

密级:公开



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

## 博士学位论文

太赫兹平面近场测量技术研究

---

作者姓名: 胡洁

指导教师: 史生才 研究员

中国科学院紫金山天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

研究所: 中国科学院紫金山天文台

2017 年 11 月

**Investigation of Planar Near-Field measurement**

---

**at Terahertz Bands**

---

**By**

**Jie Hu**

**A Dissertation Submitted to**

**The University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Doctor of Astrophysics**

**Purple Mountain Observatory**

**November, 2017**

# 摘要

太赫兹 (THz) 波段具有十分广阔的应用前景, 是目前天文学与大气科学研究的重要波段。常用的太赫兹探测系统均有光学系统。太赫兹近场测量技术是表征太赫兹波段光学系统特性的重要手段。太赫兹近场测量在天线近场区进行测试, 其测试环境可控, 并可以在一次测量过程中得太赫兹光学系统的一定角度内的所用辐射特性, 包括幅度, 相位及交叉极化特性。由于太赫兹波段的频率高, 近场测量技术在太赫兹波段的精度及测量速度受到探测器灵敏度, 扫描架定位精度及环境稳定性方面的限制, 因而需要在相位校准, 扫描方式等方面进行进一步研究。

本论文的主要研究内容及创新点包括:

1. 构建可搬移的 0.1~0.85 THz 太赫兹平面近场测量系统, 其中系统参考相位校准采用数字倍频的方式进行校准, 移动电缆相位变化采用了一种基于环型器反射的相位校准方案进行校准; 提出了一种适用于高增益天线的测量的准光型探头, 成功测量了 0.85 THz 对角喇叭及 0.23 THz 波纹喇叭;
2. 详细比较了不同太赫兹平面近场扫描方式, 步进扫描与 OTF (On-the-Fly) 扫描。针对 OTF 结果的扫描效应, 提出了一种基于测量结果二次导数的校准方案, 并使 OTF 测量结果与步进扫描测量结果精度相当, 而效率提高了约 7 倍;
3. 设计并测试了基于 MEMS 工艺的 0.18~0.32 THz 曲面轮廓波纹喇叭。测试结果表明, 在 0.18~0.32 THz 范围内, 回波损耗约小于 -17dB, 增益大于 18 dB。其远场方向图分别采用近场测量与直接远场测量进行比较, 二者均与仿真结果吻合良好;
4. 测量了应用于大气观测的太赫兹超导波谱仪的近场分布, 并根据测量结果计算了其远场特性, 给出了测量系统的误差上界。此外, 还利用物理光学法对 B2 波段进行了详细分析。

本论文的研究工作加深了对太赫兹波段近场测量的探头, 相位校准方案、及扫描方式的理解, 为测试太赫兹光学系统提供了解决方案并为后续研究更大扫描范围, 更高测试频率的近场测量系统打下了重要基础。

**关键词:** 太赫兹, 近场, OTF 扫描, 波纹喇叭, 相位校准



# Abstract

Terahertz (THz) bands have a variety of applications and are currently important wave band in both astronomy and atmosphere science. A common THz system consists of optical system and detector system. Planar THz near-field measurement method is one of main technologies that are used to characterize the THz optical systems. Planar THz near-field measurements take place in the near-field of antennas in a climate- and electromagnetic-controlled environment. The overall parameters of the antenna in the radiation field including amplitude, phase and cross polarization can be obtained in a single measurement. Due to the high frequency nature of terahertz wave, the measurement accuracy of the near-field approach is limited by the sensitivity of the detectors, the positioning accuracy of the scanners and thermal stability of the environment. Thus, the phase calibration and scanning method need to be further studied.

