

## 圆周阵列太赫兹干涉成像仿真

吴俊政, 严卫东, 倪维平, 张 晗

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 太赫兹干涉成像原理简单, 需要的探测单元少, 数据获取效率高, 在太赫兹成像应用中有很大的发展潜力。研究了太赫兹干涉成像的原理, 并设计了用于仿真成像的原理性方案。通过仿真实验分析了成像频率、圆周阵列半径、阵元数目对成像质量的影响以及成像系统的频率带宽。结果表明: 在其他条件不变的情况下, 成像频率越高, 可有效成像要求的阵列半径越小; 增加阵元数目可提高成像质量, 但增加到一定数量后, 提高不明显; 均匀圆形阵列的有效成像带宽较宽。仿真结果所得到的结论为太赫兹干涉成像系统设计和实际应用提供了理论依据和技术支持。

**关键词:** 太赫兹; 干涉成像; 圆周阵列; 仿真

中图分类号: O441 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0825002

## Simulation of terahertz interferometric imaging with circular array

Wu Junzheng, Yan Weidong, Ni Weiping, Zhang Han

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

**Abstract:** Terahertz interferometric imaging offers considerable potential in many imaging applications due to its simple imaging principle, less detector elements and efficient data acquiring ratio. An interferometric imaging system scheme was proposed based on the research of Terahertz interferometric imaging principle. Simulation experiments were carried out to analyze the impact of imaging frequency, radius of circular array and detector number on imaging quality and frequency bandwidth of the imaging system. The experimental results show that the radius of circular array is smaller while the frequency is higher for available imaging with the other conditions being changeless. Adding detector number would improve the imaging quality but not obvious while bigger than one certain number and the frequency bandwidth of uniform circular array for available imaging is wide. The conclusions from the simulation results may offer some theoretic evidence and technical support for the design of terahertz interferometric imaging system and practical applications.

**Key words:** terahertz; interferometric imaging; circular array; simulation

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 国家 863 计划(2014AA812411C); 太赫兹波束扫描成像技术

作者简介: 吴俊政(1985-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事计算机仿真及图像处理分析技术方面的研究。Email: wujz01@163.com

## 0 引言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 介于毫米波与红外光之间的电磁波。THz 波具有高透视性、高安全性、高光谱分辨率等独特的性质,在宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。其中,太赫兹成像是最具典型的应用之一。

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>[6]</sup>,越来越多的研究人员致力于 THz 成像方面的探索和研究,先后发展了脉冲扫描成像、焦平面阵列探测成像、干涉成像、压缩感知成像、合成孔径成像等技术。其中,干涉成像由若干个独立探测单元以一定的方式构成探测阵列,并利用辐射干涉的原理<sup>[7]</sup>,将两个或多个空间点处的透射或反射信号,以适当的相位延时和积分相关进行合并处理,来得到亮度分布的正弦和余弦分量。干涉成像原理简单,不需要复杂的数学理论,与焦平面阵列成像相比需要的探测单元少,数据获取效率较高,因此在 THz 成像方面具有很大的发展潜力<sup>[8-9]</sup>。干涉成像参数是构建干涉成像硬件系统、改善成像质量的重要依据,然而,从目前国内外相关报道来看,仍缺乏对成像关键参数的选取及其对成像质量影响的研究。文中深入研究了太赫兹干涉成像原理,设计了成像系统的方案,结合仿真实验分析成像的若干参数,给出了相关成像参数的选取策略及其对成像质量影响的规律。

## 1 THz 干涉成像原理

范希特-泽尼克(Van Cittert-Zernike)定理是 THz 干涉成像原理的物理基础,它描述了非相干扩展目标源所产生的互强度大小特征,即目标源强度分布与其复相干度成傅里叶变换关系。干涉阵列中每对探测器都可以获得由彼此间距离(基线)所决定空间傅里叶分量值,该值对应于傅里叶变换平面(称为  $U-V$  平面)上的一个点。假设探测器阵列中由  $N$  个独立的探测单元组成,则可以构成  $N(N-1)/2$  个可能的探测单元对。由这些探测单元对所获取的空间傅里叶分量值即可得到样品的图像<sup>[10-11]</sup>。

