过多视叠加抑制散斑。因此,只需要将目标放置在转动速度很低的转台上,即可在不增加系统复杂度的条件下,以成像时间为代价,获得散斑抑制的角度自由度。

2 基于 340 GHz 站开式阵列雷达的旋转目标散斑抑制实验

2.1 实验装置

基于角度多样性的340 GHz 站开式 MIMO 雷达实时阵列成像系统如图 3 所示,成像系统主要由 340 GHz 宽带 MIMO 收发阵列、椭圆柱面反射镜、扫描摆镜等部分组成。该成像系统在椭圆柱面反射镜的一个焦点处发射太赫兹频段高斯波束,在另一个焦点处聚焦为带状波束,再在原焦点处接收目标反射或散射回波,借助扫描摆镜的高速旋转实现对目

标竖直维的聚焦和扫描;在每个特定的扫描位置上,通过水平放置的 4 发 16 收的稀疏 MIMO 阵,收发宽带线性调频连续波信号,利用虚拟阵元技术和合成孔径成像原理实现二维高分辨重构,最后将所有的扫描结果合成目标的三维图像重建结果。关于系统的细致分析见参考文献[12]。该站开式太赫兹全息成像系统能够在 4 m 处实现 12 mm(高) \times 14 mm(宽) \times 9 mm(深)的成像分辨率,对 2 m(高) \times 0.8 m(宽) \times 0.8 m(深)的立体区域内的目标进行三维成像重建,成像数据采集速度可达到 4 Hz,并有望进一步提高成像采集速度。

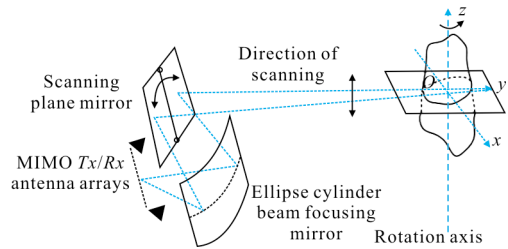


图 3 旋转目标三维成像系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the 3D imaging system for rotation target

2.2 数据处理

在每一个扫描平面上,稀疏 MIMO 阵列记录的回波数据记录了目标的频谱信息,可以利用后向投影算法、快速傅里叶变换法或基于 Burg 等现代功率谱估计方法^[2]对目标的频谱做出精确的估计和反演,实现目标空间散射系数的重构。由于 BP 算法是一种适用于任意阵型的精确成像算法,这里仅以 BP 成像结果作为单视成像算法。利用目标的特显点和旋转角的先验信息,确定成像位置的三维空间坐标旋转变换矩阵,实现单视图像的坐标配准。利用相关因子法^[13]抑制方位向由于阵列稀疏导致的高旁瓣问题,获得旋转校准后的单视图像,进而实现多视叠加。

对于 N_t 个发射、 N_r 个接收天线中的每一个收发天线对的位置 r_t 、 r_r ,假设天线能对成像区域充分照射,忽略天线方向图对照射角度的影响,忽略传输衰减,设成像区域中任意一点 r 的反射系数为 $\sigma(r)$,收发天线对 (r_t, r_r) 的回波可以视为反射系数与相位历程乘积在目标所在位置的积分,即:

$$s(r_t, r_r, k) = \int \sigma(r) \exp(-jk(d_t + d_r)) dr \quad (13)$$

式中: $k=2\pi f/c$ 为系统波数; d_t/d_r 为发射/接收天线与

目标点 \mathbf{r} 的距离。对于每一对收发天线对 $(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)$, 将回波信号通过逆快速傅里叶变换成高分辨一维距离像:

$$S_k(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, r) = \text{IFFT}_k[s(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, k)] \quad (14)$$

对第 i 对收发天线对 $(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)$ 所获得的高分辨一维距离像 $S_k(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, r)$, 当成像时间很快而且旋转角 ω 很小时, 目标近似可以认为只发生刚体旋转, 利用平台旋转角度的先验信息计算三维旋转矩阵 $\mathbf{R}(\omega)$ 。对第一次采集的数据建立二维坐标系 \mathbf{r}' , 在实验中, 目标在 360° 旋转三脚架的作用下沿竖直方向转动, 旋转三脚架固定不动, 即在 $z < z_0$ 时坐标不变, 在 $z \geq z_0$ 时, 沿 (x_0, y_0) 旋转 ω 角度, 则坐标系 $\mathbf{r}'(x', y', z')$ 变换为 $\mathbf{r}''(x'', y'', z'')$ 。

在新的坐标系下重新对回波进行 BP 成像, 插值出发天线与系统对应位置的 $S_k(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, r'')$, 乘以相位补偿因子, 可以获得单个收发子孔径成像结果。

$$A_i(\mathbf{r}'') = S_k(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, r'') \exp(jk_{\min} r'') \quad (15)$$

