

文章编号: 2095-4980(2016)06-0833-05

## 高分辨力亚毫米波全息成像系统

王子野<sup>1,2</sup>, 乔灵博<sup>1,2</sup>, 王迎新<sup>1,2</sup>, 赵自然<sup>1,2</sup>

(1.清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2.粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 主动式毫米波成像为人体安检提供了一种安全、有效的技术手段, 对进一步提高成像分辨率和成像质量, 发展宽带高频的毫米波成像系统具有重要意义。为此建立了一个宽带高频的主动式亚毫米波全息成像系统, 其发射天线的工作频率在 280 GHz~320 GHz 范围, 使用外差混频技术直接测量得到全息数据, 对其进行重建后得到目标反射率图像。同时测试了系统的工作性能, 得到了距离向和方位向分辨率以及系统的信噪比和噪声等效反射率差, 距离向分辨率小于 4 mm, 方位向分辨率为 2.5 mm × 2.5 mm, 均接近分辨率的理论值。此外利用该系统的宽带特性研究了带宽对毫米波全息成像的影响, 宽带成像除提高距离向分辨率外还有效地抑制了散斑效应。

**关键词:** 亚毫米波; 宽带天线; 外差混频技术; 全息成像

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0833

## Wide-band three-dimensional submillimeter-wave holographic imaging system

WANG Ziye<sup>1,2</sup>, QIAO Lingbo<sup>1,2</sup>, WANG Yingxin<sup>1,2</sup>, ZHAO Ziran<sup>1,2</sup>

(1.Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Active millimeter wave imaging provides a safe and effective technique for human security inspection. In order to further improve the imaging resolution and quality, the development of millimeter wave imaging system with wide band and high frequency is of great significance. For this purpose, an active submillimeter-wave imaging system with wide band and high frequency which utilizes a 280 GHz–320 GHz transceiver is constructed and characterized. It uses the heterodyne mixing technique to directly get the holographic data which can be reconstructed to form the reflectivity image of object. The range and cross-range resolutions are tested as well as the signal to noise ratio of the system. The range and cross-range resolution reaches 4 mm and 2.5 mm×2.5 mm, respectively, approaching their theoretical values. The impact of bandwidth on the imaging results is also investigated benefiting from the wide-band nature of the system. Apart from increasing the range resolution, wide-band nature can also effectively suppress the speckle effect.

**Keywords:** submillimeter-wave; wideband antennas; heterodyne mixing technique; holographic imaging

随着当前恐怖主义威胁的增加, 在客流量大的地方进行必要的安全检查变得越来越重要<sup>[1]</sup>。传统的安检系统包括用于人体的金属探测器和用于手提物品的 X 射线探测器, 这些系统在特定情况下较有效, 但存在一些在今后发展中亟待解决的问题。金属探测器只能探测金属目标, 如普通的手枪和刀, 且不能区分无害的金属物与实际威胁从而带来严重的无效警报, 而包括塑料和陶瓷武器在内的现代威胁物却无法被检测到; X 射线成像系统具有解决上述问题的能力, 然而暴露在 X 射线中被认为具有不利于健康的影响, 会妨碍公众接受这类系统, 因此开发并发展用于人体安检的新型成像类系统的需求越来越迫切<sup>[2]</sup>。毫米波作为一种高频电磁波, 通常其频率定义为 30 GHz~300 GHz。毫米波是非电离辐射, 因此在合适的功率范围内操作不存在影响人体健康的问题。此外, 它能够穿透常见的衣物材料, 形成人体及任何隐藏物品的影像。相比于微波, 毫米波由于波长较短, 因此可获得更高的成像分辨率。特别是 David M. Sheen 等提出的毫米波宽带全息成像理论, 可实现对人体的三维成像<sup>[3]</sup>。本文

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-09-18

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项资助(2012YQ140037); 北京市科技计划课题(Z151100003315022)

介绍了一个工作在 280 GHz~320 GHz 频率范围内的亚毫米波成像系统,并介绍了系统方位向、距离向分辨力及信噪比等性能指标的测试,之后对比研究了高频情况下不同带宽的成像结果。