如图 1 所示,设位于  $z=z'$  平面处的扩展辐射源  $dS'$  的辐射强度为  $\Psi_0$  (其辐射能量可以源于自身,也可由位于  $x'-y'$  平面前后的其他辐射源提供)。探测阵列平面  $x-y$  位于  $z=z_0$  处。于是,位于  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  处的探测元所接收到的来自于  $dS'$  的电场强度分别为:

$$\begin{aligned} dE_1 &= (\Psi_0/r_1) \exp(i\omega t - ikr_1) dS' \\ dE_2 &= (\Psi_0/r_2) \exp(i\omega t - ikr_2) dS' \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $r_j = [(x' - x_j)^2 + (y' - y_j + Z_0)^2]^{1/2}$ ,  $j=1,2$  并且电场强度表现为随距离而逐渐衰减的球面波。此时,若假设电场在各个方向极化方式相同,即为全极化,则可以将电场值视为标量。

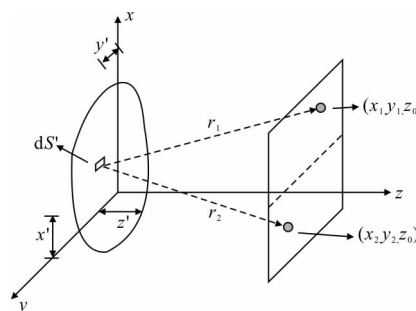


图 1 平面阵列干涉示意图

Fig.1 Sketch map of interferometry on a plane array

为进行干涉图像合成,在假定位于辐射面  $S'$  不同位置子元  $dS'$  之间的辐射值互不相关的条件下,计算位于不同位置处探测元对之间的相关值:

$$C_{1,2} = \int_S \frac{\sigma_E(x', y') \exp(ik(r_1 - r_2))}{r_1 r_2} dS' \quad (2)$$

式中:  $\sigma_E(x', y')$  为  $dS'$  处表面辐射强度的时间平均值,与目标物体的反射特性或辐射特性有关。而积分则是在整个辐射表面  $S'$  进行。假设  $|r' - r|/Z_0 \ll 1$ , 则  $r_1 - r_2$  可以表示为:

$$r_1 - r_2 = \frac{x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2}{2Z_0} + \frac{(x_2 - x_1)x' + (y_2 - y_1)y'}{Z_0} \quad (3)$$

记  $u = k(x_1 - x_2)/2\pi$ ,  $v = k(y_1 - y_2)/2\pi$ ,  $\mu = y'/Z_0$ ,  $\zeta = x'/Z_0$ , 则公式(2)可以转化为<sup>[9]</sup>:

$$C_{1,2}(u, v) = \exp(i\delta) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_E(\zeta, \eta) \exp(-i2\pi(u\zeta + v\eta)) d\zeta d\eta \quad (4)$$

在上式中,分母进行了  $1/r_1 r_2 \approx 1/Z_0^2$  的近似处理,  $\delta = k(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2)/2Z_0$ , 为相位偏移,利用如下

的傅里叶变换公式,即可实现目标图像的重建:

$$\sigma_E(\zeta, \eta) = \sum_{l=1}^{N(N-1)/2} \begin{bmatrix} \text{Re}(C_l) \cos(k(u_l \zeta + v_l \eta)) - \\ \text{Im}(C_l) \sin(k(u_l \zeta + v_l \eta)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $C_l$  为探测元电场相关值,  $l=1, 2, \dots, N(N-1)/2$ ;  $k$  为波数。

在远场条件下,  $\delta \ll 1$ , 可忽略其对互相关值的影响, 探测阵列平面上探测单元间的互相关函数是与入射辐射源分布相关的。此时, 对于给定的探测阵列结构, 通过傅里叶变换, 可以高质量地获取目标图像。但对于近场情况, 相位偏移  $\delta$  较为显著, 获取的图像会存在扭曲和模糊, 须对其加以修正。

