

文章编号: 2095-4980(2025)06-0569-08

基于太赫兹干涉成像系统的设计与研究

周心悦^{1,2,3}, 郭莹¹, 祁峰^{*2,3}, 王冠文^{1,2,3}

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 辽宁省太赫兹成像感知重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;
3. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 干涉成像技术可在非接触条件下精准测量物体表面的微小形变或位移, 展现出广泛的应用潜力。本文设计并构建了一种基于太赫兹频段的反射和透射干涉系统, 该系统通过扫描后直接利用相位信息重塑图像。实验显示, 在 164 GHz、172 GHz、196 GHz 和 204 GHz 频段, 迈克尔逊干涉系统的成像质量和分辨力均优于直接测量法; 在 150 GHz 下, 未使用成像算法即可达到半波长分辨力, 对比度相较直接测量提升 50%; 在 180 GHz 频段实现了马赫-曾德尔干涉系统, 双光路差分有效降低了相位噪声, 证明了该系统的可行性和优势。太赫兹干涉技术为成像领域提供了非接触式的高分辨力成像解决方案。

关键词: 太赫兹成像; 迈克尔逊干涉; 马赫-曾德尔干涉; 分辨力

中图分类号: TN95

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024594

Design and research of terahertz interferometric imaging system

ZHOU Xinyue^{1,2,3}, GUO Ying¹, QI Feng^{*2,3}, WANG Guanwen^{1,2,3}

(1.School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110870, China;

2.Key Laboratory of Terahertz Imaging and Sensing, Liaoning Province, Shenyang Liaoning 110169, China;

3.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110169, China)

Abstract: Interferometric imaging technology can accurately measure the tiny deformations or displacements on the surface of objects in a non-contact manner, demonstrating extensive application potential. In this paper, a reflection and transmission interferometric system based on the terahertz band is designed and constructed. This system directly reconstructs images using phase information after scanning. Experiments show that at frequencies of 164 GHz, 172 GHz, 196 GHz, and 204 GHz, the imaging quality and resolution of the Michelson interferometric system are superior to those of the direct measurement method. At 150 GHz, without using any imaging algorithm, the system can achieve half-wavelength resolution, with a contrast improvement of 50% compared to direct measurement. At 180 GHz, a Mach-Zehnder interferometric system is implemented, where the dual-path difference effectively reduces phase noise, thus proving the feasibility and advantages of the system. Terahertz interferometric technology provides a noncontact, high-resolution imaging solution for the imaging field.

Keywords: terahertz imaging; Michelson interference; Mach-Zehnder interference; resolution

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz 之间, 波长在 3 mm~30 μm 之间的电磁波, 又称为亚毫米波。由于其处于电子学向微观光子学过渡的频段, 被认为是连接电子学和光子学的桥梁^[1-3]。因其在电磁波频谱上的特殊位置, 太赫兹波相比传统光源具有更加独特的性质, 如, 非电离性^[4]: 对人体和生物组织相对安全; 穿

收稿日期: 2024-11-14; 修回日期: 2025-04-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0718303); 雄安新区科技创新专项资助项目(2022XAGG0181)

*通信作者: 祁峰 email:qifeng@sia.cn

引用格式: 周心悦, 郭莹, 祁峰, 等. 基于太赫兹干涉成像系统的设计与研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(6): 569-576. DOI: 10.11805/TKYDA2024594.

Citation format: ZHOU Xinyue, GUO Ying, QI Feng, et al. Design and research of terahertz interferometric imaging system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6): 569-576. DOI: 10.11805/TKYDA2024594.

透性^[5]：可穿透如塑料、纸张等非极性材料；瞬态性和光谱特性^[6]：方便识别和分析各种化学物质；相干性^[7]：太赫兹产生的相干辐射在成像技术中非常重要，可直接测量电场的振幅和相位。

