

## 圆周阵列太赫兹干涉成像中目标场景仿真

吴俊政,倪维平,严卫东,张 晗

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

**摘要:** 太赫兹干涉成像是一种基于频谱域的成像方法,通过对目标场景的频谱域信息采样重构目标图像,避免了逐像素扫描,所需的探测阵元数目少,在图像获取速率和成像分辨率上具有发展潜力。研究了太赫兹干涉成像原理及其实现方法,分析了成像分辨率和有效视场问题。通过仿真实验分析了目标场景中存在噪声对成像质量的影响,表明干涉成像对目标噪声较为敏感。对安检应用场景的反射成像模式进行了分析,证明了原理系统的适用性。仿真结果所得结论可为太赫兹干涉成像系统设计和实际应用提供理论依据和技术支持。

**关键词:** 太赫兹; 干涉成像; 目标场景; 噪声; 反射强度比

中图分类号: O441 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0125004

## Target scene simulation of terahertz interferometric imaging with circular array

Wu Junzheng, Ni Weiping, Yan Weidong, Zhang Han

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Terahertz interferometric imaging technique based on the spectral domain, by sampling information of the spectral domain of the target scene to reconstruct the target image. It offers considerable potential in image acquisition rate and resolution for avoidance of scanning each pixel and ability to image with only a handful of detector elements. The terahertz interferometric imaging principle and implementation method were researched, then imaging resolution and effective field of view were focused on. Simulation experiments were carried out to analyze the influence of noise in target scene for imaging quality, and the results show that interferometric imaging is sensitive to noise. The reflection imaging model in security check was focused on which validated the applicability of the principle system. The conclusions from the simulation results may offer some theoretic evidence and technical support to designs of terahertz interferometric imaging system and practical applications.

**Key words:** terahertz; interferometric imaging; target scene; noise; ratio of reflection intensity

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-20

基金项目: 国家 863 计划(2014AA809411C)

作者简介: 吴俊政(1985-),男,助理研究员,主要从事计算机仿真及图像处理分析技术方面的研究。Email: wujunzheng@nint.ac.cn

## 0 引言

成像技术已经广泛应用于影像记录、安全检测、工业控制及军事侦察等领域。太赫兹(THz, 频率范围 0.1~10 THz) 成像是近年发展起来的新型成像手段, 其所具有的较低单光子能量和对大部分非金属材料的高穿透性等特点<sup>[1]</sup>逐渐引起人们的关注。随着 THz 辐射产生与探测手段的不断丰富与发展, 相关实验技术条件的不断完善与提高以及新的数据处理和分析理论的不不断引入与应用, 国际上对新型 THz 探测成像系统及其相关成果的报道日益增多, 并呈现出实时、紧凑、多机制的发展趋势<sup>[2]</sup>。

在太赫兹成像领域, 自 1995 年 Hu 和 Nuss 等人建立起第一套 THz 脉冲扫描成像设备以来<sup>[3]</sup>, 越来越多的研究人员致力于 THz 成像方面的探索和研究。传统 THz 成像技术采用单探测元扫描成像方法来逐像素地获取图像, 图像获取速率受到限制, 成像分辨率也受到探测元孔径的制约<sup>[4]</sup>, 无法满足实时处理的需求。THz 干涉成像技术采用综合孔径干涉探测技术来获得可视度函数的信息, 然后通过傅里叶反变换重建目标场景信息, 即目标图像<sup>[5]</sup>。干涉成像是通过小孔径探测元稀疏组阵来模拟合成大孔径探测元, 在图像获取速率以及成像分辨率上都具有发展潜力<sup>[6]</sup>。实现了 THz 干涉成像系统, 给出了矩形阵列成像中的参数, 但成像目标仅为简单的点状目标<sup>[7-8]</sup>。目前, 干涉成像中圆周阵列配置已有相关研究<sup>[9]</sup>, 但作为成像系统的另一个重要组成部分, 目标场景的噪声及其与周围环境的关系对成像质量的影响还少有报道。文中深入研究了太赫兹干涉成像原理及实现方法, 依据仿真结果分析了目标场景存在高斯和椒盐噪声对 THz 干涉成像质量的影响, 同时对安检场景的反射成像模式进行仿真, 所得结论可为 THz 干涉成像系统设计和安检、无损检测等应用提供技术支持。