图 2 为一种近场探测成像的修正形式<sup>[10]</sup>, 即将探测阵列由平面调整为与辐射源波前曲率一致的曲面。

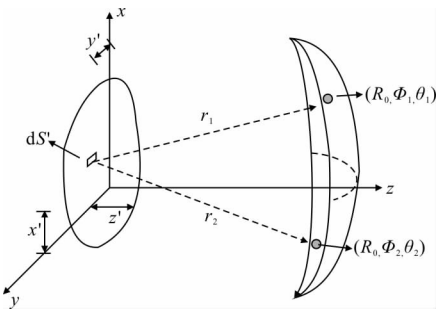


图 2 球面阵列干涉示意图

Fig.2 Sketch map of interferometry on a circular array

为便于分析, 将探测元阵列视为圆心在原点, 而半径为  $R_0$  的球面, 则两个独立探测元接收到的电场值之间的相关值表示为:

$$C_{1,2}(u, v) = \exp(i\delta) \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_E(\zeta, \eta) \exp(-i2\pi(u\zeta + v\eta)) d\zeta d\eta \quad (6)$$

式中:  $\zeta = \bar{x}'/R_0$ ,  $\eta = \bar{y}'/R_0$ ,  $v = k(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)/2\pi$ ,  $u = k(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)/2\pi$ , 探测元在球面坐标系下的坐标值  $(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = R_0 \cdot (\sin\theta_2 \cos\phi_2 - \sin\theta_1 \cos\phi_1)$ ,  $(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) = R_0 (\sin\theta_2 \sin\phi_2 - \sin\theta_1 \sin\phi_1)$ , 相位误差  $\delta = kz(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)$ 。若该误差值可忽略, 则修正后的相关值将能够高质量地重建出目标辐射亮度分布。当探测单元以圆形方式排列时, 有  $\delta = kz(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) = 0$ , 也即一阶相位偏移量被抵消, 从而可以在很大的距离上获取清晰的图像。

## 2 成像仿真系统设计及相关指标

现有 THz 成像系统主要分为主动式成像系统和被动式成像系统。被动成像系统通过对目标场景自身辐射 THz 波进行检测成像。由于目标自身 THz 辐射相对较弱, 易被背景噪声淹没, 从而要求探测元具有较高的灵敏度, 但现有的探测元灵敏度难以满足, 因此, 在研和应用的 THz 成像系统大都是基于主动式成像。主动式 THz 成像系统通过系统 THz 辐射源照射待成像的目标区域, 通过其后向散射波或者透射波成像。图 3 给出了设计的 THz 干涉成像系统的原理性方案框图, 成像过程可以概述如下: 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(或后向散射波)经 THz 波收集装置进入探测阵列。探测阵列中探测元将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。

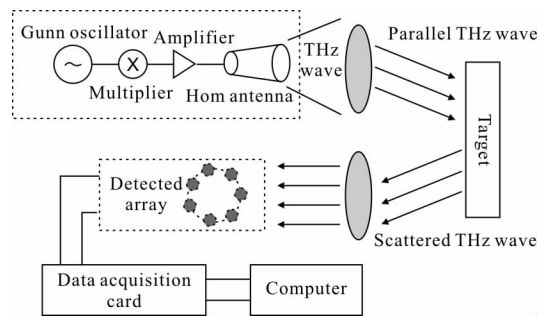


图 3 THz 成像系统原理性方案

Fig.3 THz imaging system scheme

对于成像系统而言, 分辨率和有效视场是重要的参数, 分辨率决定了成像系统能探测的物体的尺寸大小, 有效视场则定义了无混叠的成像区域。综合孔径干涉成像系统的等效孔径大小为最大基线长度, 并且由于  $(U, V)$  覆盖以及复可视度函数具有共轭对称性, 意味着阵列最大孔径加倍, 相应的空间分辨率也加倍, 因此其成像空间分辨率为:  $\Delta\theta = h\lambda/B_{\max}$ , 其中,  $h$  为成像距离,  $\lambda$  为 THz 波长,  $B_{\max}$  为最大基线长度。

根据傅里叶变换的性质, 最大的采样间距  $u_{\max}$  (对应于最长基线) 决定反演(或重建)图像的空间分辨率, 最小的采样间隔  $\Delta u$  (对应于最短基线) 决定成

像的有效视场为： $W_{view}=h\lambda/B_{min}$ ，其中， $h$  为成像距离， $\lambda$  为 THz 波长， $B_{min}$  为最小基线长度。

### 3 成像仿真分析

对于圆形阵列而言，影响成像性能的参数主要有成像频率、阵列半径、探测元数目等，这些参数也决定了成像系统的分辨率、有效视场等指标，文中从成像频率、阵列半径、探测元数目分析参数的设置对成像性能的影响。

