

# 双焦点太赫兹主动成像系统的扫描轨迹

李志鹏<sup>1</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 周德亮<sup>1,3</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 苏润丰<sup>1</sup>, 李绍和<sup>1</sup>, 涂学凑<sup>1,2</sup>, 陈健<sup>1,2\*</sup>, 吴培亨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>南京大学超导电子学研究所, 江苏 南京 210023;

<sup>2</sup>网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

<sup>3</sup>江苏亨通太赫兹技术有限公司, 上海 200120

**摘要** 在自行搭建的双焦点太赫兹主动成像系统基础上,建立了与角度相关的拟合函数,并利用最小二乘拟合多项式的方法对拟合系数进行计算,成功将扫描轨迹的几何光学追迹计算过程简化成为二元函数计算。该系统为收发同路式像方旋转镜扫描。由于拟合自变量对太赫兹图像的影响很大,采用两种不同的拟合自变量进行计算,并且通过数值分析和成像结果分析比较两者的优劣。实验结果表明,当以旋转镜法向量的坐标分量作为拟合自变量时,计算扫描轨迹的速度减小至 3 s/frame,且太赫兹图像非常准确。该系统实现了在约 8 m 处,50 cm×100 cm 视场内达 3 cm 空间分辨率的快速精确成像。这为扫描式太赫兹快速成像系统提供了有价值的参考,对实时太赫兹安检、无损检测等领域有着实用意义。

**关键词** 成像系统; 太赫兹主动成像; 最小二乘拟合多项式法; 拟合轨迹; 快速成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221250

## Scanning Track of an Active Bifocal Terahertz Imaging System

Li Zhipeng<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Zhou Deliang<sup>1,3</sup>, Wang Yan<sup>1</sup>, Su Runfeng<sup>1</sup>, Li Shaohe<sup>1</sup>,  
Tu Xuecou<sup>1,2</sup>, Chen Jian<sup>1,2\*</sup>, Wu Peiheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Purple Mountain Laboratory, Nanjing 211111, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>Jiangsu Hengtong Terahertz Technology Inc., Shanghai 200120, China

**Abstract** In this study, an angle-related fitting function wherein the fitting coefficient is calculated using the least square fitting polynomial method is established for an active self-built dual-focus terahertz imaging system. In addition, the geometric optical tracking calculation process for the scanning track is successfully simplified into a binary function. The system adopts the same channel image scanning technique using a rotating mirror. Because the fitting independent variable has a significant influence on the terahertz image, two different fitting independent variables are used for calculation, and the advantages and disadvantages of the two are compared through numerical and imaging results analyses. The experimental results show that when the coordinate component of the normal vector of the rotating mirror is used as the fitting independent variable, the calculation time of the scanning trajectory is reduced to 3 s/frame, and the terahertz image is very accurate. Moreover, the system realizes fast and accurate imaging under a spatial resolution of 3 cm and view field of 50 cm × 100 cm when placed at a distance of approximately 8 m. Thus, this study provides a valuable reference for quick scanning in terahertz imaging systems and is of practical significance for real-time terahertz security inspection and non-destructive testing.

**Key words** imaging systems; terahertz active imaging; method of least square fitting polynomial; fitting trajectory; fast imaging

## 1 引言

目前,太赫兹成像作为一种极具潜力的公共安防检测技术在机场、商店、火车站等人流密集型场合得到

了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。但同时,不断提高的公共安防需求对太赫兹成像系统的视场范围、成像距离、成像速度等指标都提出了更高的要求。为了在不降低空间分辨率的同时满足快速成像与大视场的成像需求,太赫兹成

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

通信作者: \*chenj63@nju.edu.cn

像系统通常采用旋转镜扫描的方式进行采样<sup>[5]</sup>,接着通过几何光学追迹计算出其扫描轨迹<sup>[6]</sup>,并结合采样数据进行成像。然而逐点计算扫描轨迹成像时,计算速度慢,无法满足快速成像的要求。因此,需要对扫描轨迹的计算过程进行简化。