目前，太赫兹近场成像领域中合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[8]与实孔径雷达^[9]应用较多。SAR 成像通过使用一个小尺寸天线在飞行路径上移动，合成一个大尺寸天线的效果。接收到的回波信号包含幅度和相位信息，利用数字聚焦算法进行计算成像，因此无法直接得到成像信息，数据处理难度较大。实孔径雷达通过天线与被测物体的相对运动，将不同方位的回波信号进行拼接从而完成成像。相比 SAR 系统，实孔径雷达系统更为简单，维护成本也相对较低，且使用透镜聚焦后进行焦平面成像，可获得更精确的空间分辨力。2008 年，LU^[10]等使用 320 GHz 连续波太赫兹光纤内窥镜，构造了法布里珀罗干涉，在不加透镜聚焦的情况下得到了亚波长轴向分辨力的三维太赫兹反射图像，但光纤尖端与样品之间的距离必须保持在 5 mm 以内，具有一定的局限性。2021 年，Homare Momiyama^[11]等使用频率可调谐源搭建了一个迈克尔逊干涉仪太赫兹波扫描源光学相干断层扫描系统，并提出了一种深度超分辨力分析的算法，这种算法分辨力可达到传统逆快速傅里叶变换的 1/3，成功对瓷砖后 10 mm 的空隙进行 3D 成像。但完成一个 2D 扫描以获得 3D 图像大约需要 16.5 h，在快速检测方面存在缺陷。同年，Y A Garcia-Jomaso 研究团队^[12]开发了一个 Twyman-Green 干涉仪，并将其扩展到反射几何结构中，使用固体浸入透镜进行扫描成像。但样品放置在与硅透镜平面几乎接触的位置，其间距不超过 10 μm，对于相对脆弱的样品可能会限制实验结构的广泛应用。

太赫兹直接扫描成像通常将太赫兹波直接照射到待测物体上实现^[13]。这种方法虽然简单直观，但由于太赫兹直接扫描成像的空间分辨力受波长的限制，难以实现较高的分辨力。为了解决直接测量分辨力不高的问题，本文采用在实孔径雷达的基础上搭建太赫兹干涉结构来提高成像分辨力。针对干涉测量中连续波测量时间较长的缺点，使用步进式的连续波进行实验，大大缩短了扫描时间。实验中分别搭建了反射式迈克尔逊干涉系统和透射式马赫-曾德尔干涉系统进行非接触式成像，并有效抑制了光路中的相位噪声，提高了成像分辨力。实验结果表明，在无特殊传播介质和后续算法处理的情况下，分辨力仍能达到半波长。

1 理论基础

1.1 成像理论基础

焦平面成像通常使用焦平面阵列探测器获取目标物体实时二维图像^[14]。太赫兹波通过待测物体对其反射率、吸收率和透过率的频谱信息来分辨不同的物质。焦平面成像原理主要与光的波动性和衍射原理有关，根据亥姆霍兹衍射定理，一束平行光通过孔径较小的孔时会发生衍射现象；反之，孔径越大，衍射现象越弱，成像越来越清晰。根据菲涅尔-基尔霍夫衍射^[15]公式，可计算出透镜系统的参数对成像质量的影响。通过调整透镜的形状、孔径大小可获得更清晰的成像。

由菲涅尔公式可知，透镜外坐标为(x,y)的点处复场强为：

$$U(x,y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(j\lambda z) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right] \times FT\left\{U(x_0,y_0) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_0^2+y_0^2)\right]\right\}_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}} \quad (1)$$

式中： λ 为太赫兹波对应波长； $k=2\pi/\lambda$ 为波数； z 为某点到透镜孔径平面的垂直距离； $U(x_0,y_0)$ 为透镜孔径内在点 (x_0,y_0) 处对应的复场强。

太赫兹成像技术可分为非相干成像和相干成像两种，合成孔径成像属于相干成像，本文提到的焦平面成像属于非相干成像。脉冲太赫兹波频带宽，可覆盖从 GHz 到十几 THz 的范围，被测物体的每一个成像点经过脉冲太赫兹波后都能得到对应的时域波形，通过傅里叶变换得到该时域波形的傅里叶谱。传统的光学成像系统并不能直接获得相位信息，而本文构建的系统可分别选择成像点的幅值或相位信息同时进行图像绘制，测量精确度优越性较明显，能重构样本的折射率、样本空间密度、厚度分布等信息。

1.2 干涉理论基础

迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer, MI)^[16]是在 1881 年由美国物理学家阿尔伯特·亚伯拉罕·迈克尔逊研制的，其基本原理是一束入射光经过透镜 L 和分束镜(Beam Splitter, BS)后分成 2 束：一束作为参考光束被导向全反射镜 M，另一束则作为测量光束照射到待测物体上。通过调整参考光束的路径长度可改变 2 束光之间的光程差(通常是通过移动全反射镜 M 实现的微小位移来调整光路)，当这 2 束光在接收端重新汇合时，会产生干涉现象^[17]，从而携带有关待测物的信息。实验结构如图 1 所示。

假设由发射端发射出的太赫兹波电场强度为：

$$E(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中: E_0 为电磁波的振幅; φ 为电磁波的相位; ω 为电磁波的角频率; t 为电磁波传播时间。

