

牛轶杰, 王子野, 乔灵博. 宽带全息重建算法应用于亚毫米波成像系统初探[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(5): 531-538. doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.05.04.  
Niu YJ, Wang ZY, Qiao LB. A primary study on wide-band holographic reconstruction algorithm applied to submillimeter-wave imaging system[J]. CT Theory and Applications, 2016, 25(5): 531-538. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.05.04.

## 宽带全息重建算法应用于亚毫米波成像系统初探

牛轶杰<sup>1, 2, 3✉</sup>, 王子野<sup>2, 3</sup>, 乔灵博<sup>2, 3</sup>

1. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028
2. 清华大学工程物理系, 北京 100084
3. 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084

**摘要:** 毫米波全息成像技术是人身安检的重要技术手段, 为进一步提高成像的分辨率和图像质量, 研究宽带高频的亚毫米波成像系统具有重要的意义。本文基于亚毫米波全息成像系统的系统构成, 给出了适用的宽带全息重建算法, 对利用亚毫米波全息成像系统实际测得的相位和幅度信息进行重建并获得了目标图像。实验结果表明, 上述宽带全息重建算法在亚毫米波波段内可以有效地重建图像, 并验证了使用宽带成像可以有效提高图像分辨率、抑制散斑效应。

**关键词:** 亚毫米波成像; 人身安检; 宽带全息成像

doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.05.04 中图分类号: O 438.1 文献标志码: A

近年来, 随着国际安全形势的复杂演变, 国内外恐怖分子通过人身体表隐藏携带武器和工具对民航客机实施非法干扰的事件时有发生, 因此人身安全检查工作备受各国政府和社会的重视<sup>[1]</sup>。当前我国人身安检的主要方法依然是金属探测器和触摸式安检, 此种方式操作简便, 通过速度快, 对金属违禁品检出率高, 但一直存在可探测违禁品种类少、无法对隐私位置全面检查等问题, 对于新型人身安检设备有着强烈的需求<sup>[2]</sup>。较早发展的 X 射线类设备虽然具有较为全面的探测能力, 但始终无法回避电离辐射的问题, 即使是剂量很低的背散射 X 射线人体安检设备, 在欧美国家初步应用的过程中也一直遭受着辐射安全的质疑。

随着太赫兹技术基础理论的发展以及大量应用研究的深入, 主动式太赫兹成像技术应用于近距离和站开式的人体安检越来越受到关注<sup>[3]</sup>。但由于太赫兹成像技术在辐射源、探测器及相关的功能元器件技术方面发展不够理想, 尚不能广泛地实现实用化和商业化<sup>[4]</sup>。

相比而言, 毫米波成像技术在近几年已经得到了较快的发展, 并有望取代传统的人体安检手段<sup>[5]</sup>。毫米波是一种高频电磁波, 频率通常在 30~300 GHz 的范围内, 能够穿透常见的衣物材料, 形成人身及体表隐藏物品的图像, 有利于隐藏物品的分析与定位。由于毫米波是非电离辐射, 对人体健康没有影响, 是人体成像的理想照射源<sup>[6]</sup>。美国西北太平洋实验室(PNNL)最早开始了主动式毫米波成像设备的研究, Sheen 等<sup>[2]</sup>提出了毫米波宽带全息成