本文建立了与角度相关的拟合函数,并利用最小二乘拟合多项式的方法对拟合系数进行计算,将扫描轨迹的计算简化成为二元函数计算,从而实现快速精准成像。最后,在数值计算和成像结果中,分析了两种不同拟合自变量的优劣。

## 2 系统介绍

本研究所有工作均在实验室搭建的双焦点太赫兹主动成像系统<sup>[7]</sup>的基础上进行。太赫兹源的型号为 AMC666,频率为 220 GHz,功率约 200 mW;探测器的

型号为 QOD,等效噪声功率(NEP)约为  $10 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ ;辐射源和探测器均为 Virginia Diodes Inc(VDI)的产品。

图 1(a)中:主镜  $R_1$  为椭球镜,次镜  $R_2$  为抛物面镜,且主镜的近焦点与次镜的焦点重合;太赫兹波穿过由高阻硅片做成的分束片后,依次被三级镜  $R_3$ 、旋转镜、次镜  $R_2$  以及主镜  $R_1$  反射,最后到达成像平面;被测物表面反射回来的太赫兹波再次经过主镜、次镜、旋转镜、分束片汇聚于探测器处,从而实现收发同路式成像。图 1(b)为光学系统的实物图。

系统的焦距为 7.7 m,采用双焦点成像的配置,将成像平面置于 8 m 处。在扩大成像视场的同时,保证了该系统的成像分辨率。当视场范围内衍射中心强度损耗不超过 2 dB 时,即可满足本系统的成像要求。最终,当系统工作频率为 220 GHz 时,系统的视场大小约为  $50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ ,空间分辨率为  $3 \text{ cm}$ <sup>[8]</sup>。

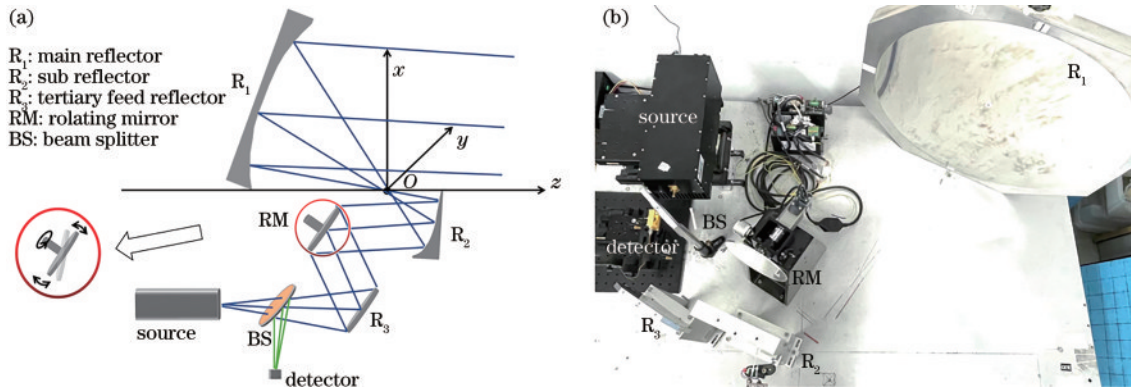


图 1 太赫兹主动成像系统示意图与实物图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Schematic and physical diagrams of terahertz active imaging system. (a) Schematic diagram; (b) physical picture

系统采用像方旋转扫描,如图 2(a)所示,  $x_m y_m z_m$  为旋转镜坐标系,其方向分别与  $x, y, z$  轴正方向一致。旋转镜初始法向量绕  $x_m, y_m, z_m$  轴旋转,所对应旋转角分别为  $\gamma, \beta, \alpha$ ,固定  $\beta = 4.557^\circ$ ,水平方向( $x$ 轴)扫描到的最大距离约为 50 cm。经过旋转变换后,旋转镜的法向量为

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $(x_0, y_0, z_0)$  为旋转镜的初始法向量。