#### 3.1 成像频率及阵列半径对成像性能的影响

在实际应用中，满足功率要求的太赫兹探测源可调频率往往有较为严格的限制，因此研究典型固定频率下的成像性能有重要的实际应用价值。文中选取 0.33、0.66、0.99 THz 三个典型成像频率，设置不同的阵列半径，研究成像频率及阵列半径对成像性能的影响。

进行仿真的参数设置如下：探测元数目  $N=300$ ，探测距离  $h=10$  m，对目标成像扫描间距为 2 cm。目标场景的辐射分布如图 4 所示，图像长宽均为 50，对应实际幅宽为 1 m，仿真时假设图中只有白色部分辐射 THz 波。

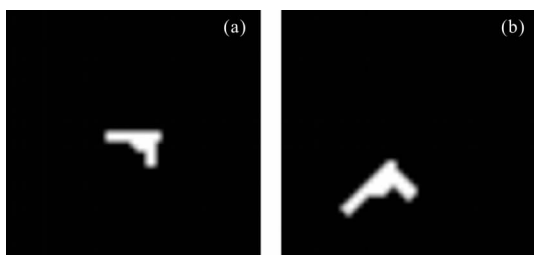


图 4 仿真目标场景的辐射分布

Fig.4 Radiation distribution of simulated target scene

对图 4 的第一个目标场景，在成像频率  $f=0.33$  THz 时，不同阵列半径  $R$  下的成像结果如图 5 所示。从中可以看到，当阵列半径较小时，成像效果不佳；在  $R\leq 0.45$  时，成像结果中目标形状不清晰，难以辨认出目标的枪形结构；在  $R\geq 0.5$  m 时，可以辨认出目标的基本轮廓。

因为在仿真中图像的目标区域已知，文中采用目标显著度和图像背景方差辅助目视对成像质量进行评估。目标显著度定义如下：

$$S_t = \# [I(m,n) > \mu_t] - A/A \quad (7)$$

式中：符号  $\#$  为计数操作； $A$  为常数，为目标区域面积真实值； $\mu_t$  为图像均值。该指标主要用于衡量目标区域的准确性，其值越小，则目标准确性越高。图像背景方差定义为：

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{\#\Theta} \sum_{(m,n) \in \Theta} [I(m,n) - \mu_B]^2 \quad (8)$$

式中： $\Theta$  为面源图像中的背景区域； $\mu_B$  为背景区域的均值。

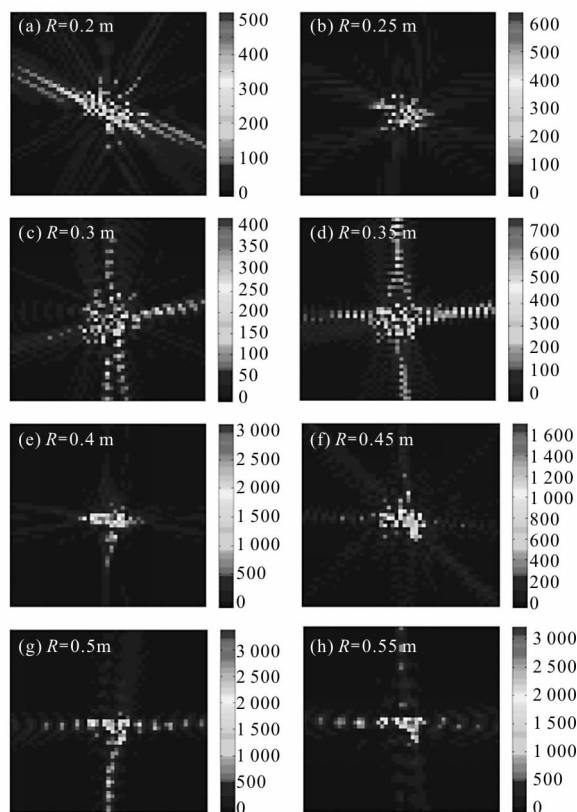


图 5  $f=0.33$  THz 下不同阵列半径的成像仿真结果

Fig.5 Imaging simulation results of different radii while  $f=0.33$  THz

成像频率  $f=0.33$  THz 成像结果的目标显著度和图像背景方差如表 1 所示，从中可知，在  $R\geq 0.5$  m 时，目标显著度和背景方差均较小，说明对目标成像区域较为准确，且背景干扰小，与目视结果一致。