## 1 THz 干涉成像构像原理

### 1.1 构像原理

太赫兹干涉成像的基本原理可以借助综合孔径成像理论来表述<sup>[10]</sup>, 即以小口径天线单元组成的天线阵列, 然后通过两两相关测量实现等效大口径天

线的高分辨率成像效果。相关干涉仪是综合成像的基本构成单元, 干涉测量的几何关系如图 1 所示。天线阵列在  $z=0$  的平面内, 辐射源位于  $z=R$  的平面内; 将辐射源离散化, 其中第  $m$  块面源到两天线的距离分别为  $R_{m1}$  和  $R_{m2}$ 。

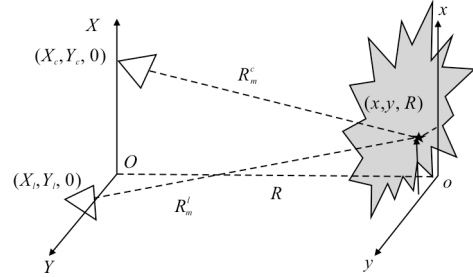


图 1 干涉成像的几何关系

Fig.1 Geometric relation of interferometric imaging

对两天线的回波信号进行复相关运算, 可得到目标的可见度函数(互强度分布)。理想情况下的归一化可见度函数表达式为<sup>[11]</sup>:

$$I_{c,l} = \langle E_c(R_m^c, t) \cdot E_l^*(R_m^l, t) \rangle = \sum_{m=0}^M T_m(x,y) F_m^c(x,y) \cdot [F_m^l(x,y)]^* r_{c,l} \exp[-jk(R_m^c - R_m^l)] \quad (1)$$

式中:  $\langle \cdot \rangle$  为时间积分操作;  $(x,y)$  为辐射单元块  $(x,y,R)$  的坐标值;  $T(x,y)$  为归一化辐射亮温;  $r_{c,l}$  为与空间去相关效应有关的 Wash 条纹函数, 对于窄带成像系统有  $r_{c,l} = 1$ ;  $F(x,y)$  为天线方向函数;  $\exp[-jk(R_m^c - R_m^l)]$  为源自两个天线探测元的相位差, 这是决定干涉成像的重要部分。根据图 1, 对变量  $R_m^c$  和  $R_m^l$  进行 Taylor 展开后, 可以近似表达为:

$$R_m^c = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + R^2} \approx R + \frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2R} \quad (2)$$

$$R_m^l = \sqrt{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2 + R^2} \approx R + \frac{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2}{2R} \quad (3)$$

由公式(2)和公式(3)可得:

$$k\Delta R = k(R_m^c - R_m^l) = k \left\{ \frac{x(x_1 - x_c) + y(y_1 - y_c)}{R} + \frac{(x_c^2 + y_c^2) - (x_1^2 + y_1^2)}{2R} \right\} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(1), 并作如下的变量变换:

$$u = k \frac{x_1 - x_c}{R}, \quad v = k \frac{y_1 - y_c}{R} \quad (5)$$

$$\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = k \frac{(\mathbf{x}_c^2 + \mathbf{y}_c^2) - (\mathbf{x}_l^2 + \mathbf{y}_l^2)}{2R} \quad (6)$$

可以得到:

$$k\Delta R = k(\mathbf{R}_m^c - \mathbf{R}_m^l) = \mathbf{u}\mathbf{x} + \mathbf{v}\mathbf{y} + \varphi(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(1)可以得到:

$I(\mathbf{u}, \mathbf{v}) =$

$$e^{-j\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{v})} \iint T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) F_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) [F_l(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^* e^{-jk(\mathbf{u}\mathbf{x} + \mathbf{v}\mathbf{y})} d\mathbf{x}d\mathbf{y} \quad (8)$$

式中:  $\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  为二次相位修正项;  $I(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  为平面 XOY 上的视见度函数测量值;  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为归一化辐射亮温函数。通常, 视场位于 THz 波束覆盖的中心区域, 因此可以忽略天线方向函数, 即估计的  $\hat{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \approx T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ , 从而构像方程可表示为:

$$I(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \iint \hat{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) e^{-jk(\mathbf{u}\mathbf{x} + \mathbf{v}\mathbf{y})} d\mathbf{x}d\mathbf{y} \quad (9)$$