太赫兹波经三级镜准直后,入射到旋转镜的主光线方向保持不变。主光线被旋转镜反射后的出射方向与旋转镜的法向量有关。随着  $\alpha$  和  $\gamma$  的变化,旋转镜的法向量发生改变从而导致被旋转镜反射后的出射光线方向发生变化。利用几何光学追迹的方法进行计算,不同的出射光线方向对应成像平面内不同的扫描点。通过改变  $\alpha$  和  $\gamma$ ,即可对  $50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$  范围内的

被测物进行逐点扫描。该系统的扫描速度可达到 1 frame/s。

成像系统工作时,系统的信号采集模块会同时输出两种实时信息,旋转镜的两个旋转角度信息和扫描点处的强度信息。根据角度信息,对准直后的主光线进行几何光学追迹,即可计算出成像平面内扫描点的精确坐标。精确的扫描点坐标需要逐点进行计算,单帧计算时间约为 10 min。图 2(b)为计算出的扫描轨迹。最后,对强度信息和计算出的位置信息进行三维散点插值即可得到被测物的原始太赫兹图像,即被测物最准确的太赫兹图像。

## 3 扫描轨迹分析

逐点计算获得扫描轨迹的过程伴随着较大的计算量,导致无法实时成像。为了满足快速成像的需求,建立了与角度有关的拟合函数  $p[x(\alpha, \gamma), y(\alpha, \gamma)]$ ,并利用最小二乘拟合多项式的方法对拟合系数进行计算。将扫描轨迹的几何光学追迹计算过程简化成为二元函数计算。利用强度信息和拟合函数计算出的位置信息,进行三维散点插值即可得到被测物的拟合太赫

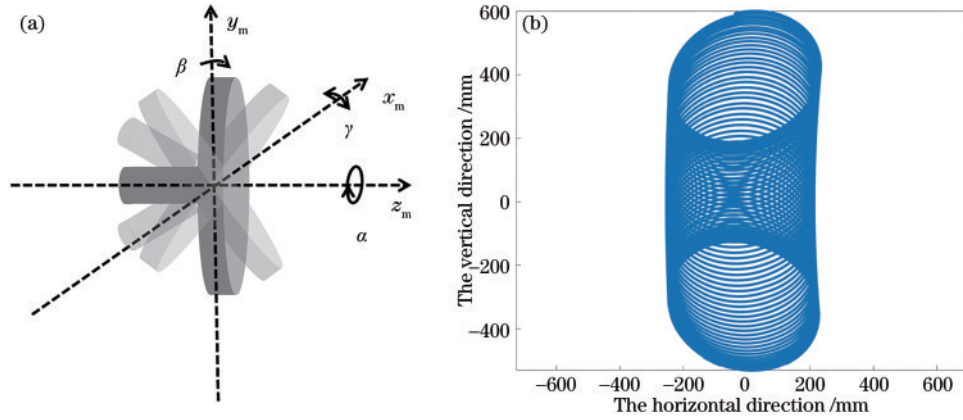


图 2 系统旋转镜示意图和扫描轨迹。(a)系统旋转镜示意图；(b)扫描轨迹

Fig. 2 Schematic diagrams of system rotating mirror and scanning trajectory. (a) Schematic diagram of system rotating mirror; (b) scanning trajectory

兹图像。但是利用拟合函数得到的扫描轨迹(拟合轨迹)的准确性会影响后续的插值结果。所以对由两种不同形式的拟合自变量 $[x(\alpha, \gamma), y(\alpha, \gamma)]$ 得到的拟合轨迹进行分析。

### 3.1 最小二乘拟合多项式基本原理介绍

在科学实验中,常用一组实验数据 $(x_i, y_i, z_i)(i=1, 2, \dots, m, m$ 为采样点数)寻求函数 $z=f(x, y)$ 的近似表达式 $z=p(x, y)$ 。近似表达式可写为二元多项式的形式:

$$p(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + a_{11}xy + \dots + a_{dq}x^d y^q + \dots + a_{n0}x^n + a_{0n}y^n \quad (n < m), \quad (2)$$

