



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

太赫兹傅立叶变换频谱仪关键技术特性研究与应用

作者姓名: 李绍亮

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: 紫金山天文台

2016年 11月

**Research and Applications of
Terahertz Fourier Transform Spectrometers'
Key Techniques and Characteristics**

**By
Shaoliang Li**

**A Dissertation/Thesis 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, 2016

摘要

傅立叶变换频谱仪 (FTS) 已经广泛应用于太赫兹天文领域, 包括在地面天文观测选址中大气透过率的测量, 天文观测设备中用于天体辐射和吸收谱线的测量, 并取得了一系列重要成果。本论文旨在研究傅立叶变换频谱仪的特性以及实际应用中的问题, 并利用这些研究结果进行太赫兹信号源和探测器的特性表征及应用。

本论文首先探讨了傅立叶变换频谱仪的基本原理、关键参数和不同的扫描模式, 在此基础上分析了低频干扰和多重反射的形成机制。利用切趾、补零和相位校准等数据处理方法对实测的频谱信息进行处理, 以达到提高信噪比、平滑频谱曲线的效果。在以上基础上, 对几种本实验室常用太赫兹信号源和探测器的特性进行了特性表征及应用。

在太赫兹信号源方面, 利用液氮作为标准黑体对傅立叶变换频谱仪系统的频率响应进行了测量, 证明了其主要因素是所使用的波束分离装置; 测定了高压汞灯在 2.4THz 附近等效黑体辐射温度分别是 1200K 和 800K; 测定了太赫兹量子级联激光器 (QCL) 连续波和脉冲两种模式下的频谱输出, 并给出了脉冲模式输出功率与占空比的关系; 测定了倍频链路信号源的输出频谱。太赫兹探测器方面, 使用频域法测定了 DLATGS 型热释电探测器和零偏压肖特基二极管的时间常数和截止频率。创新性地利用傅立叶变换频谱仪快速扫描方式对信号频率进行调制的特点测量了测热辐射计的截止频率。另外测试并表明超导热电子 (HEB) 混频器和超导隧道结 (SIS) 探测器的截止频率受它们所使用的读出和滤波放大电路限制。此外, 也测定并校准了以上二者的频率响应。

最后, 设计了一套小型化傅立叶变换频谱仪, 并将它应用于实验室中水汽影响的测量: 通过充氮气 (排空水汽) 测量和大气模型模拟两种方式交叉验证了水汽对太赫兹频谱测量的影响。

关键词: 傅立叶变换频谱, 太赫兹, 干涉仪

Abstract

Fourier transform spectrometer has been widely applied in Terahertz astronomy, including atmospheric transmission measurement in site surveys and the measurement of celestial radiation and absorption spectral lines integrated in astronomical observational instruments. A series of exciting achievements has been witnessed. In this thesis, we aim to investigate the characteristics of FTSs and issues encountered in the applications, and make use of the investigations to explore the characteristics and applications of terahertz sources and detectors.

In this thesis, we firstly discussed the basic principles, key parameters and different scan modes of Fourier transform spectrometers, based upon which the mechanics of low-frequency interferences and multi-reflections are investigated. Apodization, zero-filling and phase correction are implemented to improve the spectral features including the signal-to-noise ratio and the smoothness of the spectral responses.

The characterization and applications of several terahertz radiation sources and detectors in the lab are performed based upon the former discussions. As for the Terahertz radiation sources, liquid nitrogen is utilized to calibrate the spectral response of the FTS system, which shows the beamsplitter is the main responsible component. The equivalent temperature of a high pressure mercury lamp is measured to be 1200K and 800K below/above 2.4THz; Both the continuous wave mode and pulse mode of a QCL is measured, showing the relationship between the duty cycle of the pulse and the output power. The output frequency for a frequency multiplier is also measured. On the Terahertz detectors, frequency domain method is used to measure the time constant and cut-off frequency of both a DLATGS pyroelectric detector and zero-biased Schottky diode. By creatively utilizing the modulation of source signals of rapid scan mode, the cut-off frequency of a bolometer is measured, which agrees well with that measured through the frequency domain method. It is shown that for both the superconductive tunnel junction and

hot electron bolometer detectors the cut-off frequency is dominated by their readout-filtering-amplification circuits, their spectral response is also measured and corrected.

Finally, a compact FTS is designed for atmospheric studies, it is used to measure the effects of water vapor in the current laboratory environment, nitrogen purging is proved applicable in removing such effects.