由上式可以看出, 任意一对天线探测元之间的视见度函数  $I(\mathbf{u}, \mathbf{v})$  可以表示为二次相位修正项  $e^{-jk(\mathbf{u}\mathbf{x} + \mathbf{v}\mathbf{y})}$  和归一化亮温函数  $\hat{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  的傅里叶逆变换的乘积。

## 1.2 基本参数

角分辨率-太赫兹干涉成像的角分辨率为:

$$\theta = \frac{\lambda}{b_{\max}} = \frac{c}{f \cdot b_{\max}} \quad (10)$$

式中:  $b_{\max}$  为成像阵列最大基线距离;  $f$  为工作频率;  $\lambda$  为波长;  $c$  为光速。

空间分辨率-若探测的距离为  $R$ , 则干涉成像的空间分辨率为:

$$\Delta L_{\text{Lat}} = R\theta = \frac{R\lambda}{b_{\max}} = \frac{Rc}{f \cdot b_{\max}} \quad (11)$$

有效视场-干涉成像有效视场宽度为:

$$W_{\text{view}} = \frac{Rc}{f \cdot b_{\min}} \quad (12)$$

式中:  $b_{\min}$  为成像阵列最小基线距离。

$\mathbf{U}-\mathbf{V}$  平面:  $\mathbf{U}-\mathbf{V}$  分量的分布对最终干涉成像效果具有非常大的影响。与任意两个探测元  $(\mathbf{X}_m, \mathbf{Y}_m)$  和  $(\mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_n)$  对应的  $\mathbf{U}-\mathbf{V}$  分量分别为:

$$(\mathbf{U}-\mathbf{V})_{(m, n)} = \left( \frac{\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_n}{\lambda}, \frac{\mathbf{Y}_m - \mathbf{Y}_n}{\lambda} \right) \quad (13)$$

## 2 成像仿真分析

太赫兹干涉成像的阵列分布结构中, 均匀分布的圆周阵列具有结构简单、中心对称、旋转不变等

特点<sup>[8]</sup>。总结了圆周阵列成像系统的参数规律, 文中依据其结论对圆周阵列的仿真参数设置如下: 探测元数目  $N=300$ , 阵列半径  $R=0.5$  m, 太赫兹波频率  $f=0.99$  THz, 探测距离  $h=10$  m, 对目标成像扫描间距为 2 cm。

仿真的目标场景的辐射分布如图 2 所示, 图像长宽均为 50 pixel, 对应实际幅宽为 1 m, 仿真时假设图中白色部分反射 THz 波。

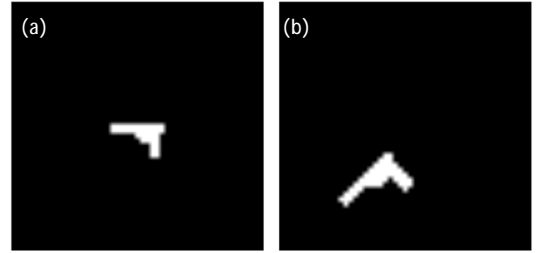


图 2 仿真目标场景的辐射分布

Fig.2 Radiation distribution of simulated target scene

### 2.1 场景噪声对干涉成像影响仿真

在实际应用中, 目标场景难以满足图 2 所示的反射(辐射)条件。文中以噪声来自目标场景为假设, 在图 2 中分别加入典型的高斯噪声和椒盐噪声, 部分含噪声的目标场景如图 3 和图 4 所示。

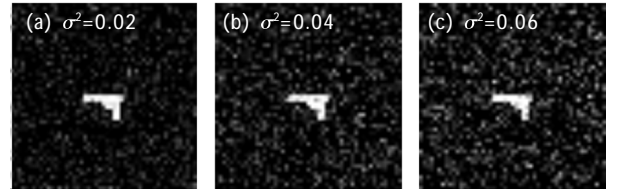


图 3 含高斯噪声的目标场景(均值 0, 方差  $\sigma^2$ )

Fig.3 Target scenes with Gaussian noise (mean 0 and variance  $\sigma^2$ )

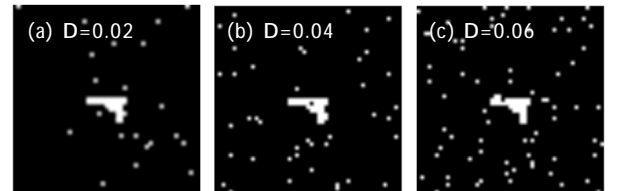


图 4 含椒盐噪声的目标场景(密度  $D$ )