## 1 成像系统及性能测试

毫米波全息成像是主动式毫米波成像的主要技术之一,可分为直接全息技术和间接全息技术<sup>[2]</sup>。间接毫米波全息与传统的光学全息技术相似<sup>[4]</sup>,因此要求使用相干波进行干涉测量来获得相位信息。而直接全息利用了外差混频技术,可直接测量到散射信号和本地振荡信号间的相位差,这就使得装置复杂性大大降低<sup>[2]</sup>。为了符合当前的发展趋势并降低系统复杂性,该亚毫米波成像系统采用了直接全息技术,并使用了矢量网络分析仪获得相位和幅度信息,之后利用计算机重建被测物体的三维图像。

### 1.1 系统方案

该系统主要由 4 部分构成,即发射模块、接收模块、混频模块及矢量网络分析仪。该系统成像的具体工作原理为:由矢量网络分析仪产生 23.3 GHz~26.7 GHz 的初始信号,经过放大及 12 倍频后由发射天线发射,频率为 280 GHz~320 GHz;发射信号到达目标后与目标相互作用,反射回的信号到达接收天线。在此过程中需要注意的是,将发射链路和接收链路呈直角放置,使用硅片作为分束器,这样发射波与反射波所走的光程是相同的,因此发射天线和接收天线可以近似被认为在同一位置;二次谐波混频器将接收信号与本地振荡信号混频后得到测量中频信号,发射信号与本地振荡信号经过混合倍频后得到参考中频信号,2 组中频信号都被输入到矢量网络分析仪中;矢量网络分析仪记录了反射信号的相位和幅度信息,然后利用记录的数据来数学重建目标反射率的函数。成像系统的简要示意图及光学照片见图 1。实际实验中,将待测目标固定在可以水平、竖直 2 个方向移动的平移台上,控制平移台的初始位置及移动范围可使待测目标上任意一点能够接收到发射信号,一般采用水平及竖直方向的扫描范围为 20 cm × 15 cm,距离方向样品与发射天线最前端的距离约为 30 cm。待扫描结束后,将数据由矢量网络分析仪转移至计算机内,采用毫米波全息重建算法对图像进行重建。

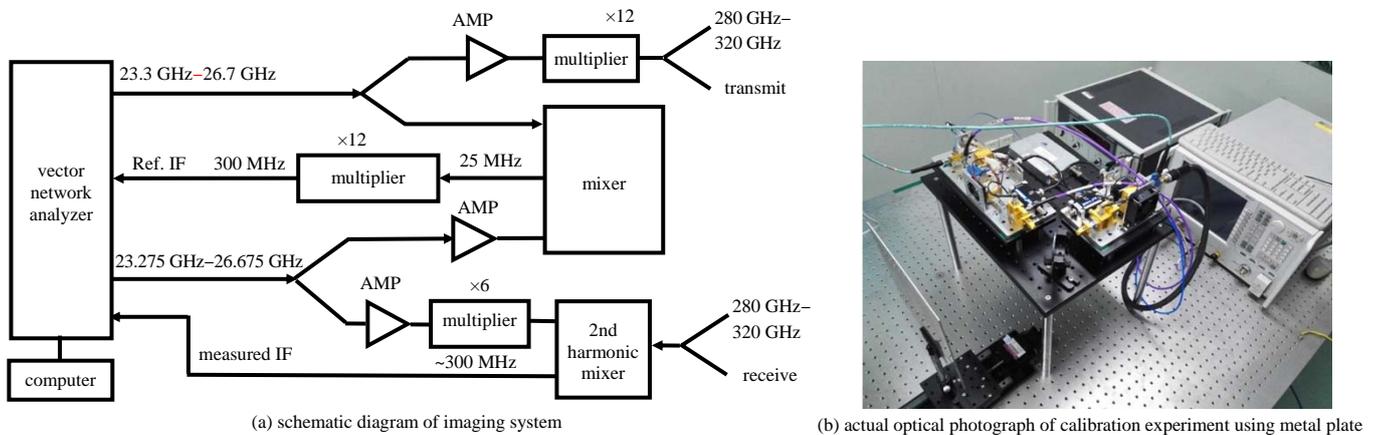


Fig.1 Description of submillimeter wave imaging system

图 1 亚毫米波成像系统方案说明

### 1.2 性能指标测试

系统搭建并调试好后,测试该系统的基本成像指标,包括方位向分辨力、距离向分辨力以及信噪比。

#### 1.2.1 方位向分辨力

使用倾斜刀口法进行方位向分辨力的测试<sup>[5]</sup>。该方法的基本思路是:从含有边缘响应的图像中,提取边缘扩展函数,进而计算线扩展函数,最终得到该方向分辨力<sup>[6]</sup>。实际测量过程以水平方向为例:首先使用 300 GHz 的单频亚毫米波对一个薄金属板进行二维扫描,得到图 2(a)的金属板二维图像;接下来选择与水平方向近似平行但仍有小角度倾斜的下边缘区域,得到含有边缘响应的成像区域,之后求出该区域像素值的重心位置作为刀口位置,见图 2(b);利用费米函数对刀口位置进行拟合,该函数表达式如下:

$$f = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x-b}{c}\right)} \quad (1)$$

式中  $a, b$  和  $c$  是未知参数, 拟合得到图 2(c) 的边缘扩展函数曲线; 最后对得到的边缘扩展函数一次求导, 得出线扩展函数, 见图 2(d); 线扩展函数的半高宽即为水平方向的分辨力。

测试中需要注意的是, 在拟合边缘扩展函数时可以采用不同的解析函数模型, 如柯西、高斯等, 但有研究证明费米函数在拟合边缘扩展函数中拥有最好的性能<sup>[7]</sup>, 因此本次实验中采用费米函数进行拟合。竖直方向也进行类似的处理, 只要在提取感兴趣的边缘区域时选择与竖直方向近似平行的刀口附近即可。由倾斜刀口法, 得到水平和竖直方向的方向向分辨力为  $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。对三维毫米波成像系统, 重建后图像的方向向分辨力的理论值可以用式(2)计算:

$$\delta_x = \frac{\lambda_c}{4 \sin \frac{\theta_b}{2}} \quad (2)$$

式中:  $\theta_b$  为天线发射角或者孔径覆盖角度中较小的一个;  $\lambda_c$  为发射信号中心频率的波长<sup>[2]</sup>。由于扫描范围较大, 所以采用实际发射天线角, 查看 VDI 公司天线标称角规格得半角宽度为  $6.1^\circ$ , 实验中发射信号中心频率波长为  $1 \text{ mm}$ , 得到理论值  $2.35 \text{ mm}$ , 与实际测量得到的方向向分辨力非常接近<sup>[2]</sup>。考虑偏差的来源, 除了由于测试本身带来的误差之外, 还有拟合区域不够长的原因。由于该成像系统本身成像范围及扫描速度的限制, 不可能取到较长的带有边缘影响的成像区域, 因此测试的结果有一定偏差, 但仍与理论值接近。