在成像频率  $f=0.66$  THz 时，对图 4 中的第一个目标场景进行成像仿真，不同阵列半径下的成像结果如图 6 所示。从中可看到，与  $f=0.33$  THz 相比，能够有效成像的阵列半径变小， $R\geq 0.4$  m 时，均有较为清晰的成像。



表 1  $f=0.33$  THz 的目标显著度和背景方差

Tab.1 Target saliency and background variance while  $f=0.33$  THz

$R/m$	$S_t$	$\sigma_B^2$
0.2	0.54	212
0.25	0.53	60
0.3	0.67	183
0.35	0.59	252
0.4	0.29	91
0.45	0.26	86
0.5	0.24	75
0.55	0.23	78

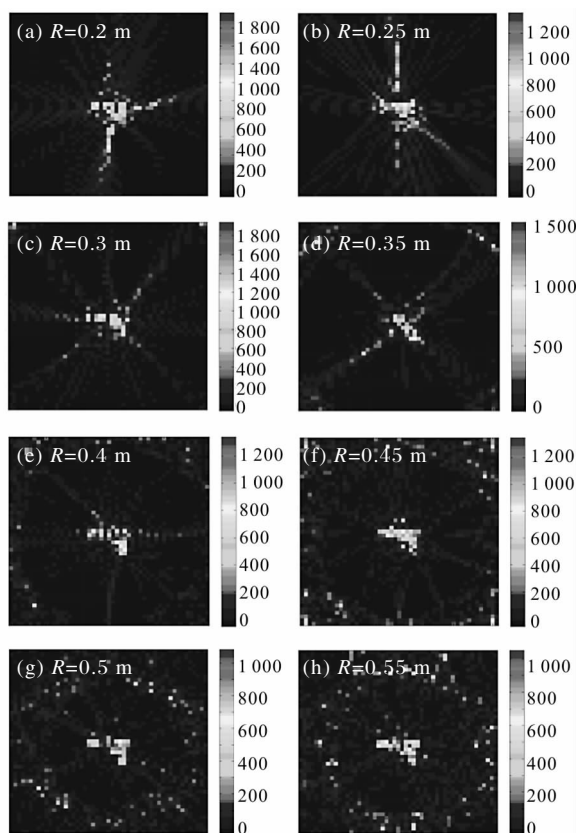


图 6  $f=0.66$  THz 下不同阵列半径的成像仿真结果

Fig.6 Imaging simulation results of different radii while  $f=0.66$  THz

在成像频率  $f=0.99$  THz 时,对图 4 中的第一个目标场景进行成像仿真,不同阵列半径下的成像结果如图 7 所示。从中可看到,与  $f=0.33$  THz  $f=0.66$  THz 相比,能够有效成像的阵列半径更小,在  $R \geq 0.25$  m 时,目标区域成像均较为清晰。

从对图 5~7 的分析可知,在其他参数不变的情况下,随着成像频率的增大,能够有效成像所需的阵列半径长度减小: $f=0.33$  THz 时, $R \geq 0.5$  m; $f=0.66$  THz 时, $R \geq 0.4$  m; $f=0.99$  THz 时, $R \geq 0.25$  m。