收稿日期: 2016-06-24。

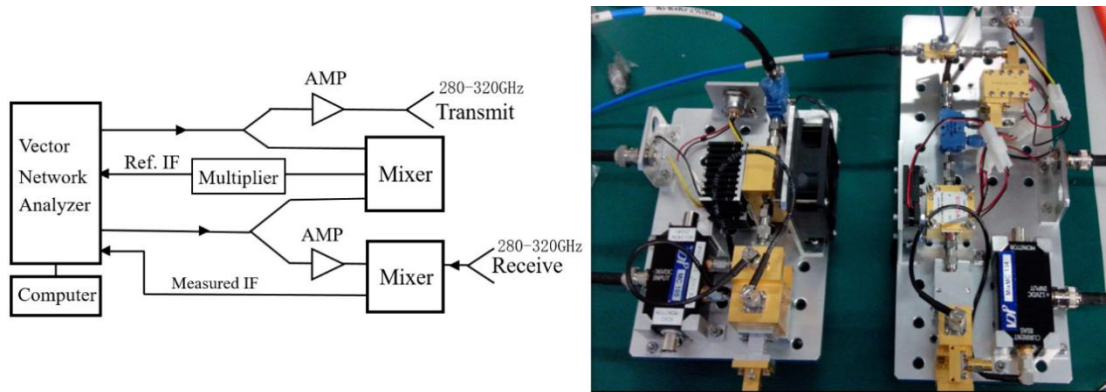
基金项目: 国家重大仪器设备开发专项(2012YQ140037)。

像理论，实现了人体的三维成像。国内的一些单位也在毫米波成像领域进行了大量研究工作，如中科院电子所搭建了 200 GHz 人体成像系统<sup>[7-8]</sup>，中国工程物理研究院实现了 140 GHz<sup>[9]</sup>和 670 GHz<sup>[10]</sup>的合成孔径成像，北京理工大学搭建了 220 GHz 雷达成像系统<sup>[11]</sup>。综上，毫米波成像技术已经成为国内外安检领域研究的重点。本文针对工作在 280~320 GHz 频率范围内的一套亚毫米波成像系统，给出适用的宽带全息重建算法和相应的成像效果。

### 1 成像系统方案介绍

毫米波全息成像可分为直接全息技术和间接全息技术<sup>[2]</sup>。间接全息技术与传统的光学全息技术相似<sup>[12]</sup>，要求使用相干波进行干涉测量来获得相位信息。而直接全息技术则利用外差混频方法，可直接测量到散射信号和本地振荡信号间的相位差，大大降低了装置的复杂性<sup>[2]</sup>。本文中亚毫米波成像系统采用直接全息技术，使用矢量网络分析仪获得相位和幅度信息，再利用计算机重建被测物体的三维图像。

成像系统由发射模块、接收模块、混频模块及矢量网络分析仪等四部分构成。由矢量网络分析仪发射信号经倍频后到达目标与目标相互作用，反射回的信号到达接收天线。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，两组中频信号都被输入到矢量网络分析仪中，记录下反射信号的相位和幅度信息等数据。成像系统方案示意图及光学照片如图 1 所示。实验中将待测目标固定在可以水平、竖直两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都能够接收到发射信号。水平和竖直方向的扫描范围为 200 mm × 150 mm，待测目标与发射天线最前端的距离约为 300 mm。



(a) 原理示意图

(b) 光学照片

图 1 成像系统示意图

Fig.1 Illustrations of the imaging system

### 2 宽带重建算法

毫米波宽带全息成像技术由单频全息成像发展而来<sup>[2]</sup>。单频全息成像技术通常采用可以进行电子开关快速切换的收发天线阵列(线阵)作为收发器件，然后通过线列的移动形成一个较大的孔径从而对目标进行主动的单频照射。宽带重建算法与单频重建算法相似，但由

于将单频照射扩展到了宽带照射，增加了距离向信息，此数据可通过重建形成三维图像。宽带全息成像采用宽带的毫米波源照射目标，目标反射的信号与本振信号混频，进而被接收器相干地记录下来，将此数据经过重建形成目标的三维反射率图像。宽带全息成像技术的基本假设是接收天线接收到的毫米波信号为一次反射的信号，即没有考虑多次反射以及由于目标本身带来的散射或极化改变，因此该方法重建得到的目标对毫米波的反射率是近似的。