The main results are as follows:

1. Implementation of a 0.1~0.85 THz planar near-field measurement system. The system reference phase is calibrated by digital frequency multiplication. The phase error introduced by the flexible cable is calibrated by a calibration scheme based on circular. A quasi-optical probe has been proposed to measure high gain antennas, which has been successfully applied to the measurement of a 0.85 THz diagonal horn and a 0.23 THz corrugated horn.
2. Different scan schemes, i.e. OTF (on-the-fly) scan and step scan have been compared in detail. As for the OTF scan, the scanning effect is calibrated based on the second derivative of the measured result, making measurement accuracy of OTF scan comparable with that of the step scan and improving the measurement speed about 7 times.
3. A 0.18~0.32 THz MEMS corrugated horn has been designed and measured. Measurements shows that the return loss is below -17 dB and the gain is over 18 dB from 0.18~0.34 THz. The radiation pattern has been measured by both near-field and far-field measurements, which both shows good agreement with the

simulation.

4. The near-field of the THz superconducting system for atmosphere observation has been measured. The radiation pattern has been calculated and the measurement error has been analyzed. Detailed analysis of the optic has also been carried out by the physical optic method.

The study has provided a better understanding of the probe, phase calibration scheme and scan method in planar THz near-field measurement system and can provide insights to develop a larger near field THz near-field measurement system.

**Key words:** terahertz, near-field, OTF scan, corrugated horn, phase calibration

# 目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 太赫兹波及其应用.....	1
1.1.1 太赫兹天文学.....	1
1.1.2 太赫兹大气科学.....	2
1.1.3 太赫兹探测系统.....	3
1.2 太赫兹辐射场测量技术.....	4
1.2.1 远场测量法.....	5
1.2.2 紧缩场测量.....	5
1.2.3 近场测量.....	6
1.3 太赫兹平面近场测量研究现状.....	7
1.4 本文研究内容概要.....	10
第 2 章 平面近场测量原理.....	13
2.1 引言.....	13
2.2 平面近场测量原理.....	13
2.2.1 平面波叠加原理.....	13
2.2.2 近场到远场的渐近公式.....	15
2.3 探头补偿技术.....	16
2.4 高斯波束.....	22
2.5 太赫兹平面近场测量系统.....	24
2.5.1 XYZ 扫描架.....	25
2.5.2 太赫兹探测器.....	26
2.5.3 太赫兹信号源.....	27
2.6 近场测量范围、测量距离及取样间隔.....	28
2.7 近场测量误差分析.....	29
2.7.1 有引扫描面积引入的截断误差.....	30
2.7.2 探头扫描位置引入的测量误差.....	31
2.7.3 相位误差引入的测量误差.....	32
2.7.4 系统多重反射引入的测量误差.....	33

2.8 本章小结.....	33
第 3 章 0.1~0.85 THz 太赫兹近场测试系统.....	35
3.1 太赫兹近场测试系统构成.....	35
3.1.1 太赫兹混频器.....	35
3.1.2 太赫兹倍频器.....	36
3.1.3 XYZ 扫描架 .....	36
3.1.4 数据采集系统.....	37
3.2 系统相位校准.....	37
3.2.1 系统相位校准.....	37
3.2.2 移动电缆相位校准.....	38
3.2.3 系统相位稳定性.....	42
3.3 系统多重反射测量.....	47
3.4 不同类型探头比较.....	48
3.4.1 准光型探头.....	48
3.4.2 不同类型的探头测量结果比较.....	52
3.5 本章小结.....	54
第 4 章 太赫兹近场测量扫描方法研究.....	57
4.1 引言 .....	57
4.2 步进扫描参数对测量结果的影响.....	58
4.2.1 扫描步长的影响.....	58
4.2.2 不同扫描路径比较.....	60
4.3 基于 OTF 的近场测量(OTF 扫描测量方法).....	62
4.3.1 数据采集的优化.....	62
4.3.2 OTF 扫描效应.....	63
4.3.3 OTF 扫描与步进扫描比较.....	65
4.3.4 不同测量速度的 OTF 近场测量.....	67
4.4 本章小结.....	69
第 5 章 0.18~0.32 THz MEMS 宽带波纹喇叭设计与性能表征.....	71
5.1 引言 .....	71