式中: $r'' = |r'' - r_t| + |r'' - r_r|$ 。利用收发子孔径成像结果, 计算图像相关因子 $\text{CF}(\mathbf{r}'')$:

$$\text{CF}(\mathbf{r}'') = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_t, N_r} A_i(\mathbf{r}'') \right|}{N_t N_r \sum_{i=1}^{N_t, N_r} |A_i(\mathbf{r}'')|^2} \quad (16)$$

则最终成像的复振幅可以表示为:

$$A(\mathbf{r}'') = \text{CF}(\mathbf{r}'') \sum_{i=1}^{N_t, N_r} A_i(\mathbf{r}'') \quad (17)$$

获得旋转变换后的单视成像结果, 通过最大值投影进行二维显示, 再利用图像中的特显点(实验中采用角反射器), 通过平移变换进一步对坐标进行配准。最后对单视强度图像叠加平均, 获得多视成像结果。

3 实验结果与分析

实验目标为 360° 旋转三脚架支撑的粗糙泡沫板, 板上固定着一个玩具手枪, 在手枪四周放置着 4 个角反射器, 如图 4(a) 所示。目标在成像区域内沿着旋转轴旋转, 旋转轴沿竖直方向, 并位于成像区域的中心, 目标围绕旋转轴旋转。 360° 旋转三脚架的旋转支撑位置位于 $z_0 = 0.83 \text{ m}$ 处, 在 $z > z_0$ 位置的目标成像

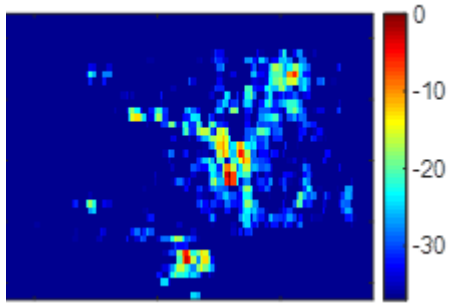
结果进行旋转变换, 将多角度入射单视图像旋转变换至同一入射角。由于镜面反射效应对太赫兹全息成像的散斑特性和抑制效果有重要影响, 实验抽取入射角度为 0° 和 20° 附近的成像结果进行多视处理。针对旋转目标单视散斑图样的角度去相关特性, 由于站开式太赫兹全息雷达成像系统中, 人体、衣物等目标的表面纹理的粗糙度一般不大于波长, 此时, $|M_h(\Delta q_z)|^2 \approx 1$, 散斑图样强度归一化协方差对射角改变量 $\Delta\theta$ 的敏感度主要由 $|\Psi(\Delta q_t)|^2$ 支配, 需要改变接近于成像系统波束域支撑角, 目标才能显著地去相关。但是, 太大的角度旋转会带来目标散射机理的显著改变。实验中, 该稀疏 MIMO 阵的等效收发同置阵列的长度为 0.12 m , 对于 4 m 的成像距离而言, 孔径对点目标照射角度为 $\theta_\alpha \approx 1.7^\circ$, 对于旋转前处于镜面反射区域的目标而言, 旋转 1.7° 后将离开镜面反射区域。由于镜面反射照射区域的回波能量明显强于非镜面反射区域, 此时, 即使单视强度结果间的相关性很小, 对强度均值显著不同的单视图像进行多视叠加, 带来的散斑抑制效果有限。此外, 平台的大角度移动对于实际的人体安检场景也不方便设计, 同时增加旋转校正的误差, 造成目标配准困难。因此, 实验中选取单视图像之间最小角度差为 0.5° 。将多张沿距离向最大值投影的单视强度图像进行非相干叠加, 获得基于旋转目标角度多样性的散斑抑制结果。

图 4(b)~(d) 分别代表入射角度为 $-2^\circ, 0^\circ, 2^\circ$ 时的单视成像结果。在入射角从 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 过渡的过程中, 成像结果中的镜面反射区域从粗糙泡沫平板的右侧区域向左侧区域过渡。多视叠加后的散斑主要由处在镜面反射区域的单视图贡献, 由公式(11)可知, 镜面