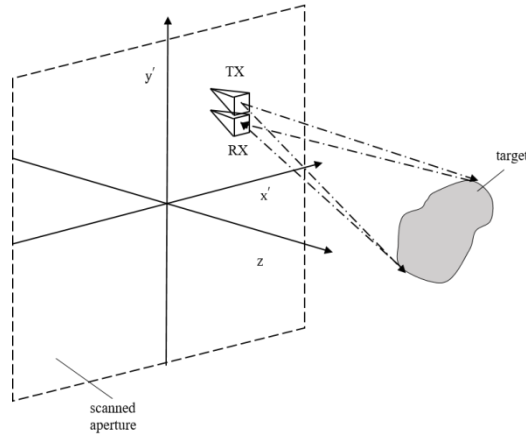


图 2 宽带全息成像技术示意图

Fig.2 Illustrations of wide-band holographic imaging technique

宽带全息成像技术的示意图如图 2 所示，发射天线和接收天线虽然分置，但两者近似位于同一位置，可假设两者重合，发射天线和接收天线组成了“收发器”。扫描孔径由多个收发器组成，扫描时一个或多个目标在其覆盖范围内。扫描过程中，位于扫描孔径上某一点的收发器发射毫米波信号，该信号到达目标后将经过整个目标的反射；收发器接收到的信号则是目标上每一点的反射率与该点到收发器往返相位乘积的在整个目标上的叠加，即发射率乘以往返相位后在整个目标上积分。该过程的具体分析和公式表达如下：

假设收发器位于  $z = Z_1$  的平面上，反射率函数  $f(x, y, z)$  表征目标特性，则收发器上某点  $(x', y', Z_1)$  到目标上一点  $(x, y, z)$  的往返相位应为

$$2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-Z_1)^2} \tag{1}$$

收发器探测到的信号是

$$s(x', y', \omega) = \iiint f(x, y, z) \times e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-Z_1)^2}} dx dy dz \tag{2}$$

其中  $k$  为波数，满足  $k = \omega/c$ ， $\omega$  为瞬时角频率， $c$  为光速。

由于幅度对重建图像影响较小，因此暂时忽略信号幅度随距离的衰减。公式 (2) 中的指数项代表来自  $(x', y', Z_1)$  发射的球面波，可以被展开为平面波，即

$$e^{-j2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-Z_1)^2}} = \iint e^{-jk_x(x-x')-jk_y(y-y')-jk_z(z-Z_1)} dk_x dk_y \tag{3}$$

其中  $k_x$ ， $k_y$  和  $k_z$  表示与  $x'$ ， $y'$  及  $z$  相关的空间波数值。

将上式带入到 (2) 中得到

$$s(x', y', \omega) = \iiint \left( \iiint f(x, y, z) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dx dy dz \right) \times e^{jk_z Z_1} e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dk_x dk_y, \quad (4)$$

注意到其中含有傅里叶变换及傅里叶逆变换的形式, 可继续将其写为

$$s(x', y', \omega) = \iint F(k_x, k_y, k_z) e^{jk_z Z_1} e^{j(k_x x' + k_y y')} dk_x dk_y = FT_{2D}^{-1} \{ F(k_x, k_y, k_z) e^{jk_z Z_1} \} \quad (5)$$

又因为

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 = 4 \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \quad (6)$$

将  $k_z$  替换为上式转变后形式最终得到

$$f(x, y, z) = FT_{3D}^{-1} \left( FT_{2D} (s(x, y, \omega)) e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} Z_1} \right) \quad (7)$$

式 (7) 中得到的  $f(x, y, z)$  是在距离收发器  $z$  位置处的目标平面的反射率, 借由系统的宽带特性可以得到目标上一组不同距离的平面反射率图像, 因此可以实现目标物体的三维重建。实际重建时需要注意数据在竖直平面, 即  $x, y$  方向上是均匀采样的, 同时由于在宽频下的等间隔采样, 在  $\omega$  方向上也是均匀的, 因此在处理数据时候可以直接对  $s(x, y, z)$  做二维 FFT 变换, 得到  $s(k_x, k_y, \omega)$ 。由公式 (6) 可知  $k_z$  与  $x, y, \omega$  的关系是非线性的, 所以在进行三维的傅里叶逆变换之前, 需要对  $k_z$  方向上的数据重新进行等间隔采样, 该步骤可以利用线性插值实现。宽带重建算法的具体流程如图 3 所示。