Fig.4 Target scene with salt & pepper noise (density  $D$ )

目标场景含高斯噪声的仿真结果如图 5 所示, 从图中可以看到, 随着噪声方差的增大, 成像结果中噪声也变大, 同时干涉结果中目标轮廓的清晰度也

逐渐降低。 $\sigma^2 \leq 0.04$  时,能较容易辨认出目标形状,而在  $\sigma^2 = 0.05$  时,目标形状变得比较模糊, $\sigma^2 \geq 0.06$  时,难以辨认目标真实形状。

为更直观地呈现图像的强度分布,水平扫描图 5 中各个图像的第 26 行,如图 5(a)中红线所示位置,观察噪声方差对干涉成像中第 26 行的影响,扫描结果如图 6 所示,其中黑色实线为仿真结果,红色虚线为目标。可以看到,随着噪声方差的增大,干涉成像结果中目标区域的起伏会增大,在  $\sigma^2 \geq 0.06$  时,成像结果的该区域体现为对比明显的多个波峰和波谷。此外,含噪声的干涉成像结果中旁瓣干扰总体随噪声强度增大体现更为明显。

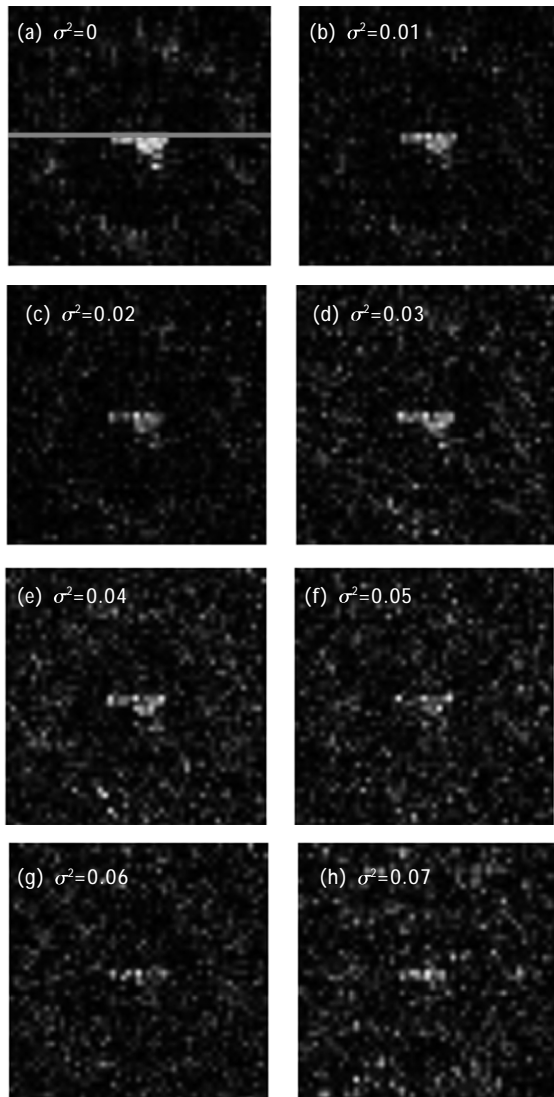


图 5 含高斯噪声目标场景仿真结果(均值 0,方差  $\sigma^2$ )  
Fig.5 Simulation results of target scenes with Gaussian noise (mean 0 and variance  $\sigma^2$ )