当发射波经过分束镜分成2束电磁波, 再分别经过参考镜和测量镜反射之后聚合的总电场可表示为2个路径的叠加:

$$E_{\text{total}} = E_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_1) + E_0 \cos(kx - \omega t + \varphi_2) = 2E_0 \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cos\left(kx - \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \quad (3)$$

式中: φ_1 和 φ_2 为电磁波经过参考镜和反射镜之后引入的相位; $2E_0 \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)$ 为干涉振幅。

由于2束电磁波的路径不同, 会产生相位差和光程差, 其中相位差与光程差的关系为:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \quad (4)$$

式中 ΔL 为光程差。当光程差为波长整数倍时, 产生建设性干涉; 光程差为半波长的奇数倍时, 产生破坏性干涉。

马赫-曾德尔干涉仪^[18]因其结构相对复杂, 通常用于需要较高光源能量的场景。鉴于本文使用的毫米波模块并不具备高能量特性, 将马赫-曾德尔干涉仪的发射器与探测器置于同一直线上而非平行设置, 确保通过待测物体的光束路径不会发生改变, 从而减少太赫兹波在较长传播距离中可能引起的能量损耗。

本文采用的马赫-曾德尔干涉仪的基本原理如图2所示, 该干涉仪主要由2个分束器以及2个反射镜M组成。其中, 分束器与反射镜的反射面保持平行布置。当光源发出的光线经过第1个分束器时被分成两部分: 一部分作为参考光沿特定路径传输, 经由2个反射镜反射后返回; 另一部分则作为测量光直接照射到待测物上并反射回来。这2束光最终在第2个分束器处相遇并产生干涉现象。这样的布局不仅简化了装置的整体构造, 还提高了对于低能量信号处理的有效性。

2 实验搭建与分析

使用矢量网络分析仪和倍频模块收发机将 10 MHz~67 GHz 的频段倍频至 140~220 GHz。使用到的实验样品分别为宽度约为 1 mm 的“THZ”图案、线宽约为 1 mm 分辨力条以及镂空的 1 mm 分辨力条钢板, 如图3所示。

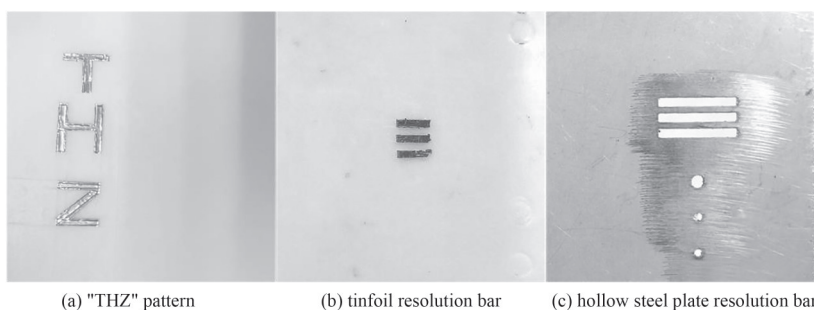


Fig.3 Experimental diagram
图3 实验实物图

2.1 迈克尔逊干涉测量实验

本文搭建的迈克尔逊干涉系统中参考镜M静止, 选择宽频测量的方式进行光路中频率的调整。进一步调整

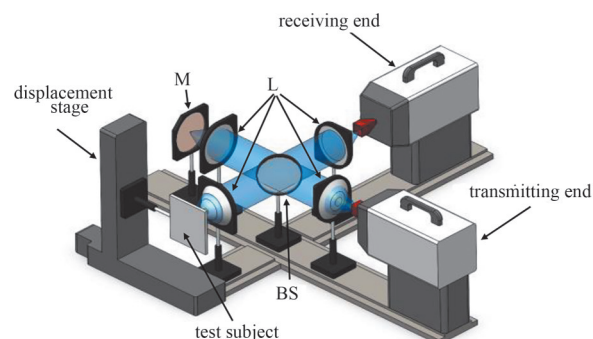


Fig.1 Schematic diagram of Michelson interference structure
图1 迈克尔逊干涉结构原理图

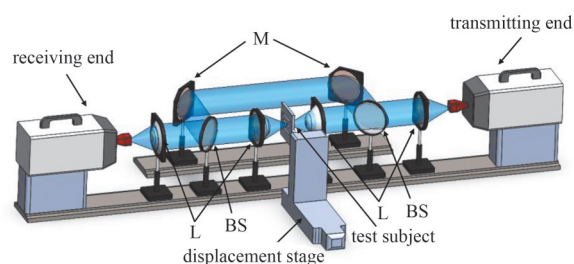


Fig.2 Schematic diagram of the Mach-Zehnder interference structure
图2 马赫曾德尔干涉结构原理图