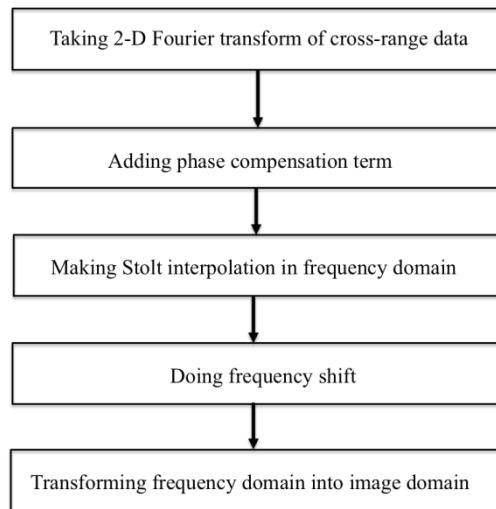


图 3 宽带全息重建算法流程图

Fig. 3 Block diagram of wide-band holographic reconstruction algorithm

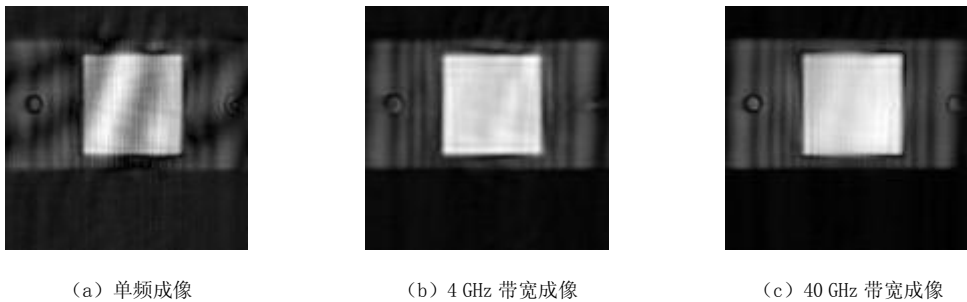
### 3 成像效果

系统搭建并调试完成后, 分别对结构较简单的薄金属板和结构较复杂的金属手枪模型进行成像扫描及图像重建。在成像过程中, 采用逐点扫描的方式对待测目标进行二维扫描,

竖直和水平方向上的采样间隔均为 1 mm，满足采样条件的要求<sup>[5]</sup>。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>[13]</sup>。

首先对结构简单的薄金属板进行成像。为验证系统单频成像的效果，使用 300 GHz 的单频亚毫米波，对一个粘贴在塑料板上的薄金属板进行二维扫描，水平方向和竖直方向均采集 121 个点，重建后得到的二维图像如图 4 (a) 所示。从图中可以看出，该成像系统利用亚毫米波进行单频全息成像可以清晰地分辨金属板及其背后的塑料板，同时塑料背景上的小螺丝孔也清晰可见，说明该图像具有较高的方位向分辨率和对比度<sup>[14]</sup>。但是由于不具备距离向的分辨能力，单频毫米波图像中薄金属板受到背景塑料板的干扰，散斑效应明显<sup>[15]</sup>。

散斑效应是由不同距离向上目标的反射信号叠加而造成的，当距离向分辨率较差时，由于无法分辨目标在距离向上的精细结构，叠加的信号就会具有很大的随机性，进而形成散斑干扰。为了进行对比，分别采用 4 GHz 和 40 GHz 带宽（中心频率 300 GHz）对上述目标进行成像，重建出的三维图像的距离向最大投影图如图 4 (b) 和图 4 (c) 所示，图 4 三幅图像的中心剖面线的对比如图 5 所示。通过图 4 和图 5 的结果可以看出，由于采用了宽带成像，距离向分辨率得到了显著地提高，大大削弱了散斑效应引起的干扰。