5.2 曲线轮廓波纹喇叭设计.....	72
5.2.1 波导不连续性分析.....	72
5.2.2 0.18 THz~0.32 THz 曲线轮廓波纹喇叭设计 .....	75
5.3 波纹喇叭制备及组装.....	78
5.3.1 波纹喇叭制备及组装.....	78
5.4 波纹喇叭性能表征.....	80
5.4.1 回波损耗.....	80
5.4.2 增益.....	81
5.4.3 近场分布.....	82
5.4.4 直接远场方向图测量.....	85
5.5 本章小结.....	88
第 6 章 太赫兹超导波谱仪波束特性测量 .....	91
6.1 引言.....	91
6.2 超导波谱仪光学系统设计.....	91
6.3 超导波谱仪近场测量结果.....	93
6.3.1 超导近场测量.....	93
6.3.2 近场测量结果分析.....	96
6.4 本章小结.....	98
第 7 章 总结 .....	99
参考文献.....	101
攻读学位期间发表论文, 专利及获奖情况.....	106
致谢.....	109

# 第1章 绪论

## 1.1 太赫兹波及其应用

太赫兹波是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波[1]，对应的波长范围为 3 ~ 0.03 mm，对应的光子能量范围为 0.41~41.4 meV。其低端与毫米波段重合，而其高端与红外波段重合，如图 1.1 所示。太赫兹波段频率高，波长短，能量低，因而可以广泛地应用于天文学[2-4]、大气科学[5]、通信[6]及安检[7, 8]等领域。

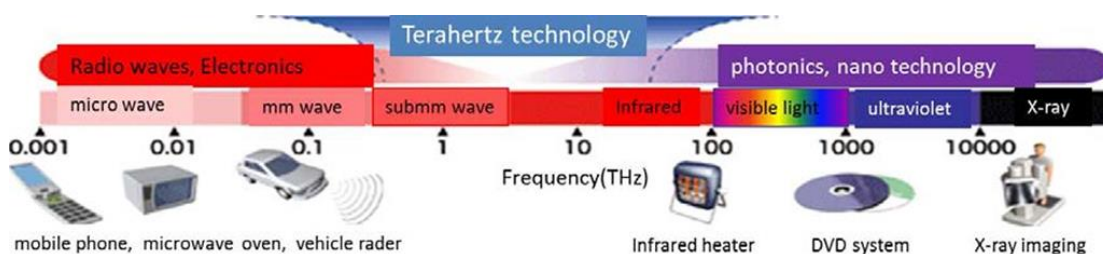


图 1.1 太赫兹波段在频谱中的位置

### 1.1.1 太赫兹天文学

太赫兹波段是天文学中十分重要的波段。太赫兹波段包含了宇宙微波背景辐射后宇宙空间中 50%的光子能量[9]，相当于微波段，红外波段及光波段的光子能量总和。太赫兹波段在天文学上的应用主要包含以下几个方面：

宇宙微波背景辐射[10]：宇宙大爆炸后形成的 3K 微波背景辐射（CMB）的峰值在太赫兹波段。通过对 CMB 的研究，提高对宇宙结构的认识。图 1.2 为 Plank 卫星观测到的宇宙微波背景辐射；

恒星及星系演化：年轻的恒星一般形成于稠密的分子云中，星际间尘埃吸收可见光或紫外光后产生的太赫兹波段辐射为恒星的演化过程提供了关键信息，为 Orion 星云恒星形成区域。

宇宙物质化学组成：太赫兹波段中包含了丰富的谱线信息，许多分子的转动及振动能级跃迁谱线位于太赫兹波段，典型的如 CO (115GHz)，CI (890 GHz)，NII (1.46 THz)，CII (1.9 THz)，OI (4.7 THz) 等。图 1.3 为 Herschel 空间望