式中: $x, y$ 分别为拟合自变量; $d$ 为自变量 $x$ 的次数; $q$ 为自变量 $y$ 的次数; $a_{dq}$ 为系数; $n$ 为拟合多项式的阶数。根据最小二乘法定义,通过给定数据集 $(x_i, y_i, z_i)$ 确定待定系数 $a_{dq}$ ,使得在各个点的偏差平方 $S_r =$

$\sum_{i=1}^m [\sum_{d,q=0,0}^n a_{dq} x_i^d y_i^q - z_i]^2$ 达到最小值<sup>[9]</sup>。因此将 $m$ 组

数据代入式(2),由于 $n < m$ ,即可得超定方程组:

$$\begin{cases} a_{00} + a_{10}x_1 + a_{01}y_1 + \dots + a_{dq}x_1^d y_1^q + \dots + a_{0n}y_1^n = z_1 \\ a_{00} + a_{10}x_2 + a_{01}y_2 + \dots + a_{dq}x_2^d y_2^q + \dots + a_{0n}y_2^n = z_2 \\ \vdots \\ a_{00} + a_{10}x_m + a_{01}y_m + \dots + a_{dq}x_m^d y_m^q + \dots + a_{0n}y_m^n = z_m \end{cases} \quad (3)$$

计算此超定方程组的最小二乘解,即确定所有待定系数 $a_{dq}$ ,可得到拟合曲线 $z=p(x, y)$ 。

然而选择不同的拟合自变量对拟合优度影响很大。本研究引入决定系数 $R^2$ (相关系数 $R$ 的平方)来比较不同拟合自变量的优劣程度<sup>[10-11]</sup>。决定系数 $R^2$ 的计算方法为

$$R^2 = (S_t - S_r) / S_t \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $S_t$ 为总平方和。决定系数 $R^2$ 反映了多项式拟合的置信度,本研究采用“ $3\sigma$ 原则”,即置信度为99.74%。

### 3.2 轨迹拟合

#### 3.2.1 $x(\alpha, \gamma) = \alpha, y(\alpha, \gamma) = \gamma$

将旋转镜的两个角度,直接作为拟合自变量,拟合公式表示为

$$p(\alpha, \gamma) = \sin(b_{00} + b_{01}\gamma + \dots + b_{dq}\alpha^d \gamma^q + \dots + b_{0n}\gamma^n) \times (c_{00} + c_{01}\gamma + \dots + c_{dq}\alpha^d \gamma^q + \dots + c_{0n}\gamma^n) + k_{00} + k_{01}\gamma + \dots + k_{dq}\alpha^d \gamma^q + \dots + k_{0n}\gamma^n, \quad (5)$$

式中: $d$ 为自变量 $\alpha$ 的次数; $q$ 为自变量 $\gamma$ 的次数; $b_{dq}, c_{dq}, k_{dq}$ 为系数; $n$ 为拟合多项式的阶数。利用式(5)可分别得到成像平面内扫描点坐标 $(x_i, y_i)$ 的表达式为 $x_i = p_x(\alpha, \gamma)$ 和 $y_i = p_y(\alpha, \gamma)$ 。当 $n=3$ 时,拟合轨迹如图3(a)所示,蓝色为计算轨迹,红色为拟合轨迹。

#### 3.2.2 $x(\alpha, \gamma) = u, y(\alpha, \gamma) = v$

将 $(u, v)$ 作为拟合自变量,其中 $u = N_x, v = N_y$ 。利用式(2)可分别得到成像平面内扫描点坐标 $(x_i, y_i)$ 的表达式为 $x_i = p_x(u, v)$ 和 $y_i = p_y(u, v)$ 。当 $n=3$ 时,拟合轨迹如图3(b)所示。