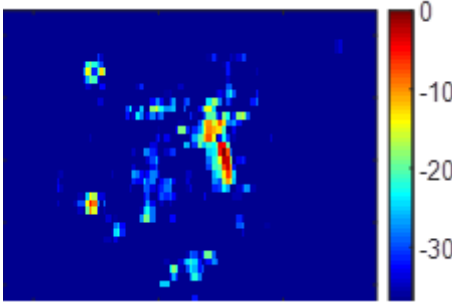
(a) 包含玩具手枪和角反射器的实验目标光学图像

(a) Photograph of targets including a toy gun and corner reflectors



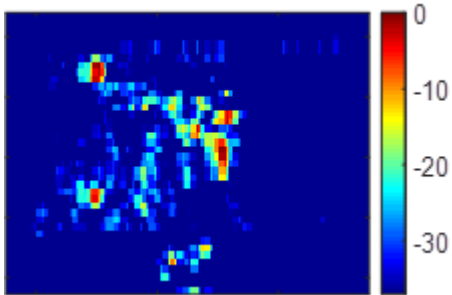
(b) 入射角为 -2° 的单视成像结果

(b) Single-look imaging result with -2° incident angle



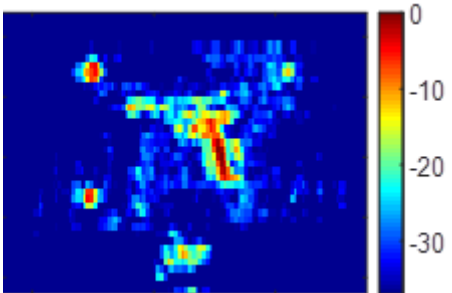
(c) 入射角为 0° 的单视成像结果

(c) Single-look imaging result with 0° incident angle



(d) 入射角为 2° 的单视成像结果

(d) Single-look imaging result with 2° incident angle



(e) 入射角为 $-2^\circ \sim 2^\circ$ (0.5° 间隔) 的 9 视图像非相干平均成像结果

(e) Incoherent averaged imaging result of 9-look images with incident angles from -2° to 2° (0.5° interval)

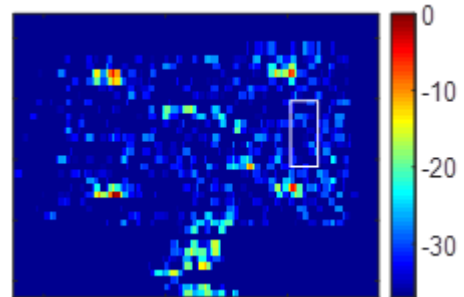
图 4 不同方位入射角下目标的成像结果

Fig.4 Imaging results with different incident angles

反射区域随入射角的变化将减弱多视处理对散斑噪声的平滑和抑制效果。图 4(e)是对 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 以 0.5° 为

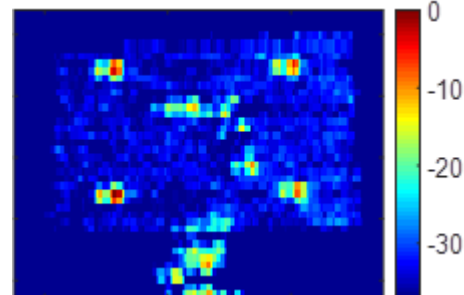
间隔的 9 张单视强度图像的多视成像结果。与单视图像相比,多视处理结果中的手枪目标不再是分立的强散射点,轮廓信息和细节信息得到增强,散斑噪声从局部向全局蔓延,但在图像中得到了平滑,对比度降低。

在 20° 入射时,目标表面已经不存在镜面反射区域,全息成像结果中的散斑噪声严重,对于手枪等复杂目标在不同角度的太赫兹雷达图像中,主要表现为闪烁的多强散射点,轮廓信息不明显;对于角反射器等大散射角的类点目标而言,在很大的入射角度范围内单视成像结果中容易检测,可作为图像校准的特显点。选取入射角变化范围为 $16^\circ \sim 24^\circ$ 、角度间隔为 0.5° 的 17 张单视成像结果进行处理。在 20° 入射的单视成像结果与 17 张单视图图像叠加结果的比较如图 5 所示。通过旋转变换叠加后的图像的散斑噪声已经得到有效抑制,手枪与角反目标轮廓清晰,便于检测和识别。选取 20° 成像结果中一块 10×10 像素大小的平坦区域(如图 5(a)中白框所示),计算散斑对比度,在 20° 入射的单视成像的散斑对比度



(a) 入射角为 20° 的单视成像结果

(a) Single-look imaging with 20° incident angle



(b) 入射角为 $16^\circ \sim 24^\circ$ 的 17 视图像多视校正非相干平均成像结果

(b) Incoherent averaged imaging result by multi-look correction of 17 images from 16° to 24°

图 5 散斑抑制结果

Fig.5 Speckle reduction results

为 1.04, 17 视多角度散斑抑制叠加后的散斑对比度为 0.46。处理后散斑对比度降低至单视散斑的 44%, 散斑得到了有效抑制。以 16° 单视成像结果为起始, 每次增加一张间隔为 0.5° 的单视强度图样进行多视处理, 所选区域多视成像结果的散斑对比度与实际多视叠加的视数间关系如图 6 所示。通过与公式(9)、(12) 给出的同均值相关散斑多视处理后的散斑对比度理论值的比较可知, 在角度旋转量比较小的时候, 二者吻合度比较高; 由于理论计算中忽略了散射回波强度随角度变化的影响, 随着角度的增大, 散斑对比度的抑制效果比理论估计的效果略差。由于多角度散斑图样间的相关性, 以及在旋转过程中散斑图样强度的改变, 基于旋转目标 L 视叠加信噪比增益受到限制, 进一步增大旋转角度或增加视数给散斑抑制带来的增益有限。需要根据散斑抑制要求和系统成像速度综合考虑目标旋转的角度间隔和成像视数。