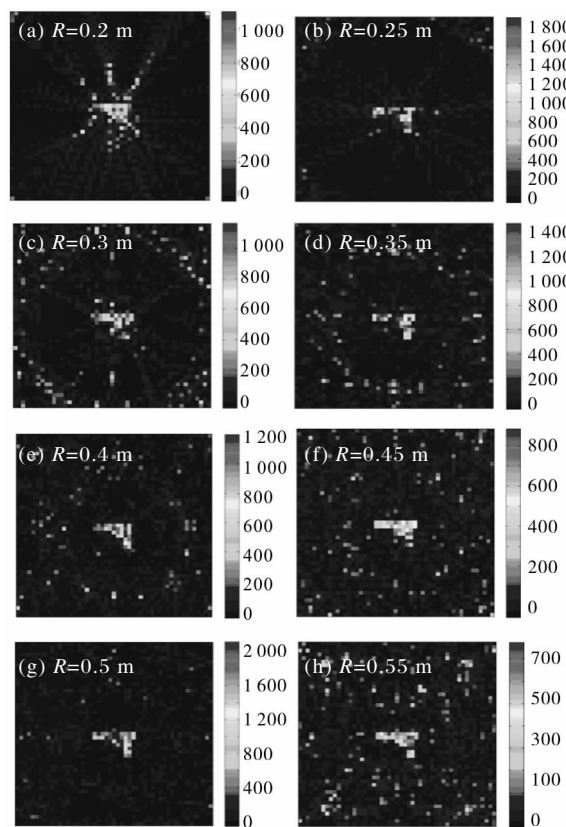


图 7  $f=0.99$  THz 下不同阵列半径的成像仿真结果

Fig.7 Imaging simulation results of different radii while  $f=0.99$  THz

### 3.2 阵元数目对成像性能的影响

阵元数目决定  $U-V$  平面元素的数量,对图像的 FFT 重构有影响,且在应用中,选用符合成像要求的阵元数目可节约成本,因而研究特定条件下有效成像的阵元数目有较为重要的意义。

由 3.1 节的结果选定仿真参数:阵列半径  $R=0.25$  m,探测频率  $f=0.99$  THz,探测距离  $D=10$  m,目标的扫描间距为 2 cm,改变圆周阵列中阵元的个数  $N$ ,对图 4 中两种目标场景分布的仿真结果分别如图 8、图 9 所示,对应的目标显著度和背景方差如表 2、表 3 所示。从中可以看到,在  $N=100$  和  $N=150$  时,目标隐约可分辨,而背景的干扰较大,当  $N \geq 250$  时,成像的质量较好,背景干扰小,且随

着  $N$  的增大, 成像质量的改善不再明显。从表 2 和表 3 也可以看到, 目标显著度和背景方差是随着  $N$  的增大而递减的, 但在  $N > 250$  时, 递减速度下降。因此, 在实际应用中可考虑阵元数目  $N$  约为 250。

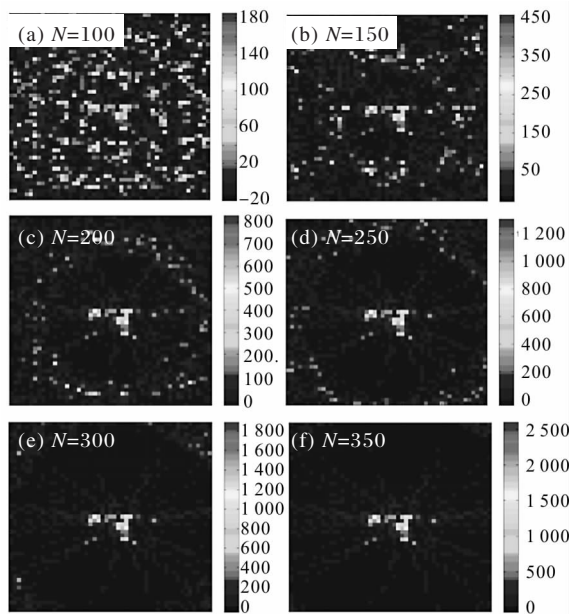


图 8  $f=0.99$  THz,  $R=0.25$  m 时不同阵元数的成像结果(一)

Fig.8 Imaging results of different detector numbers while  $f=0.99$  THz,  $R=0.25$  m ( I )

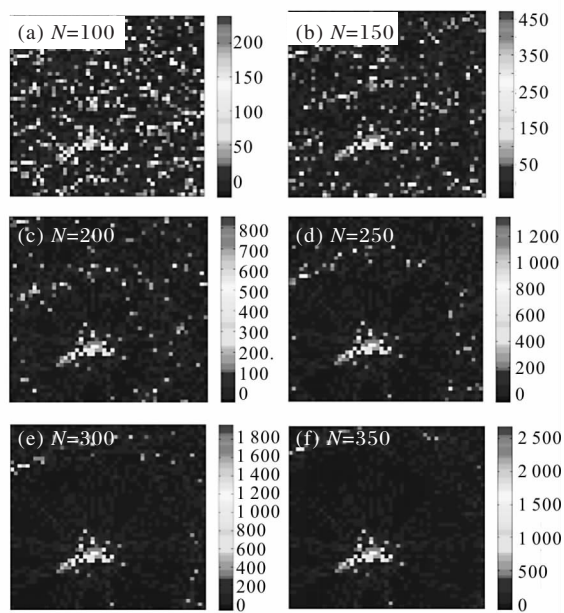


图 9  $f=0.99$  THz,  $R=0.25$  m 时不同阵元数的成像结果(二)