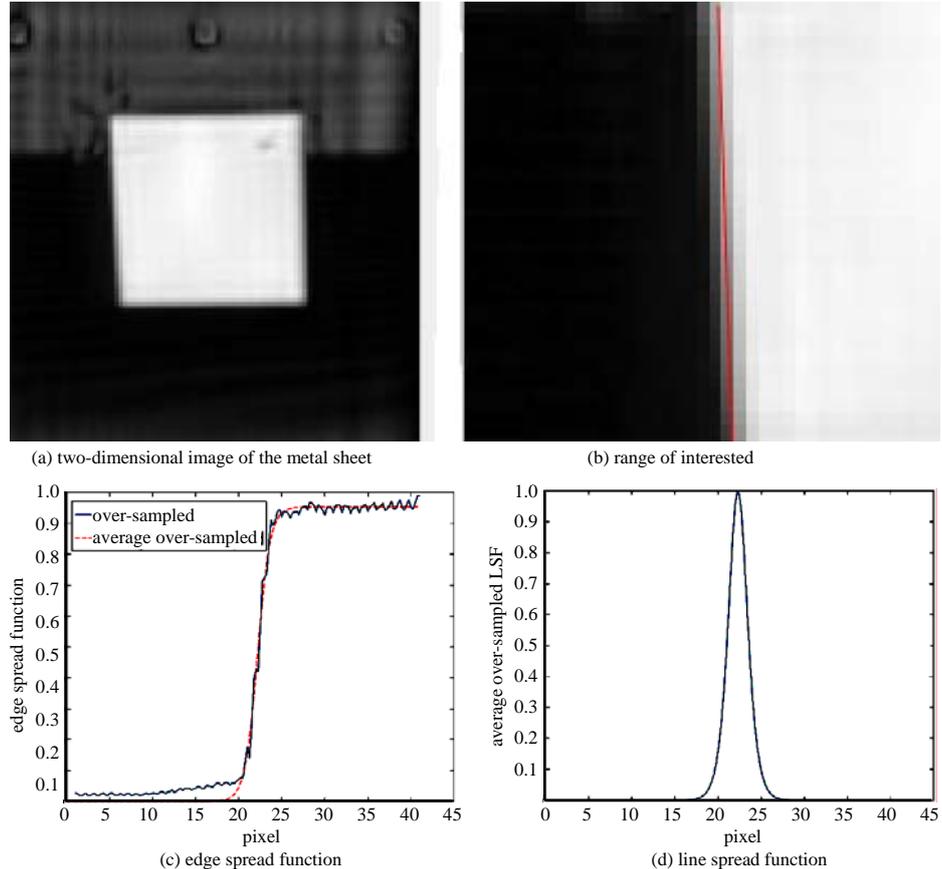


Fig.2 Progress of testing horizontal resolution with slanted-edge method

图 2 斜刀口法测试系统水平方向分辨力

### 1.2.2 距离向分辨力

利用在距离方向上的一维成像结果测试距离向分辨力。利用平移台可以精确得到物体在距离方向的位移, 实验中将金属板依次放置在距离发射天线  $24 \text{ cm}, 24.1 \text{ cm}, 24.2 \text{ cm}, \dots, 24.8 \text{ cm}$  的位置, 其中各个位置与发射天线顶端的绝对距离是近似的, 但各个位置之间的相对距离是通过控制平移台的移动精确得到。即金属板每次固定的位置在距离向相隔  $1 \text{ mm}$ , 接下来进行扫描, 共得到 9 组成像数据。利用得到的一维数据作图, 并对幅度进行归一化, 结果见图 3(a)。然后截取距离  $23 \text{ cm} \sim 27 \text{ cm}$  附近及归一化幅度在  $0.93$  以上的窗口, 可明显看到  $z=24 \text{ cm} \sim 24.3 \text{ cm}$  的曲线几乎完全重合, 而与  $z=24.4 \text{ cm}$  的曲线是分开的,  $z=24.4 \text{ cm} \sim 24.6 \text{ cm}$  的曲线同样也重合在一起, 与  $z=24.7 \text{ cm}$  和  $z=24.8 \text{ cm}$  的曲线分开。因此可以得到系统的距离向分辨力介于  $3 \text{ mm}$  到  $4 \text{ mm}$  之间, 保守估计为小于  $4 \text{ mm}$ 。对三维毫米波成像系统, 重建后图像的距离向分辨力的理论值可以用式(3)计算:

$$\delta_z = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

式中:  $B$  是系统瞬时频率的带宽;  $c$  是光速<sup>[2]</sup>。实际系统的带宽为  $40 \text{ GHz}$ , 计算得到理论值为  $3.75 \text{ mm}$ , 与测量得到的距离向分辨力较接近。

### 1.2.3 信噪比及噪声等效反射率差

利用对金属平板的成像结果估计系统的信噪比。对固定在塑料背板上的金属平板进行二维扫描成像, 接下来在图像中分别选取 1 块明亮区域, 1 块黑暗区域, 见图 4。再利用式(4)计算,

$$R_{\text{SN}} = \frac{\bar{B}_{\text{bright}} - \bar{B}_{\text{dark}}}{\sigma(B_{\text{dark}})} \quad (4)$$