光程差,再利用待测物图案表面不平整的特点发生干涉。当待测物的位置发生变化时,会导致待测物反射的波与参考镜反射的波形成相位差,即使是微小的距离改变,也会造成明显的相位变化。最常见的迈克尔逊干涉仪便是激光干涉仪和白光干涉仪,它们使用的分束镜大多是背面镀银的玻璃板,由于太赫兹频段较高,因此本文采用电阻率为 $10\text{ k}\Omega$ 的高阻硅片作为分束镜,分光比约为 1:1;全反镜的镀膜为金镀膜,并采用聚四氟乙烯透镜对太赫兹辐射进行准直和聚焦。

干涉系统的光路是固定的,因此在相同光程差下,不同频率的太赫兹波干涉时的相位差不同,干涉产生的最大值和最小值产生差异,因此会出现不同频率的太赫兹波干涉成像的清晰度存在差异。考虑到太赫兹波的波长为毫米级,干涉系统很难在总光程为数十厘米的距离下达到亚毫米级的距离精确度,因此使用宽频太赫兹波调整光路中波长。选择使用 $140\sim 220\text{ GHz}$ 的宽频模式测量,步进为 8 GHz ,以此确定系统干涉现象较好的频率。通过 Sobel 算子计算图像的清晰度, Sobel 算子通过水平和垂直方向的梯度分量 G_x 和 G_y 计算梯度幅值 G :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

再通过梯度幅值的标准差量化清晰度:

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (G(i,j) - \mu_G)^2} \quad (6)$$