Keywords: Fourier Transform Spectroscopy (FTS), Terahertz (THz), Interferometer

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
第一章 引言.....	1
1.1 太赫兹波段辐射简介.....	1
1.2 太赫兹频谱测量技术.....	6
1.3 本论文研究内容摘要.....	8
参考文献.....	9
第二章 傅里叶变换频谱仪工作原理与系统特性.....	12
2.1 FTS 系统基本原理及类型.....	12
2.1.1 Michelson 型干涉仪.....	13
2.1.2 Martin-Puplett 型干涉仪.....	15
2.1.3 Mach-Zehnder 型干涉仪.....	16
2.1.4 不同类型傅立叶变换频谱仪的比较.....	16
2.2 FTS 系统关键参数.....	17
2.2.1 工作带宽.....	17
2.2.2 频率分辨率.....	18
2.2.3 通光量与立体角.....	18
2.3 FTS 系统扫描方式.....	19
2.3.1 步进扫描与连续扫描.....	20
2.3.2 单边扫描与双边扫描.....	23
2.4 FTS 系统中现象研究及数据处理.....	24
2.4.1 多重反射效应.....	24
2.4.2 低频干扰效应.....	29
2.4.3 切趾与补零.....	33

2.4.4 相位校准.....	36
2.5 小结.....	37
参考文献.....	38
第三章 太赫兹辐射源特性表征及应用.....	40
3.1 太赫兹辐射源的种类.....	40
3.2 太赫兹宽带辐射源特性表征及应用.....	41
3.2.1 液氮——FTS 系统响应测定.....	41
3.2.2 高压汞灯等效温度测量.....	44
3.3 太赫兹窄带辐射源特性表征及应用.....	46
3.3.1 太赫兹量子级联激光器——连续波模式.....	47
3.3.2 太赫兹量子级联激光器——脉冲模式.....	49
3.3.2 单频可调谐振固态辐射源.....	52
3.4 小结.....	53
参考文献.....	54
第四章 太赫兹探测器特性表征及应用.....	56
4.1 太赫兹探测器的类型和主要特性.....	56
4.1.1 时间常数与截止频率.....	57
4.1.2 响应率.....	59
4.1.3 频率响应特性.....	59
4.1.4 等效噪声功率.....	60
4.2 常温太赫兹探测器工作原理和特性表征.....	60
4.2.1 DLATGS 型热释电探测器的时间常数和截止频率.....	60
4.2.2 零偏压肖特基二极管的时间常数和截止频率.....	63
4.3 低温太赫兹探测器工作原理、特性表征和应用.....	66
4.3.1 超导隧道结探测器的频率响应和截止频率.....	66
4.3.2 测热辐射计的频率响应和截止频率测量.....	69
4.3.3 超导热电子混频器的频率响应和截止频率.....	71
4.4 小结.....	74

参考文献.....	74
第五章 小型化傅立叶变换光谱仪设计、表征及应用.....	76
5.1 小型化 FTS 系统设计.....	76
5.1.1 设计目标.....	76
5.1.2 系统参数计算.....	77
5.2 小型 MPI FTS 系统特性的表征.....	80
5.2.1 可用工作带宽的测定.....	80
5.2.2 最小频率分辨率的测量.....	81
5.3 小型 MPI FTS 的应用——水汽吸收影响的仿真和测试.....	82
5.4 小结.....	83
参考文献.....	84
第六章 结论.....	85
附录 1 FTS 操作参数计算与设置原则.....	87
附录 1.1 FTS 测量系统仪器及参数设置的一般原则.....	87
附录 1.2 连续扫描时低频干扰频率转换的计算.....	88
附录 1.3 连续扫描时对信号调制频率的计算.....	89
附录 1.4 小型 FTS 系统中频率测量误差传递的推导.....	90
附录 2 水汽模拟所使用的大气模型.....	91
参考文献.....	92
发表的学术论文与研究成果.....	93
致谢.....	95