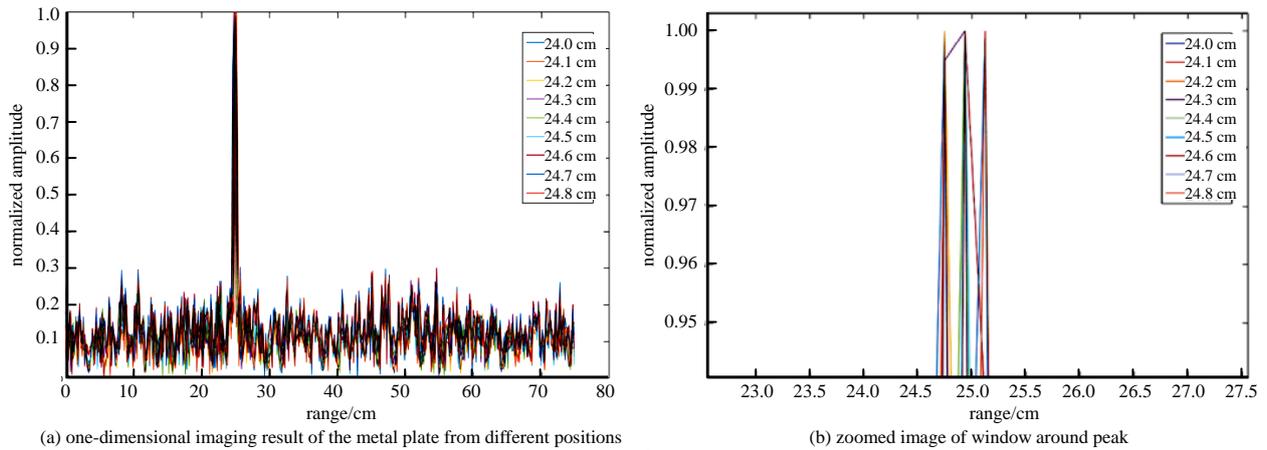


Fig.3 Imaging results of range resolution test  
图 3 距离向分辨率测试的成像结果

式中  $\bar{B}_{\text{bright}}$  和  $\bar{B}_{\text{dark}}$  是金属片边缘图像中所选择区域(在图 4(a)中明亮金属片处和黑暗背景处各提取一部分)的亮度均值;  $\sigma(B_{\text{dark}})$  是黑暗区域亮度的均方差<sup>[8]</sup>, 最终得到系统成像的信噪比为 21.2 dB。

一幅图像的噪声等效反射率差  $NE\Delta R$  为:

$$NE\Delta R = \frac{\bar{B}_{R+\Delta R} - \bar{B}_R}{\bar{B}_1} = \frac{R_{SN}\sigma(B_{\text{dark}})}{\bar{B}_1} \quad (5)$$

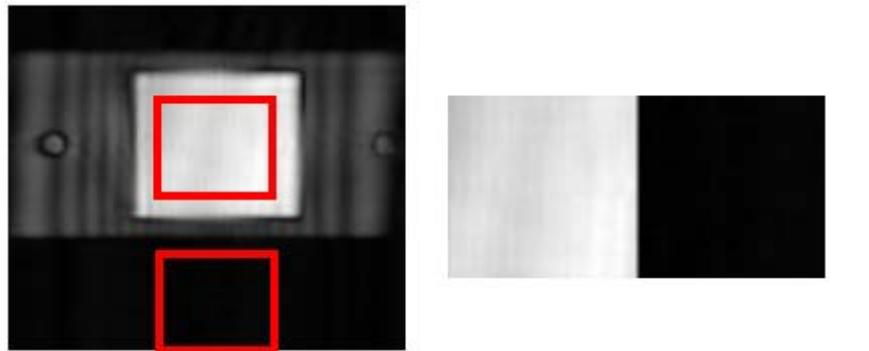
式中:  $\bar{B}_{R+\Delta R}$  和  $\bar{B}_R$  是反射率差有增量区域的亮度;  $\bar{B}_1$  是反射率  $R$  为 1 的区域的亮度。在这种情况下, 假定金属片所在区域的反射率为 1, 即  $\bar{B}_{\text{bright}} = \bar{B}_1$ <sup>[8]</sup>, 最终得到系统的噪声等效反射率差为 0.007。

## 2 成像结果

系统工作最大带宽是 280 GHz~320 GHz, 因此成像测试可以在单频到 40 GHz 的频率范围内进行。

实验中使用 1 个固定在塑料背板上的金属仿真枪作为目标, 成像距离约为 30 cm。采用逐点扫描的方式成像, 在竖直和水平方向上的采样点间隔均为 1 mm, 满足采样条件的要求<sup>[3]</sup>, 水平方向采集 201 个点, 竖直方向采集 151 个点。宽带扫描的中心频率为 300 GHz, 40 GHz 的带宽范围内均匀分布 200 个采样点, 即频率采样间隔为 0.2 GHz, 满足频率采样条件的要求<sup>[3]</sup>。