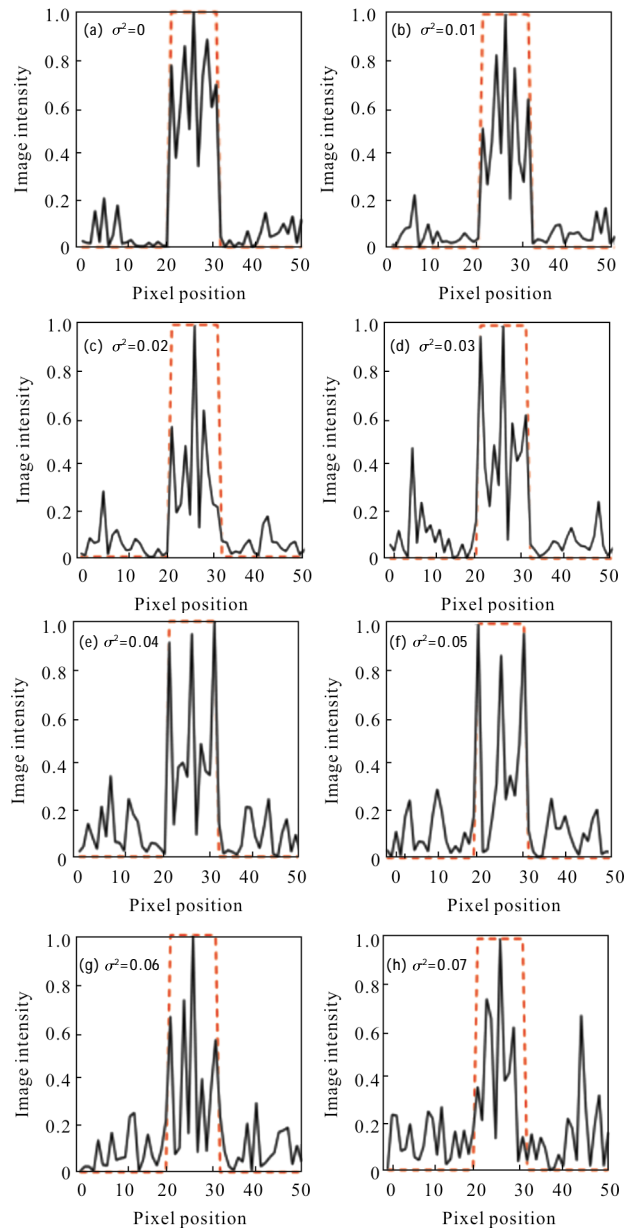


图 6 对图 5 的第 26 行扫描结果

Fig.6 Scanning results of the row 26 in Fig.5

因为在仿真中图像的目标区域已知,文中采用图像背景方差和均方相对误差 (Relative mean square error, RMSE) 辅助目视对成像质量进行评估。该两项指标越小,则目标准确性越高。图像背景方差定义为:

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{\#\Theta} \sum [I(m,n) - \mu_B]^2 \quad (14)$$

式中: $I(m,n)$ 为仿真图像; $\#\Theta$ 表示源图像中的背景区域面积; $\mu_B$ 表示背景区域的均值。均方相对误差定

义为:

$$RMSE = \frac{\sum_m \sum_n (I(m,n) - I_0(m,n))^2}{\sum_m \sum_n I(m,n)^2} \quad (15)$$

式中:  $I_0(m,n)$  为无噪声仿真结果图。

表 1 为图 5 对应的背景方差和均方相对误差, 从图中可知, 噪声强度越大, 仿真结果的两项指标均越大, 即成像的目标准确性越差, 与目视结果一致。

表 1 目标含高斯噪声的背景方差和均方相对误差  
Tab.1 Background variance and relative mean square error of target with Gaussian noise

$\sigma^2$	RMSE	$\sigma_B^2$
0.01	0.017	9.38
0.02	0.021	9.49
0.03	0.023	14.62
0.04	0.027	16.24
0.05	0.031	16.61
0.06	0.032	17.17
0.07	0.035	18.31

目标场景含椒盐噪声的成像仿真结果如图 7 所示, 从图中可以看到, 在噪声密度  $D \leq 0.03$  时, 成像结果差别不大, 均能容易辨认出目标轮廓, 当  $D$  再增大时, 目标轮廓变模糊, 在  $D=0.07$  时, 难以看清目标真实形状。