式中: $G(i,j)$ 为像素点 (i,j) 处的梯度幅值; μ_G 为梯度幅值的均值; $M \times N$ 为图像的总像素点。

以此选出干涉现象较好的频率点,如图 4 所示,选择 164 GHz 、 172 GHz 、 196 GHz 和 204 GHz 进行相位成像。

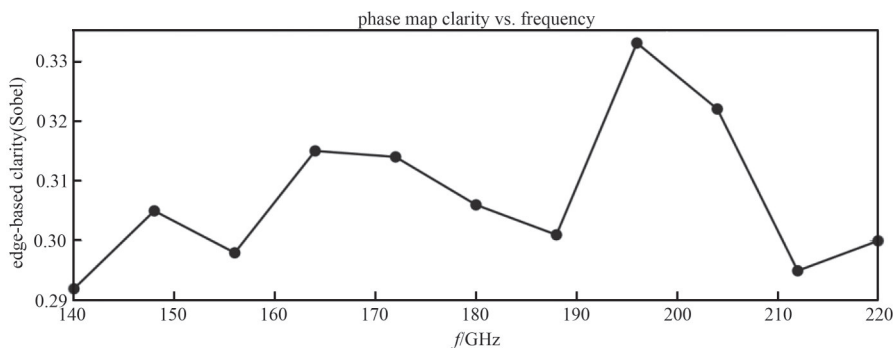


Fig.4 Contrast at different frequencies

图 4 不同频点的对比度

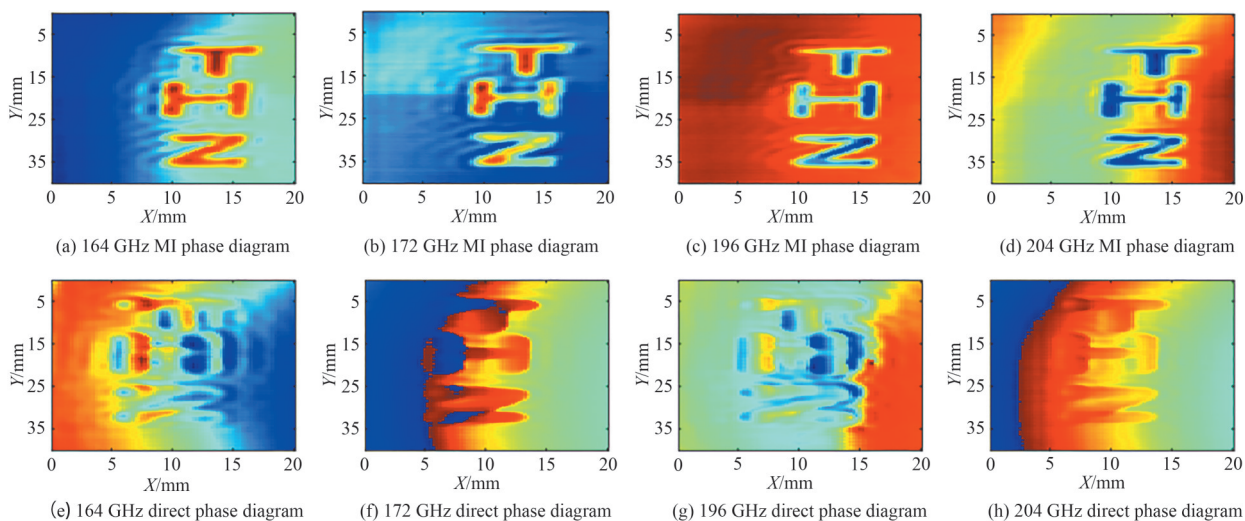


Fig.5 Comparison of "THZ" pattern interferometry and direct measurement

图 5 "THZ" 图案干涉测量与直接测量对比图

每次扫描都会造成局部区域的光程差有所差异，最终形成的干涉图样呈现出复杂的强度分布特征。而直接测量对相位变化的信息并不敏感，图 5 为在干涉现象较好的频率下，干涉测量的相位图与直接测量的相位图的对比，可以看出干涉测量比直接测量的相位噪声小，能够清晰识别出待测物的相位信息。

实验中将“THZ”图案粘贴在聚四氟乙烯的薄板上，需依靠夹具固定在位移台上，因此不可避免地会发生弹性形变，导致在远离夹具的一端形变较大，相位图不平整，该现象在三维相位图中更为明显，如图 6 所示。

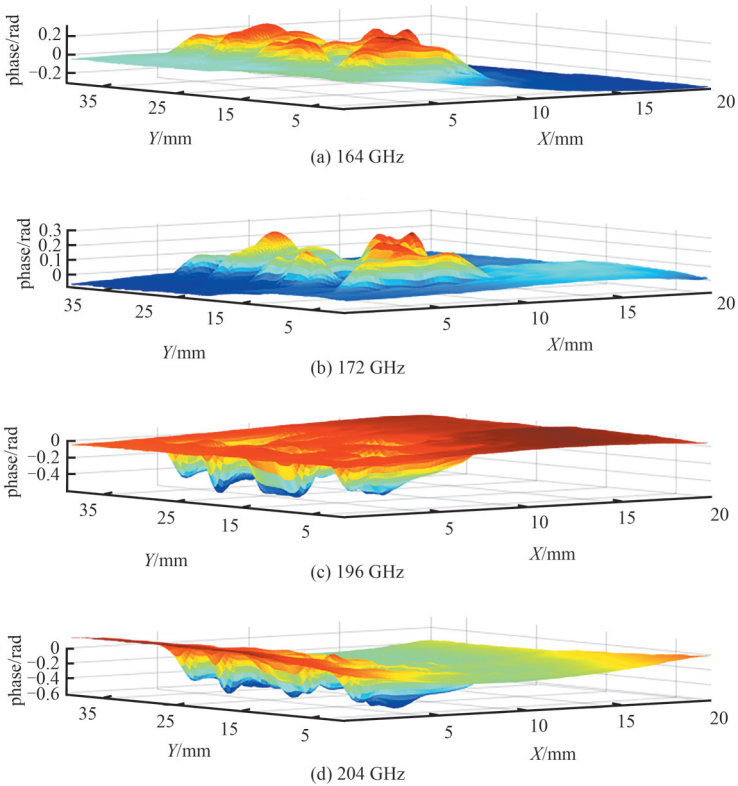


Fig.6 Three-dimensional interference phase diagram
图6 三维干涉相位图

由于对测量图像的质量进行评估时并无参考图像，因此采用无参考的空间域图像质量评估算法(Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator, BRISQUE)和自然图像质量评估器(Naturalness Image Quality Evaluator, NIQE)这两种方式进行计算。BRISQUE是基于自然场景统计模型的一种方法，利用人类视觉系统对自然图像统计特性的敏感性评估图像质量。主要通过以下步骤进行质量评估：

- 1) 特征提取：从图像中提取局部特征，这些特征通常是基于局部均值减去局部标准差的归一化像素强度；
- 2) 特征聚合：将提取的局部特征聚合成一个全局特征向量；
- 3) 支持向量回归：使用训练好的支持向量回归模型预测图像的质量分数。

本文采用文献[19]中已训练好的支持向量回归模型，对测量的图像进行评估，表 1 即为上述测量频率下，干涉测量与直接测量的 BRISQUE 分数，该值位于 0~100 之间，数值越小证明图像质量越好。

表1 不同测量方法和频率下的 BRISQUE 分数
Table1 BRISQUE fraction for different measurement methods and frequencies

method	BRISQUE fraction			
	164 GHz	172 GHz	196 GHz	204 GHz
interferometry	28.17	34.90	24.08	29.36
direct measurement	43.22	41.15	34.72	36.02