实验中对比了在中心频率同为 300 GHz 的情况下, 不同带宽对仿真手枪的成像结果, 证实了使用宽带成像可以提高成像质量, 尤其在减少图像散斑方面的效果更为明显。当宽带较宽时, 增加带宽引起的散斑抑制并不明显, 但当带宽缩小到某一个范围内后, 随着带宽的降低, 图像的质量将会急剧下降, 最突出的表现就是散斑效应越来越明显。得益于系统的宽带特性, 可以观察带宽对成像的影响, 从 40 GHz 依次变为 30 GHz, 20 GHz



(a) imaging results of metal plate (b) picture of extracted bright part and dark part side by side  
Fig.4 Imaging results of signal-to-noise ratio and equivalent reflectivity difference test  
图 4 信噪比及噪声等效反射率差测试的成像结果



(a)  $f=40$  GHz (b)  $f=10$  GHz (c)  $f=2$  GHz  
Fig.5 Imaging results of different bandwidths  
图 5 不同带宽的成像结果

及 10 GHz, 之后是 6 GHz, 4 GHz 和 2 GHz 以及单频。当带宽小于 6 GHz 以后, 图像出现了明显的散斑效应, 并且随着带宽的减小越来越严重。散斑效应是由来自多个散射位置或同一分辨力单元中不同深度的建设性和破坏性干扰造成的, 该效应在单频全息成像的方法中尤其严重<sup>[9]</sup>。图 5 是不同带宽时的图像, 可以看到带宽在 2 GHz 时有很严重的散斑效应。

### 3 结论

由于主动式毫米波成像的突出优势, 其未来在人体安检方面有很大的应用价值, 将会是人体安检领域的研究重点。由于成像系统及目标的自然特性所造成的散斑效应将会影响图像质量, 尤其是使用较窄的频带或者单频成像会大大增加散斑效应。高频及宽带的系统可以很大程度上降低散斑效应的影响, 同时提高方位向及距离向分辨力, 从而提高图像质量, 因此研究和发高频宽带成像系统具有重要现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 赵自然. 人体安检新技术的分析与探讨[J]. 中国安防, 2012(3):33-36. (ZHAO Ziran. Analysis and discussion on the new technology of human body security[J]. China Security Protection, 2012(3):33-36.)
- [2] SHEEN D M, MCMAKIN D L, HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2001, 49(9):1581-1592.
- [3] QIAO L, WANG Y, ZHAO Z, et al. Exact reconstruction for near-field three-dimensional planar millimeter-wave holographic imaging[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2015, 36(12):1221-1236.
- [4] QIAO L, WANG Y, SHEN Z, et al. Compressive sensing for direct millimeter-wave holographic imaging[J]. Applied Optics, 2015, 54(11):3280-3289.
- [5] SAMEI E, RANGER N T, CHEN Y. Intercomparison of methods for image quality characterization. I. Modulation transfer function[J]. Medical Physics, 2006, 33(5):1454-1465.
- [6] 戴奇燕, 夏德深, 何红艳, 等. 刀刃法在轨 MTF 测量性能分析[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3):22-27. (DAI Qiyan, XIA Deshen, HE Hongyan, et al. Performance analysis of MTF measurement using edge method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(3):22-27.)
- [7] LI T, FENG H, XU Z, et al. Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7498(4):60-71.
- [8] TAMMINEN A. Indirect holographic imaging: evaluation of image quality at 310 GHz[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010, 7670(1):76700A-76700A-11.
- [9] SHEEN D M, MCMAKIN D L. Speckle in active millimeter-wave and terahertz imaging and spectroscopy[C]// Passive Millimeter-Wave Imaging Technology X. 2007, 6548:654809-1-654809-10.

#### 作者简介:



王子野(1991-), 女, 河北省承德市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波人体安检成像技术. email: wangziye14@sina.com.

乔灵博(1990-), 男, 河南省洛阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波人体安检成像技术.

王迎新(1981-), 男, 辽宁省普兰店市人, 博士, 助理研究员, 主要从事太赫兹光谱分析与成像等方面的研究.

赵自然(1977-), 男, 辽宁省铁岭市人, 博士, 副研究员, 主要从事辐射图像获取与处理、图像重建和处理方法等方面的研究。获北京市发明专利一等奖、国家科技进步奖创新团队、中国体视学学会首届科学技术一等奖、中国发明专利金奖等奖励。近 5 年来, 发表学术论文 20 余篇, 其中 SCI 收录 12 篇, EI 收录 18 篇; 作为核心发明人获得发明专利授权 13 项。