第一章 引言

1.1 太赫兹波段辐射简介

通常将频率为 $0.1\text{THz}\sim 10\text{THz}$ 的电磁波称为太赫兹波，其对应的波长在 $30\mu\text{m}\sim 3\text{mm}$ 之间，因此在概念上与微波的毫米波亚毫米波 ($0.1\text{mm}\sim 10\text{mm}$) 有重叠的部分，与红外波段 ($300\text{GHz}\sim 430\text{THz}$, $1\mu\text{m}\sim 700\text{nm}$) 的远红外、中红外也有一定的重叠。鉴于太赫兹波段处于光学和微波电子学的中间，而后两个学科的现有知识及技术手段都不能完全解决太赫兹领域的问题，因此成为了电磁波中最后一个有待全面研究的频段，被称为太赫兹间隙 (THz Gap)。实际上，早在 2004 年 MIT 技术评论就将太赫兹列为十个将会改变世界的新兴技术之一 [1]。

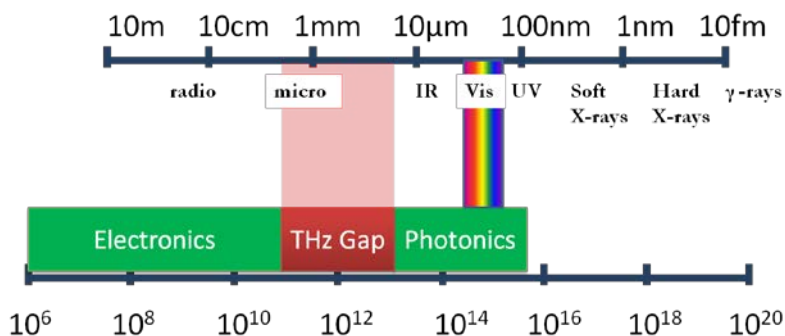


图 1-1 太赫兹的频段、波长及其与常见电磁波段的比较[Credit: Shuvan Prashant^[2]]

由普朗克辐射定律可以知道，室温及人体辐射的波长都在太赫兹波段范围内：室温 (300K) 物体的辐射最高的频率在 6THz 左右，因此太赫兹其实存在于我们日常生活中的方方面面。

国际上很多国家组织和学术机构都在从事与太赫兹相关的研究工作，如：美国一系列重要的国家实验室如喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory)、国家物理实验室 (National Physical Laboratory)、海军研究实验室 (Naval Research Laboratory)，英国的 Rutherford 国家实验室、剑桥大学、罗切斯特大学等，俄国国家科学院为太赫兹技术专门成立了研究计划，日本 2005 年的十年

科技战略规划将太赫兹列为十项重大关键技术的首位，韩国、新加坡、台湾也都有相应的太赫兹研究计划和学术组织。

太赫兹技术之所以在近年来得到如此大规模的重视，除了它尚未被完全开发外，也因为这一频段所独有的一些性质，比如：

- 1) 有机分子在太赫兹波段通过旋转和振动转变而吸收能量，因此有其独特的吸收和谐振特点，这些标志性特点被称为指纹 (fingerprint)，被广泛应用于化学和生物医学的检测中^[3]。
- 2) 这一频段光子能量低，穿透性强，可以无障碍地穿过除金属和水之外的很多物质，同时又不会像高能 X 射线那样因为电离而造成伤害。所以，可以应用于成像及感知，在机场安检等场合成为寻找武器、毒品、爆炸物等的有利工具^[4]，甚至有人利用这一特点开发出了非接触式读取书籍内容的专利^[5]。
- 3) 水汽对这一频段的信号具有强烈的吸收谱，这一特性会对太赫兹波的很多应用造成不利的影 响，但是在食品及农产品质量控制方面，则可以发挥到积极的作用^[6]。
- 4) 在无线通信工作频段已达到几 GHz 并且需求越来越旺盛的发展形势下，鉴于太赫兹频段比现有无线通信的频段更高，其更高的带宽无疑对超高速无线通信具有天然的吸引力。当前 5G 通信的工作频段已达到毫米波段^[7]，基于太赫兹频段的数据传输也已经纳入下一代无线通信技术的研究中^[8]。但是由于太赫兹波段在大气中衰减严重，因此它在地面移动通信方面只适合短距离应用。另一方面，此特性反而有利于类似战场环境下高速保密通讯的需求。
- 5) 宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB) 辐射是指宇宙大爆炸所产生的辐射，其半数亮度 (luminosity) 和 98% 的光子都处于太赫兹波段^[9]，因此通过对这一频段的观测可以推测很多宇宙演化的关键信息。与光学近红外波段相比，太赫兹能够穿透星际气体和尘埃，看到深埋其中的年轻天体，又具有更高的空间与时间相干性，使它成为天文