(a) 单频成像 (b) 4 GHz 带宽成像 (c) 40 GHz 带宽成像

图 4 薄金属板不同带宽的成像效果

Fig. 4 Imaging results of metal sheet based on different bandwidths

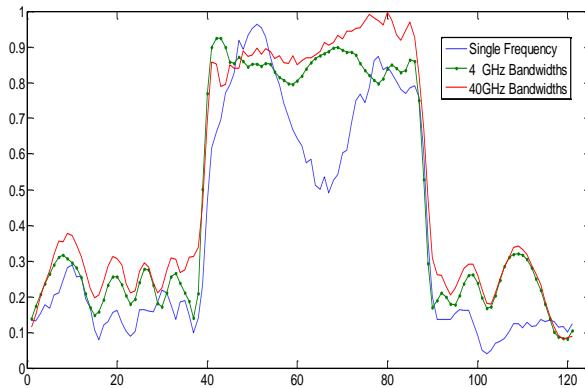


图 5 薄金属板成像的水平剖面线对比

Fig. 5 Horizontal image profile comparison of the imaging results of metal sheet

同样地,对金属手枪模型进行扫描,此时考虑到手枪的长宽比例,水平方向采集 201 个点,竖直方向采集 151 个点。300 GHz 单频重建结果如图 6 (a) 所示,从图中可以看到,由于手枪复杂的距离向分布,形成了严重的散斑干扰,手枪模型的细节信息已经无法分辨。利用上述宽带全息重建算法分别使用 4 GHz 和 40 GHz 两种带宽来重建图像,图像效果如图 6 (b) 和图 6 (c) 所示。可以看出当带宽为 4 GHz 时,手枪模型的大部分区域已经比较清楚,但是左上角的条纹部分仍然比较模糊。当带宽从 4 GHz 提高到 40 GHz 后,手枪模型非常清晰,图像质量得到了明显提升,散斑效应得到了很好地抑制。如果需要进一步提升图像质量尤其是抑制散斑效应的影响,除了使用宽带照射源外,还需要从其他成像要素,如多角度照射、多相位模式处理等方面进行更深入的研究<sup>[16]</sup>。



(a) 单频成像

(b) 4 GHz 带宽成像

(c) 40 GHz 带宽成像

图 6 金属手枪模型不同带宽的成像效果

Fig.6 Imaging results of metal gun model based on different bandwidths

## 4 结论

毫米波全息成像技术具备安全高效、探测范围广、三维成像等优势,以后将在人身安检方面有很大的应用价值。本文利用亚毫米波全息成像系统实际测得的相位和幅度信息进行重建,推导重建过程,并通过对薄金属板和金属仿真手枪的单频、宽带扫描,以及重建实验,获得了目标图像,证明了宽带全息重建算法在高频系统架构上重建图像的有效性,验证了使用宽带成像可以有效抑制散斑效应,对研发宽带亚毫米波成像系统具有重要的现实意义。

## 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 ZR. Analysis and discussion on the new technology of human body security[J]. China Security Protection, 2012, 3: 33-36. (in Chinese).
- [2] Sheen DM, McMakin DL, Hall TE. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581-1592.
- [3] 乔灵博, 王迎新, 赵自然, 等. 主动式近距离太赫兹人体安检技术分析[J]. 微波学报, 2015, 31(4): 93-96.  
Qiao LB, Wang YX, Zhao ZR, et al. Analysis of active near-field Terahertz imaging for personnel surveillance[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(4): 93-96. (in Chinese).