#### 3.2.3 拟合轨迹分析

由图3可以看出,基于最小二乘拟合多项式方法,两种拟合自变量都可对扫描轨迹进行拟合,但不同的拟合自变量又各有优劣。

在 $(\alpha, \gamma)$ 作为拟合自变量的情况下,单帧数据处理时间约为2.69 s,决定系数为99.501834%。而在 $(u, v)$ 作为拟合自变量的情况下,单帧数据处理时间约为3.19 s,决定系数为99.999996%。即 $(\alpha, \gamma)$ 拟合在成像时间上更有优势,但最终决定系数并不满足“ $3\sigma$ 原则”,即置信度超过99.74%的要求,故舍去。而采用 $(u, v)$ 进行拟合,虽然成像花费时间更长,但决定系数更加趋近于1且满足“ $3\sigma$ 原则”,故保留。

综上所述,相比于 $(\alpha, \gamma)$ 拟合,采用 $(u, v)$ 拟合计算轨迹进行成像,不仅可以更好地复原出计算轨迹,还能够将单帧成像时间压缩到大约3 s。



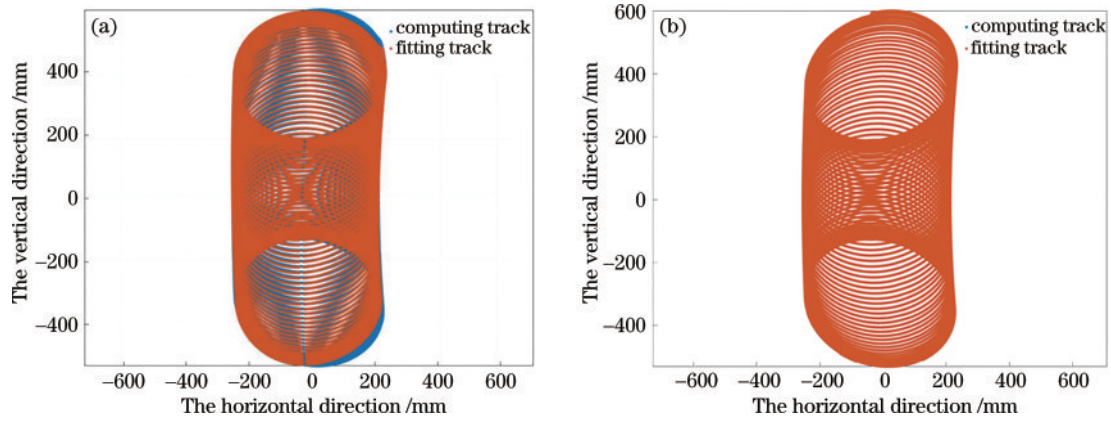


图 3 拟合轨迹与计算轨迹。(a)  $(\alpha, \gamma)$  拟合; (b)  $(u, v)$  拟合

Fig. 3 Fitting track and computing track. (a)  $(\alpha, \gamma)$  fitting; (b)  $(u, v)$  fitting

### 4 实验验证

对宽 3 cm、间距 6 cm 的 50 cm × 100 cm 的横条纹和宽 3 cm、间距 6 cm 的 50 cm × 100 cm 的竖条纹铁板

分别成像, 结果如图 4(a)、图 5(a) 所示。图 4(b)、图 5(b) 为逐点计算得到的原始太赫兹图像。白色代表信号最强, 黑色代表信号最弱。需要特别说明的是, 由于本系统为收发同路式系统且视场范围很大, 所以