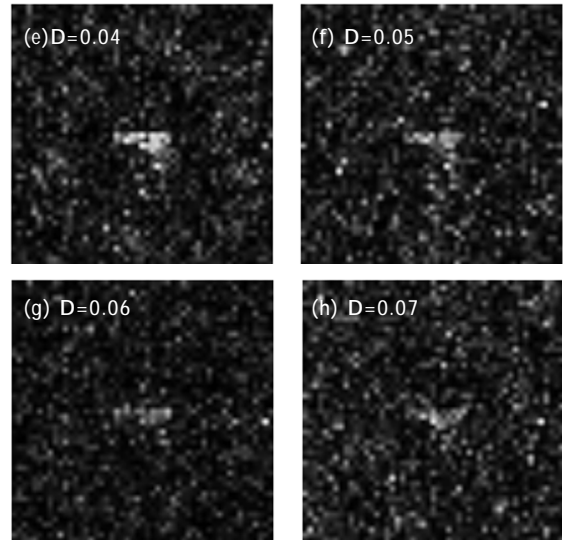
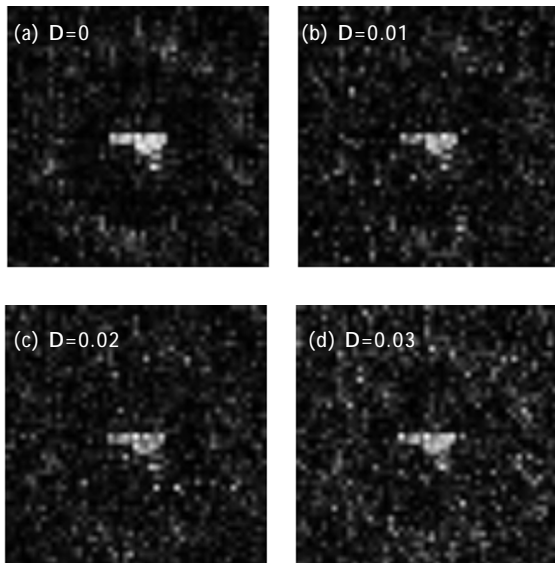
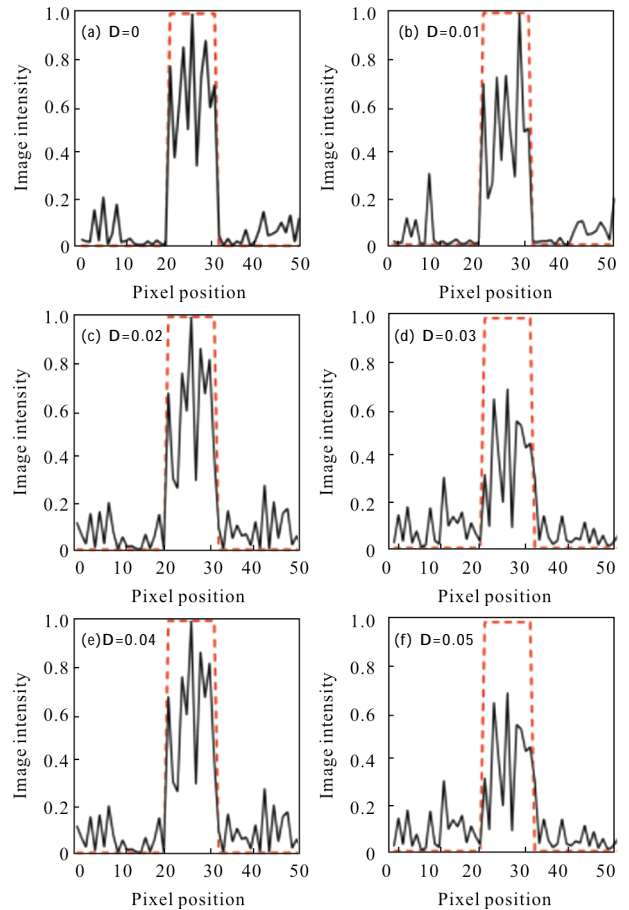


图 7 含椒盐噪声目标场景仿真结果(密度  $D$ )

Fig.7 Simulation results of target scenes with salt&pepper noise (density  $D$ )

图 8 为对图 7 第 26 行扫描结果, 黑色实线为仿真结果, 红色虚线为目标。在强度为 1 的红色虚线目标区域内, 随着噪声密度增大, 仿真结果中与目标对应位置上的波动越来越大, 平均幅度也降低, 目标轮



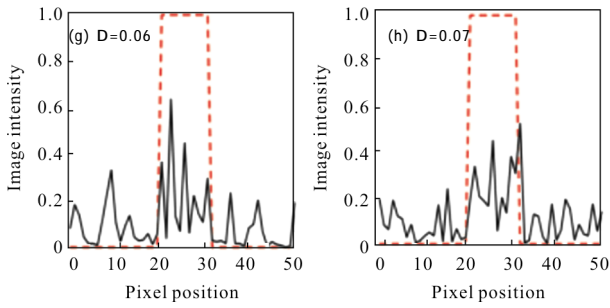


图 8 对图 7 的第 26 行扫描结果

Fig.8 Scanning results of the row 26 in Fig.7

廓显得越来越模糊，且在背景区域出现的干扰也越来越大。

表 2 为图 7 对应的背景方差和均方相对误差，从图中可知，背景方差随着噪声密度增加总体呈增大趋势，且在  $D=0.07$  时增加量明显。而均方相对误差随噪声密度增加而增加。