Fig.9 Imaging results of different detector numbers while  $f=0.99$  THz,  $R=0.25$  m ( II )

表 2 不同  $N$  对应的目标显著度和背景方差(一)

Tab.2 Target saliency and background variance with different  $N$ ( I )

$N$	$S_t$	$\sigma_B^2$
100	0.68	624
150	0.43	232
200	0.40	151
250	0.37	85
300	0.35	56
350	0.34	36

表 3 不同  $N$  对应的目标显著度和背景方差(二)

Tab.3 Target saliency and background variance with different  $N$ ( II )

$N$	$S_t$	$\sigma_B^2$
100	0.77	519
150	0.64	287
200	0.58	150
250	0.54	110
300	0.50	90
350	0.47	66

### 3.3 圆形阵列的有效成像带宽分析

实际应用的 THz 探测源, 其输出频率可能会在一定范围内波动, 在频率有所波动时, 系统能有效成像才更具实用价值, 为此, 通过仿真分析了圆形阵列干涉成像的频率带宽。

假设圆形阵列的半径  $R=0.25$  m, 成像距离  $D=10$  m, 阵元数目  $N=300$ , 扫描间隔为 2 cm, 采用图 4 中第二个目标场景分布进行成像仿真, 各个频率下的成像结果如图 10 所示。

从图 10 可以看到, 除了在  $f=0.5$  THz 和  $f=6.0$  THz 时, 成像结果难以辨认目标轮廓外, 其他成像结果均较好, 说明成像带宽较宽, 即在上述的仿真参数下可认为有效成像频率范围至少为 [1.0 THz, 5.5 THz], 对应的空间分辨率约为 [1 mm, 6 mm], 对应的角分辨率约为 [0.000 1 mrad, 0.000 6 mrad], 因此在实际应用中可以根据需求或者所具备的太赫兹源来制定相应的参数。

通过上述仿真, 均匀圆周阵列的 THz 干涉成像有下列结论:(1) 在 0.33、0.66、0.99 THz 等典型成像频率下, 可对目标有效成像, 且频率越高, 要求的阵列半径越小;(2) 阵元数目对成像质量有影响, 但并非数目越大改善越好, 数目大于一定数值后, 增加阵元数目对成像质量改善不明显;(3) 圆形阵列的有效成像带宽较宽, 因而可以根据实际条件进行选择。