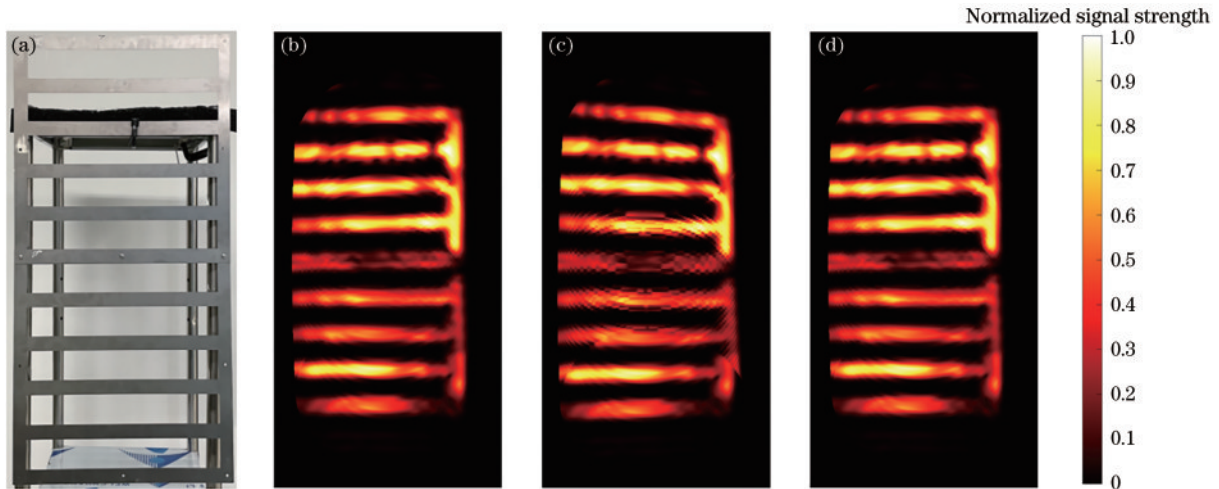


图 4 横条纹扫描成像结果。(a) 样品图; (b) 原始图案; (c)  $(\alpha, \gamma)$  拟合图像; (d)  $(u, v)$  拟合图像

Fig. 4 Imaging results of horizontal fringe scanning. (a) Sample figure; (b) original figure; (c)  $(\alpha, \gamma)$  fitting figure; (d)  $(u, v)$  fitting figure

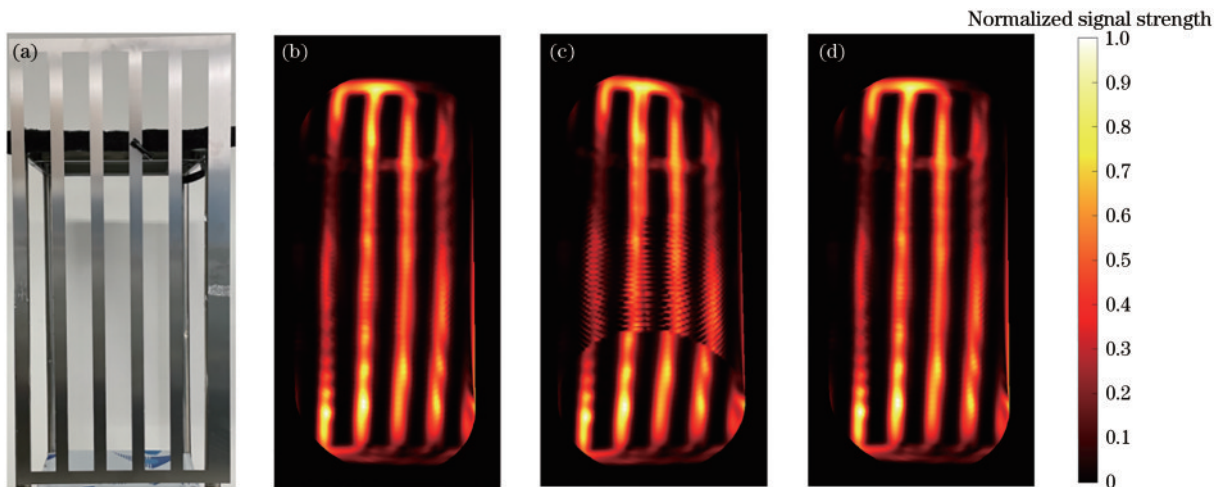


图 5 竖条纹扫描成像结果。(a) 样品图; (b) 原始图像; (c)  $(\alpha, \gamma)$  拟合图像; (d)  $(u, v)$  拟合图像