表 2 目标含椒盐噪声的背景方差和均方相对误差

Tab.2 Background variance and relative mean square error of target with salt & pepper noise

D	RMSE	$\sigma_B^2$
0.01	0.015	4.24
0.02	0.017	6.15
0.03	0.018	6.13
0.04	0.020	9.22
0.05	0.025	9.25
0.06	0.032	9.60
0.07	0.034	17.47

由上述仿真结果可知，在目标含噪声强度(或密度)不大(在许多应用中高斯噪声方差或椒盐噪声密度大于 0.1，而文中为 0.07)的情况下，已经对成像结果有较大影响，造成目标难以辨认。

## 2.2 安检场景成像仿真

不同介质在太赫兹波段反射及透射特性不同，与可见光有很大差异，实用的太赫兹成像系统必须考虑太赫兹波的传输特性<sup>[12]</sup>。进行了纸张、聚乙烯、聚四氟乙烯等物质对太赫兹波透射特性的测量，结果表明它们对太赫兹波段的透过性比较好，这对太赫兹安检应用系统的研究具有重要意义，如聚乙烯作为塑料的主要成分，其对太赫兹波的透明特性可

用于安检中检测塑料包装中的危险物体<sup>[13-14]</sup>。对安检而言，非接触、快速、自动检测出违禁物具有重要现实意义。

基于上述考虑，该节设计了安检场景中反射模式的 THz 干涉成像模拟装置，如图 9 所示，其成像过程为：系统 THz 源辐射出 THz 波，经收集扩束后经天线向外辐射，辐射波经目标调制后，其反射波经收集装置进入探测阵列。探测阵列中探测元对按照复相关接收方式，记录所有探测元对测量的可视度函数值，然后进行反演重构目标图像。

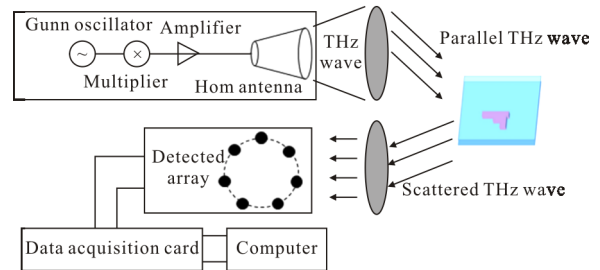


图 9 成像模拟装置

Fig.9 Simulated imaging installation

图 9 中阵列参数和 2.1 节一致，假设塑料包装与金属枪支对太赫兹波的反射强度比为  $r$ 。根据参考文献<sup>[12]</sup>对聚乙烯反射损失系数  $\varphi$  和吸收系数  $\omega$  的拟合，如表 3 所示。THz 波在聚乙烯中的反射损失系数较小，图 9 基于接收反射波原理，因此  $r$  在仿真中可设定为较小值。

表 3 不同波长下聚乙烯吸收和发射损失系数<sup>[12]</sup>

Tab.3 Absorption and losing coefficients of polythene at different wavelengths<sup>[12]</sup>

$\lambda/\mu\text{m}$	$\varphi$	$\omega/\text{m}^{-1}$
70.5	0.133	97.51
96.5	0.133	64.79
118.8	0.097	61.62
122.4	0.142	58.86
158.5	0.058	52.77
184.3	0.093	33.79
214.9	0.097	32.96

图 10 为不同  $r$  值下的成像结果。从图中可看出，在  $r \leq 0.2$  时，目标的位置和形状准确， $r$  越大，目标的轮廓越模糊。在视场中心有“x”形的亮块干扰，



在  $r \geq 0.25$  时,其亮度已大于目标,因此,在实际应用中可考虑移动目标或阵列以改变目标相对视场中心位置,多次成像以准确判断。

图 10 表明,对安检面临的塑料包装内的金属目标,设计 THz 干涉系统能够较好地应用。表 4 为图 10 对应的背景方差和均方相对误差,从图中可知,反射强度比越大,仿真结果的两项指标均越大,即目标形状和轮廓会越模糊,背景干扰也越大。