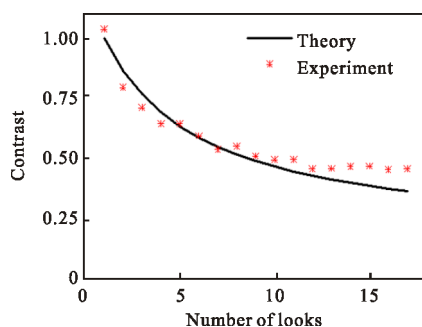


图 6 散斑对比度与相关视数的关系

Fig.6 Relationship between speckle contrast and number of relevant looks

4 结论

针对太赫兹站开式全息雷达成像的散斑抑制问题, 文中提出了一种基于旋转目标成像校正多视叠加的散斑抑制方法。为了利用全息散斑抑制的角度自由度, 首先推导了全息雷达散斑强度在多角度照射下的归一化协方差表达式, 定量描述了照射角度改变对散斑图样相关性的影响。结合 340 GHz 站开式 MIMO 阵列成像系统的快速成像的优势, 以目标的低速旋转获得照射角度的多样性, 通过成像空间旋转变换和目标配准, 得到目标在同一角度下的单视成像结果, 对 17 张以 0.5° 为旋转角度间隔的成像

结果进行多视处理后, 散斑对比度降低为单视散斑的 44%, 散斑得到了有效抑制, 目标轮廓和细节更加明显, 便于识别。散斑图样的相关性和角度旋转过程中目标散射系数的改变会限制散斑的抑制效果, 需要根据站开式人体隐藏目标检测与识别的具体场景, 结合散斑抑制要求和系统成像速度综合确定目标旋转的角度间隔和成像视数。

参考文献:

- [1] Herschel R, Briese G, Lang S A, et al. Focused imaging by geometric optics for real-time passenger screening at sub-millimeter wave frequencies [C]//Microwave Conference, IEEE, 2017: 1549-1552.
- [2] Gao Jingkun, Cui Zhenmao, Cheng Binbin, et al. Fast three-dimensional image reconstruction of a standoff screening system in the terahertz regime [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2018, 8(1): 1-14.
- [3] Sheen D M, Hall T E, Severtsen R H, et al. Active wideband 350 GHz imaging system for concealed-weapon detection[C]//SPIE, 2009, 7309: 730901.
- [4] Patrick M A. Illumination strategies to reduce target orientation requirements and speckle in millimeter wave imaging[D]. USA: The Ohio State University, 2014.
- [5] Jaeger I, Stiens J, Koers G, et al. Hadamard speckle reduction for millimeter wave imaging [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2006, 48(9): 1722-1725.
- [6] Jaeger I, Stiens J, Zhang Lixiao, et al. Comparison of speckle reduction diversity tools for active millimeter-wave imaging [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2008, 25(7): 1716-1721.
- [7] Xu Meifang, Ding Junwen, Wang Guanjun, et al. Comparison of laser speckle suppression due to angle diversity [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 0806004. (in Chinese)
徐美芳, 丁俊文, 王冠军, 等. 角度多样性激光散斑抑制方法的比较[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0806004.
- [8] Petkie D T, Holt J A, Patrick M A, et al. Multimode illumination in the terahertz for elimination of target orientation requirements and minimization of coherent effects in active imaging systems[J]. Optical Engineering, 2012, 51(9): 091604.
- [9] Patrick M A, Joye C D, Lucia F C D, Multimode illumination for speckle reduction and angle neutrality in

- millimeter wave active imaging: range and time-resolved mode averaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2014, 31(10): 2135-2141.
- [10] Patrick M A, Holt J A, Joye C D, et al. Range resolved mode mixing in a large volume for the mitigation of speckle and strategic target orientation requirements in active millimeter-wave imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2015, 32(4): 637-646.
- [11] Goodman J W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Englewood: Roberts & Company, 2007.
- [12] Cui Zhenmao, Gao Jingkun, Lu Bin, et al. Real time 3D imaging system based on sparse MIMO array at 340 GHz[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 102-106. (in Chinese)
崔振茂, 高敬坤, 陆彬, 等. 340 GHz 稀疏 MIMO 阵列实时 3-D 成像系统 [J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(1): 102-106.
- [13] Jiang Yanwen, Qin Yuliang, Wang Hongqiang, et al. A side-lobe suppression method based on coherence factor for terahertz array imaging [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 5584 - 5588.