NIQE 也是一种基于自然场景统计的方法，但它与 BRISQUE 不同的是，NIQE 不依赖于任何训练数据。NIQE 通过以下步骤进行质量评估：

- 1) 特征提取：从图像中提取一组多尺度的局部特征，这些特征包括局部均值、局部方差以及一些高阶统计量；
- 2) 特征聚合：将提取的局部特征聚合成一个全局特征向量；

- 3) 距离计算：计算图像的全局特征向量与预定义的自然场景统计模型之间的距离；
- 4) 质量评分：根据距离计算出图像的质量评分。

表 2 为使用 NIQE 方法的数值对比结果，也是数值越低代表图像质量越好。

表2 不同测量方法和频率下的NIQE 分数
Table2 NIQE fraction for different measurement methods and frequencies

method	NIQE fraction			
	164 GHz	172 GHz	196 GHz	204 GHz
interferometry	9.32	6.54	8.05	8.47
direct measurement	11.68	12.02	8.83	11.37

信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)是评估信号质量的重要指标，在图像处理和分析领域中被广泛应用。由于传统焦平面测量的相位图信息模糊，因此只计算干涉测量在这 4 个频率的 SNR，进一步验证干涉成像质量，结果如表 3 所示。

根据瑞利判据，光学或电磁系统的分辨力极限为波长的一半^[20]。为进一步验证迈克尔逊干涉系统的性能，干涉测量与直接测量选用 150 GHz 的太赫兹波，分别对半波长线宽的 1 mm 分辨力条进行成像，相位图如图 7 所示。本文在没有图像数字处理基础上，可分辨出图像的形态，干涉测量较直接测量的对比度提升了近 50%。

表3 不同测量频率下的SNR
Table3 SNR for different frequencies

f/GHz	SNR/dB
164	20.59
172	17.79
196	17.78
204	20.13

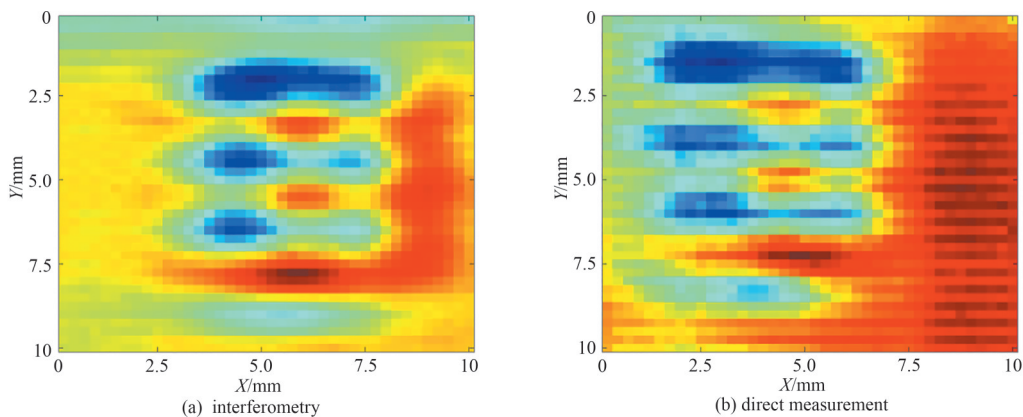


Fig.7 Resolution bar interference versus direct measurement
图 7 分辨力条干涉与直接测量对比图

2.2 马赫-曾德尔干涉测量实验

将搭建的马赫-曾德尔干涉系统用于太赫兹波段成像。马赫-曾德尔干涉系统的参考光路和测量光路相互独立，调整相位差为 π ，达到最佳干涉相位差，以减小系统中的相位噪声。测量光路为 4 透镜系统，采用 150 GHz 太赫兹波并不能成功实现清晰成像。以 1 GHz 为步长增加频率，最后选用波长稍短的 180 GHz 太赫兹波对金属板 1 mm 镂空分辨力条进行透射成像。由图 8 可以看到，干涉系统能分辨出分辨力条的位置和空隙，验证了该干涉系统的可行性。

2.3 两种干涉结构优劣势比较

为验证干涉结构双路差分的方法对光路相位噪声的影响，对两种干涉系统测量的相位噪声与直接测量光路噪声进行对比测试，如图 9 所示。直接测量的相位噪声基本保持在 $\pm 0.5^\circ$ 左右，最大值接近 $\pm 1^\circ$ 。迈克尔逊干涉测量系统的相位噪声基本保持在 $\pm 0.25^\circ$ 左右，最大值不超过 0.3° 。马赫-曾德尔干涉测量系统的相位噪声基本保持在 $\pm 0.1^\circ$ 左右，最大值不超过 $\pm 0.2^\circ$ 。相较于直接测量，干涉测量的相位噪声均有降低，按照波动范围，迈克尔逊干涉测量的相位噪声比直接测量降低了约 50%，马赫-曾德尔干