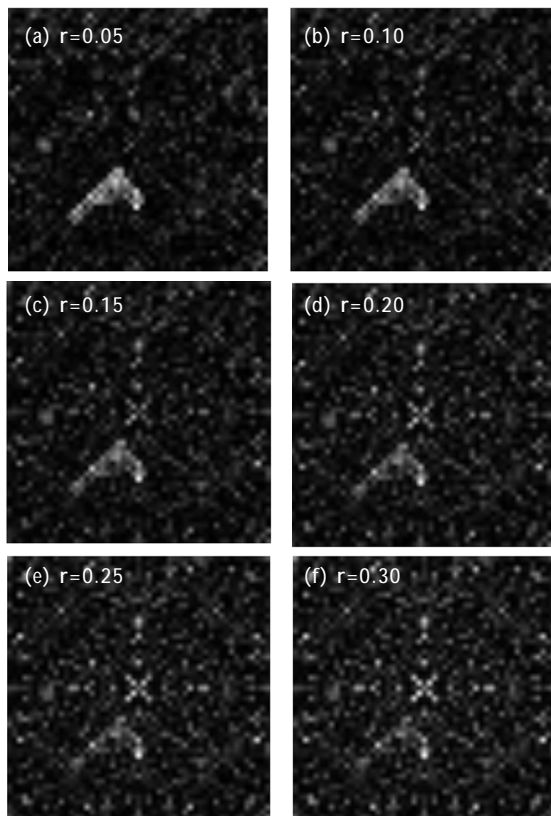


图 10 不同反射强度比下的成像结果

Fig.10 Imaging results with different ratios of reflection intensity

表 4 不同反射强度比的背景方差和均方相对误差  
Tab.4 Background variance and relative mean square error with different ratios of reflection intensity

r	RMSE	$\sigma_B^2$
0.05	0.004	1.516
0.10	0.014	4.227
0.15	0.022	7.359
0.20	0.026	10.348
0.25	0.029	13.048
0.30	0.030	15.499

### 3 结论

文中对 THz 干涉成像的原理进行了研究,仿真分析了目标场景的噪声及其与周围环境的关系对成像质量的影响,结果对开展 THz 干涉成像的理论研究和安检、无损检测应用中的 THz 干涉成像系统开发有重要的参考价值,仿真的主要结论有:

(1) THz 干涉成像机理为对目标辐射(或反射)的 THz 波进行复相关接收后反演图像,对目标中含的高斯和椒盐噪声均较为敏感,噪声强度(或密度)不大的情况下,就会导致成像结果中目标模糊难以分辨。

(2) 设计的 THz 干涉成像模拟适用于安检成像中对塑料等包装进行危险物品检测。

#### 参考文献:

- [1] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science Technology and Application [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Li Xinlei, Li Biao. Review on progress of real-time THz sensing and imaging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090008.
- [3] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [4] Zhang Yuedong, Jiang Yuesong, He Yuntao. Passive terahertz synthetic aperture imaging using optical processing method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 477-481. (in Chinese)
- [5] John F Federici, Dale Gray, Brian Schulkin, et al. Terahertz imaging using an interferometric array [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(12): 2477-2479.
- [6] Aparajita Bandyopadhyay, Andrei Stepanov, Brian Schulkin, et al. Terahertz interferometric and synthetic aperture imaging [J]. Optical Society of America, 2006, 23(5): 1168-1178.
- [7] Su Ke, Liu Zhiwei, Robert B Barat, et al. Two-dimensional interferometric and synthetic aperture imaging with a hybrid terahertz/millimeter wave system [J]. Applied Optics, 2010, 49(19): E13-E19.
- [8] Alexander M Sinyukov, Robert B Barat, Dale E Gary, et al. Terahertz interferometric imaging of RDX [C]// Conference on Terahertz for Military and Security

Applications, 2007, 6549: 654909.

- [9] Wu Junzheng, Yan Weidong, Ni Weiping, et al. Simulation of terahertz interferometric imaging with circular array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0825002. (in Chinese)
- [10] Jehuda Yinon. Counterterrorist detection techniques of explosives[M]//Amsterdam: Elsevier, 2007: 323-366.
- [11] Achanta Radhakrishna, Estrada Sheila, Wils Francisco, et al. Frequency -tuned salient region detection [C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1597-1604.
- [12] Chi Xin. Primary investigation of THz laser transmission imaging technique [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] Kenneth P Walsh, Brian Schulkin, Dale Gary, et al. Terahertz near -field interferometric and synthetic aperture imaging[C]//*SPIE*, 2004, 5411: 9-17.
- [14] Xu Wenzhong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 523-527. (in Chinese)