Fig. 5 Imaging results of vertical fringe scanning. (a) Sample figure; (b) original figure; (c)  $(\alpha, \gamma)$  fitting figure; (d)  $(u, v)$  fitting figure

边缘入射角较大的区域存在信号反射强度低的问题,图像中边缘条纹未能显示。但在提高图像对比度的情况下,即可看到全部条纹。由于本实验不涉及这方面的研究,且出于图案美观的考虑,采用了没有增强对比度的图案。

两种拟合自变量对扫描轨迹的拟合精度影响太赫兹图像的准确性。在 $(\alpha, \gamma)$ 作为拟合自变量的情况下,拟合轨迹的结果并不理想,不满足“ $3\sigma$ 原则”,条纹出现断点现象,该现象在竖条纹的成像结果中尤为明显,如图 4(c)和图 5(c)所示。而采用 $(u, v)$ 作为拟合自变量时,拟合轨迹与计算轨迹几乎重叠,最终成像也与原始图像基本一致,如图 4(d)和图 5(d)所示。

总体来说,两种拟合自变量数据处理时间相差无几,但是 $(u, v)$ 拟合会得到更加精确的太赫兹图像。

## 5 结 论

在原有的双焦点太赫兹主动成像系统的基础上,使用 $(\alpha, \gamma)$ 和 $(u, v)$ 这两种拟合自变量建立了与角度有关的拟合函数并对横竖条纹铁板进行了快速成像的实验。扫描轨迹的计算原本需要逐点进行几何光学追迹。拟合函数的建立使得计算过程简化成为二元函数计算。将原来 10 min/frame 的成像速度提升到 3 s/frame。采用旋转镜法向量的坐标分量作为拟合自变量得到的拟合轨迹在数值分析中,符合“ $3\sigma$ 原则”,在成像结果分析中,有更为精确的太赫兹图像。即双焦点太赫兹主动成像系统在远距离、大视场范围内实现了快速且精确的成像。这对于推进远距离大视场的主动太赫兹成像系统在实时人体安检、无损检测等领域的大规模应用有着重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology,

2005, 20(7): S266-S280.

- [4] 张振伟, 赵跃进, 缪寅宵, 等. 基于线性调频机制的太赫兹无损检测成像技术[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411002. Zhang Z W, Zhao Y J, Miao Y X, et al. Terahertz nondestructive testing imaging technology based on linear frequency modulation mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411002.
- [5] 谢巍, 侯丽伟, 潘鸣. 被动太赫兹成像二维扫描技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2): 176-179. Xie W, Hou L W, Pan M. 2-D scanning technology in passive terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(2): 176-179.
- [6] 那宏越, 周德亮, 姜寿禄, 等. 一种改进的太赫兹主动成像系统[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, 52(5): 787-794. Na H Y, Zhou D L, Jiang S L, et al. An improved active terahertz imaging system[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, 52(5): 787-794.
- [7] Zhou D L, Hou L W, Xie W, et al. Practical dual-band terahertz imaging system[J]. Applied Optics, 2017, 56(11): 3148-3154.
- [8] Wang H, Zhou D L, Su R F, et al. Effects of diffuse and specular reflections on detecting embedded defects of foams with a bifocal active imaging system at 0.22 THz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021, 11(2): 150-158.
- [9] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 45-46. Wang H W. Partial least-squares regression-method and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 45-46.
- [10] 卢治功, 贺鹏, 职连杰, 等. 基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 853-858. Lu Z G, He P, Zhi L J, et al. Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 853-858.
- [11] 尚栋, 孙兰香, 齐立峰, 等. 基于循环变量筛选非线性偏最小二乘的 LIBS 铁矿浆定量分析[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2111001. Shang D, Sun L X, Qi L F, et al. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy iron ore slurry based on cyclic variable filtering and nonlinear partial least squares[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2111001.