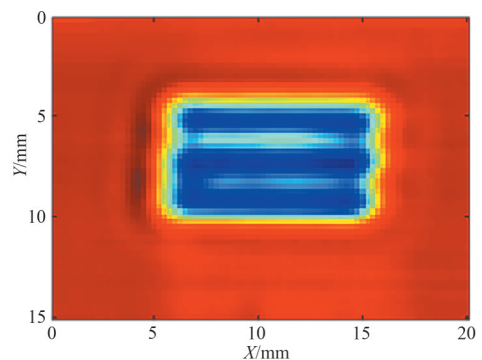


Fig.8 Phase plot of Mach-Zehnder interferometric resolution bar
图 8 马赫-曾德尔干涉测量分辨力条相位图

涉的相位噪声较直接测量降低了60%。

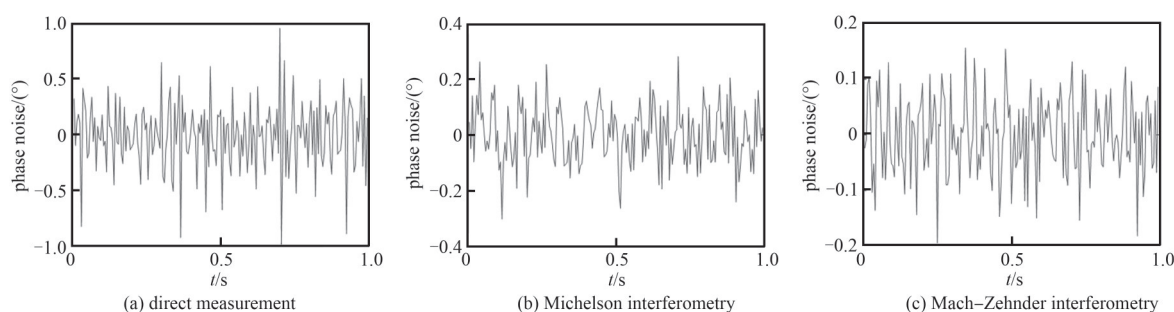


Fig.9 Phase noise maps measured by different methods

图9 不同测量方法下的相位噪声图

根据上述两种干涉结构的应用成像, 可将其应用分为两类: 太赫兹迈克尔逊干涉系统主要适用于对太赫兹反射系数较高的材料进行成像; 太赫兹马赫-曾德尔干涉系统主要适用于对太赫兹透射系数较高的材料进行成像, 两种结构各有优劣势。太赫兹迈克尔逊干涉结构优势为: 结构简单, 易于搭建和校准; 光路往返传播, 太赫兹波能量利用率较高; 对微小的光程差变化较为敏感, 适合表面形貌测量。劣势为: 对参考臂和测量臂对称性要求较高; 测量光路对样品厚度有要求, 超过透镜焦深的样品无法进行清晰成像。太赫兹马赫-曾德尔干涉结构优势为: 参考光路和测量光路分离, 抗干扰能力强; 可以在两臂光路引入调制器, 实现相位或幅度的主动控制; 可以测量薄膜样品的折射率、厚度等综合材料特性。劣势为: 光路较复杂, 空间占用较大, 调整难度高; 光能利用率较低, 到最后每臂光强只剩25%。