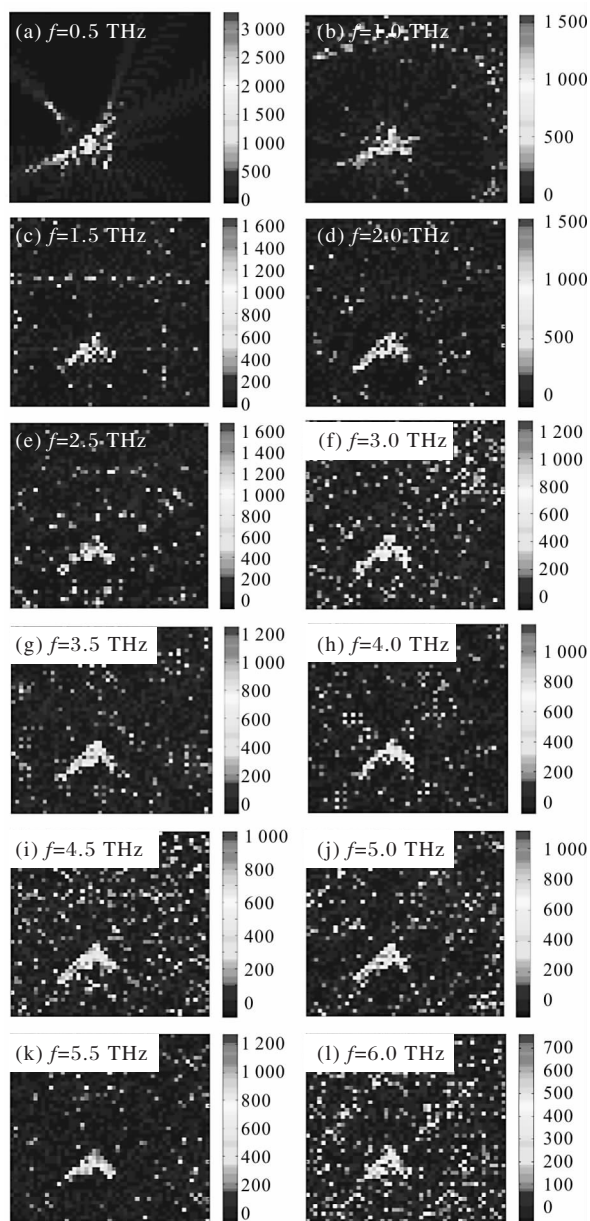


图 10  $R=0.25\text{ m}, N=300$  时不同频率下的成像结果  
Fig.10 Imaging results of different frequencies  
while  $R=0.25\text{ m}, N=300$

## 4 结 论

文中对 THz 干涉成像的原理进行了研究, 设计了 THz 干涉成像的原理性方案, 其工作方式/system 射出 THz 波, 辐射波经目标调制后, 其反射波(或后向散射波)经收集装置进入均匀圆周探测阵列。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, 然后进行干涉成像得到目标图像。依据干涉成像原理, 通过进行不同的参数设置, 对均匀圆周阵列的仿真实验分析了成像频率、阵列半径、探测元数目的设置对成像性能的影响, 仿真结果对开展 THz 干涉成像的研究和工程实际应用中的成像系统研制有重要的参考价值, 主要结论有:

- (1) 在其他参数不变的情况下, 成像的探测频率越高, 可有效成像要求的圆周阵列半径越小。
- (2) 在其他参数不变的情况下, 增加阵元数目可提高成像质量, 但数目大于一定数值后, 再增加阵元数目对成像质量改善不明显。
- (3) 均匀圆形阵列的有效成像带宽较宽。

## 参 考 文 献:

- [1] Li Hongguang, Yang Hongru, Xue Zhanli, et al. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1410–1416. (in Chinese)  
李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤波法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1410–1416.
- [2] Zhang Jianfa, Yuan Xiaodong, Qin Shiqiao. Tunable terahertz and optical metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 349–364. (in Chinese)  
张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 349–364.
- [3] Peter Uhd Jepsen, David G Cooke, Martin Koch. Terahertz spectroscopy and imaging: modern techniques and applications[J]. *Laser Photonics*, 2011, 5(1): 124–166.
- [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)  
张跃东, 江月松, 何云涛. 采用光学处理方法的被动太赫

- 兹波综合孔径成像 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 477-481.
- [5] Cui Shanshan, Li Qi. Denoising research on terahertz digital holography based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1836-1840. (in Chinese)  
崔珊珊, 李琦. 基于小波变换的太赫兹数字全息再现现象去噪研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1836-1840.
- [6] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [7] John F Federici, Dale Gray, Brian Schulkin, et al. Terahertz imaging using an interferometric array [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(12): 2477-2479.
- [8] Aparajita Bandyopadhyay, Andrei Stepanov, Brian Schulkin, et al. Terahertz interferometric and synthetic aperture imaging [J]. *Optical Society of America*, 2006, 23(5): 1168-1178.
- [9] 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.
- [10] John F Federici, Brian Schulkin, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications -explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond Sci Technol*, 2005, 20: S266-280.
- [11] Liu Zhiwei, Su ke, Dale Gray, et al. Video-rate terahertz interferometric and synthetic aperture imaging [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3788-3795.
- [12] Kenneth P Walsh, Brian Schulkin, Dale Gary, et al. Terahertz near-field interferometric and synthetic aperture imaging[C]//SPIE, 2004, 5411: 9-17.
- [13] 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)  
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中的衰减特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 523-527.
- [14] Wu Qingzhao, Gu Li, Tan Zhiyong, et al. Detection of a directly modulated terahertz light with quantum-well photodetector [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12): 120401.
- [15] Li Qi, Hu Jiaqi, Yang Yongfa. 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2188-2195. (in Chinese)  
李琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现现象复原[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2188-2195.
- [16] Su K, Liu Z, Barat R B, et al. Two-dimensional interferometric and synthetic aperture imaging with a hybrid terahertz/ millimeter wave system [J] *Appl Opt*, 2010, 49: E13-E19.