- [4] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(I)[J]. 微波学报, 2011, 26(6): 1-6.  
Zheng X, Liu C. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system (I)[J]. Journal of Microwaves, 2011, 26(6): 1-6. (in Chinese).
- [5] 乔灵博, 王迎新, 赵自然, 等. 毫米波全息成像的空间采样条件[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(11): 1407-1411.  
Qiao LB, Wang YX, Zhao ZR, et al. Spatial sampling for millimeter-wave holographic imaging[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(11): 1407-1411. (in Chinese).
- [6] Oka S, Togo H, Kukutsu N, et al. Latest trends in millimeter-wave imaging technology[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2008, 1: 197-204.
- [7] 谷胜明, 李超, 高翔, 等. 三维混合域重建算法在太赫兹全息成像中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1545-1548.  
Gu SM, Li C, Gao X, et al. Three-dimensional Terahertz-wave holographic imaging based on mixed-domain reconstruction algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1545-1548. (in Chinese).
- [8] Gu S, Li C, Gao X, et al. Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(12): 3877-3885.
- [9] 成彬彬, 江舸, 杨陈, 等. 0.14 THz 高分辨力成像雷达信号处理[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1577-1581.  
Cheng BB, Jiang G, Yang C, et al. Signal processing for 0.14 THz high resolution imaging radar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1577-1581. (in Chinese).
- [10] 成彬彬, 江舸, 陈鹏, 等. 0.67 THz 高分辨力成像雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 7-11.  
Cheng BB, Jiang G, Chen P, et al. 0.67 THz high resolution imaging radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 7-11. (in Chinese).
- [11] 梁美彦, 曾邦泽, 张存林, 等. 频率步进太赫兹雷达的一维高分辨距离像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 336-339.  
Liang MY, Zeng BZ, Zhang CL, et al. One-dimensional high range resolution profile of Terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 336-339. (in Chinese).
- [12] Qiao LB, Wang YX, Shen ZJ, et al. Compressive sensing for direct millimeter-wave holographic imaging[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3280-3289.
- [13] Qiao LB, Wang YX, Zhao ZR, 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.
- [14] Tamminen A, Ala-Laurinaho J, Räisänen AV. Indirect holographic imaging: Evaluation of image quality at 310 GHz[C]. Proceeding of SPIE Defense, Security, and Sensing, 2010, 76700A: 1-11.
- [15] Sheen DM, McMakin DL. Speckle in active millimeter-wave and Terahertz imaging and spectroscopy[C]. Defense and Security Symposium, 2007, 654809: 1-10.
- [16] Jaeger I, Stiens J, Zhang L, et al. Comparison of speckle reduction diversity tools for active millimeter-wave imaging[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(7): 1716-1721.

# A Primary Study on Wide-band Holographic Reconstruction Algorithm Applied to Submillimeter-wave Imaging System

NIU Yi-jie<sup>1, 2, 3</sup>✉, WANG Zi-ye<sup>2, 3</sup>, QIAO Ling-bo<sup>2, 3</sup>

1. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

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

**Abstract:** Millimeter-wave holographic imaging technique is important means for human body security inspection. In order to further improve imaging resolution and image quality, the research of wide-band and high-frequency submillimeter-wave imaging system has great significance. Based on the construction of submillimeter-wave holographic imaging system, this paper proposes an appropriate wide-band holographic reconstruction algorithm. The target image is obtained by the measured phase and amplitude information reconstruction using submillimeter-wave holographic imaging system. Experimental results show that, the wide-band holographic reconstruction algorithm can efficiently reconstruct image within sub-millimeter wave band, to validate the use of wide-band imaging can effectively improve image resolution and suppress speckle effect.

**Keywords:** submillimeter-wave imaging; human body security inspection; wide-band holographic imaging



**作者简介:** 牛轶杰✉ (1981—), 男, 清华大学工程物理系在读博士研究生, 中国民航科学技术研究院工程师, 主要从事辐射成像、主动式太赫兹全息成像等方面的研究, Tel: 010-64473418, E-mail: 2147567@qq.com。