3 结论

本文设计并实现了太赫兹频段的迈克尔逊干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪。通过对“THZ”图案的成像测量, 验证了迈克尔逊干涉结构比直接测量得到的相位图像边缘更为清晰。而后对半波长分辨力条进行成像, 验证了迈克尔逊干涉结构可以减少散射对成像分辨力的影响, 达到接近半波长的成像分辨力, 对比度较直接测量提升了50%。优化后的马赫-曾德尔干涉结构可对目标进行透射成像, 通过双光路的差分消除部分相位噪声, 体现了其在太赫兹频段的可行性。验证了太赫兹干涉成像相比直接测量成像的优势, 为展开太赫兹频段的干涉成像提供了一定的支撑, 在生物医学和文物检测等非接触式测量中有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007,1(2):97-105. DOI:10.1038/nphoton.2007.3.
- [2] SIRTORI C. Applied physics:bridge for the terahertz gap[J]. *Nature*, 2002,417(6885):132-133. DOI:10.1038/417132b.
- [3] 邓玉强,郭树恒,孙青,等. 太赫兹干涉仪测量太赫兹波长及溯源研究[J]. *计量科学与技术*, 2023,67(4):3-10. (DENG Yuqiang, GUO Shuheng, SUN Qing, et al. Measurement of terahertz wavelength and its origin by Terahertz interferometer[J]. *Metrology Science and Technology*, 2023,67(4):3-10.) DOI:10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0084.
- [4] FAUQUET F, GALLUZZI F, TADAY P F, et al. Terahertz time-domain spectro-imaging and hyperspectral imagery to investigate a historical Longwy glazed ceramic[J]. *Scientific Reports*, 2024,14(1):19248. DOI:10.1038/s41598-024-69697-6.
- [5] MANCA R, CHIARANTINI L, TARTAGLIA E, et al. Non-invasive characterization of maiolica layer structure by terahertz time-domain imaging[J]. *COATINGS*, 2023,13(7):1268. DOI:10.3390/coatings13071268.
- [6] ZHANG Yue, PENG Xiaoyu, LI Guangyue, et al. Single-shot direct transmission terahertz imaging based on intense broadband terahertz radiation[J]. *Sensors*, 2024,24(13):4160. DOI:10.3390/s24134160.
- [7] PADDUBSKAYA A G, VALYNETS N I, NOVITSKY A V, et al. Terahertz-assisted time-domain super-resolution imaging[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2024,57(14):145104. DOI:10.1088/1361-6463/ad1b9c.
- [8] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 上海:科学出版社, 2001. (WEI Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [9] 钱佳佳. 基于太赫兹成像的无损检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023. (QIAN Jiajia. Research on non-destructive testing technology based on terahertz imaging[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.) DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003115.
- [10] LU J Y, KUO C C, CHIU C M, et al. THz interferometric imaging using subwavelength plastic fiber based THz endoscopes[J].

- Optics Express, 2008,16(4):2494–2501. DOI:10.1364/OE.16.002494.
- [11] MOMIYAMA H,SASAKI Y,YOSHIMINE I,et al. Depth super-resolved imaging of infrastructure defects using a terahertz-wave interferometer[J]. NDT & E International, 2021(120):102431. DOI:10.1016/j.ndteint.2021.102431.
- [12] GARCÍA-JOMASO Y A,HERNÁNDEZ-ROA D L,GARDUÑO-MEJÍA J,et al. Sub-wavelength continuous THz imaging system based on interferometric detection[J]. Optics Express, 2021,29(12):19120–19125. DOI:10.1364/OE.424163.
- [13] PERETTI R,MITRYUKOVSKIY S,FROBERGER K,et al. THz-TDS time-trace analysis for the extraction of material and metamaterial parameters[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(2):136–149. DOI:10.1109/TTHZ.2018.2889227.
- [14] 郑兴. 室温太赫兹焦平面探测器及测试验证成像的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (ZHENG Xing. Research on room temperature terahertz focal plane detector testing and imaging system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.) DOI:10.7666/d.D01163475.
- [15] WANG Guanwen,QI Feng,LIU Zhi,et al. Comparison between back projection algorithm and range migration algorithm in terahertz imaging[J]. IEEE Access, 2020(88):18772–18777. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2968085.
- [16] YU Wenlei,JIANG Lei,ZENG Kehao,et al. Michelson interferometer with Bessel beams[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024(177):108146. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108146.
- [17] 邬佳璐,方波,李剑敏,等. 基于迈克尔逊干涉法的太赫兹波长精密测量[J]. 计量学报, 2022,43(9):1147–1153. (WU Jialu, FANG Bo,LI Jianmin,et al. Research on precision measurement technology of terahertz wavelength based on interferometry[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022,43(9):1147–1153.) DOI:10.3969/j.issn.1000–1158.2022.09.07.
- [18] LI Yuanjun,WANG Bo,LIU Shanren,et al. Fiber Bragg grating pulse and systolic blood pressure measurement system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Sensors, 2024,24(19):6222. DOI:10.3390/s24196222.
- [19] MITTAL A,MOORTHY A K,BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012,21(12):4695–4708. DOI:10.1109/TIP.2012.2214050.
- [20] TUNIZ A,KUHLMEY B T. Subwavelength terahertz imaging via virtual superlensing in the radiating near field[J]. Nature Communications, 2023,14(1):6393. DOI:10.1038/s41467-023-41949-5.

作者简介:

周心悦(1999–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹探测与感知 .email:15042927829@163.com.

郭莹(1975–), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为自适应滤波、图像处理.

祁峰(1981–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹成像技术等.

王冠文(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹探测与感知.