

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家863计划信息技术领域主题项目(No. 2011AA010200)资助



“十二五”  
国家重点  
出版规划丛书

# 太赫兹

# 通信技术导论

● 李少谦 陈智 文岐业 张波 何奇◎著

Introduction to  
Terahertz Communications



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书/李少谦 周 亮 主 编

该书由国家 863 计划信息技术领域主题项目 (No. 2011AA010200) 资助

# 太赫兹通信技术导论

Introduction to Terahertz Communications

李少谦 陈智 文岐业 张波 何奇 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

太赫兹通信技术极具应用前景,太赫兹频段尚有巨大的频谱资源拟待开发。与当今相对成熟的红外光技术和微波技术相比,太赫兹通信具有传输速率高、方向性好、安全性高、散射小、穿透性强等优势。本书立足当前太赫兹通信领域的发展现状,详细介绍了太赫兹波传输特性和信道模型分析、太赫兹通信系统信号产生和探测、基于电子学方法的太赫兹通信系统、太赫兹直接调制技术等内容。

本书既可供从事太赫兹通信领域研究的科研人员及相关领域的工程技术人员学习参考,也可作为高等院校通信与信息系统、通信与电子工程等专业师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

太赫兹通信技术导论/李少谦等著. —北京:国防工业出版社,2016.1

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-10863-7

I. ①太… II. ①李… III. ①电磁辐射—无线电通信—研究

IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第060734号

Introduction to Terahertz Communications

该书由国家863计划信息技术领域主题项目(No. 2011AA010200)资助

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 10 字数 224千字

2016年1月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 69.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

# 序 言

随着国民经济的发展，社会信息化进程不断推进，移动和高速多媒体传输业务不断涌现，对无线通信传输速率的需求呈指数增长，对无线通信系统的容量提出了前所未有的高要求。无线通信技术正面临有限频谱资源与迅速增长的高速业务需求的矛盾。在此背景下，无线通信系统向更高频率扩展成为实现高速率通信的最佳途径，而太赫兹无线通信无疑是最佳通信方式。

太赫兹 (THz) 波是指频率在  $0.1\sim 10\text{THz}$  (波长为  $30\sim 3000\mu\text{m}$ ) 范围内的电磁波，频段介于微波与远红外光之间。太赫兹频段具有广阔的还没有分配的频带，可以提供远高于当前超宽带技术的传输速率。此外，太赫兹通信技术还具有方向性好、安全性高、散射小、穿透性强等优势。国际电信联盟已经指定  $0.12\text{THz}$  和  $0.22\text{THz}$  频段分别用于下一代地面无线通信 (移动电话) 和卫星间通信。太赫兹科学已逐渐成为新一代无线通信产业发展的重要基础。

美国、德国、日本和韩国等国家一直致力于发展太赫兹高速无线通信技术，抢占太赫兹频段的通信资源。我国研究太赫兹通信具有必要性和紧迫性。具体而言，我国发展太赫兹通信可以抢占太赫兹频段广阔的空白带宽资源，使得我国科研组织参与制定国际标准化组织关于太赫兹通信的相关标准，拓展超高速率无线通信，实现严格意义上的宽带无线安全高速接入，实现高传输速率、高可靠性的新一代无线通信网络，从战略和战术上抢占研究的制高点，掌握核心技术，走在太赫兹通信的技术前沿。

太赫兹通信技术的发展日新月异，目前国内尚缺一本全面详细介绍太赫兹通信技术的中文书籍。有鉴于此，本书立足于当前太赫兹通信技术的研究进展，理论与实际相结合，罗列了该领域的大部分国内外研究成果，详细描述了太赫兹波传输特性和信道模型、太赫兹通信系统信号产生和探测、基于电子学方法的太赫兹通信系统、太赫兹直接调制技术等方面的研究现状。

本书结构清晰，图文并茂，希望通过对太赫兹通信技术领域的总体介绍，可以增强国内对太赫兹通信技术的认识，并有助于提高我国该领域的研究水平。

李少谦

2015年12月

# 前 言

太赫兹频段介于微波频段与红外可见光频段之间，是电子学向光子学的过渡领域，也是最后一个人类尚未完全认知和利用的频段，被称为电磁波频谱资源中的“太赫兹空隙”（THz gap）。由于太赫兹频段具有广阔的频谱资源，且相对于现有的红外光技术和微波技术有其独特的技术优势，太赫兹波用于通信领域成为近年来国内外研究的热点，全世界相关领域的研究者对其给予了极大的关注。

本书较为系统地介绍了当前太赫兹通信技术的研究进展和研究成果，为该领域学术研究者提供参考，同时也适合相关产业界工程技术人员查询所需。本书理论阐述力求深入浅出，罗列的当前研究进展力求可靠全面、方便使用和本地化。

第1章为太赫兹通信技术概论。主要介绍太赫兹波在各个领域的研究现状和应用、太赫兹通信技术的应用背景和发展形势、太赫兹通信的技术特色与应用场景、太赫兹通信系统分类。

第2章为太赫兹波传输特性和信道模型分析。根据0.01~1THz电磁波的大气吸收衰减模型，介绍了太赫兹波在大气中传输时水汽和干空气的影响，并给出了实际情况下的太赫兹波的吸收衰减率，最后分析了太赫兹波用于等离子体通信的研究进展及存在的挑战。

第3章为太赫兹通信系统信号产生和探测。详细描述了真空电子学太赫兹辐射源、光学太赫兹辐射源、固态半导体电子学太赫兹辐射源、太赫兹量子级联激光器等源器件的历史、工作原理、当前进展、优劣势等，最后介绍了相干探测和非相干探测等太赫兹信号检测技术。

第4章为基于电子学方法的太赫兹通信系统。首先介绍了全固态电子学太赫兹高速无线通信系统的系统总体技术、波产生和功率放大技术、波在发射机接收机中的传输技术、上下变频技术、集成微系统技术等，然后介绍了0.1THz光电结合的电子学方法太赫兹高速无线通信系统及其基站简化原理，最后详细介绍了将光纤通信和无线通信结合起来的RoF无线接入技术。

第5章为太赫兹波直接调制技术。主要介绍了基于人工电磁材料的太赫兹直接调制技术、基于光子晶体的太赫兹直接调制技术、基于石墨烯的太赫兹调制器研究、基于半导体的光控太赫兹调制技术的研究。

第6章为太赫兹通信技术展望。介绍了太赫兹通信技术的应用前景，并对未来太赫兹通信技术领域的发展趋势进行了展望。

本书由李少谦，陈智策划。本书第 1 章和第 6 章由陈智、何奇撰写，第 2 章和第 5 章由文岐业撰写，第 3 章由王军撰写，第 4 章由张波撰写。何奇在书稿的校订、录入过程中做了大量工作。在此一一表示诚挚的感谢。

太赫兹通信技术涉及的方面很广，由于我们的水平有限，难以在一本书中一一详尽容纳；由于我们的经验不足，书中不妥和错误之处在所难免，请各位读者批评指正。

作者

2015 年 10 月

# 目 录

第 1 章 太赫兹通信技术概论	1
1.1 太赫兹波简介	1
1.1.1 太赫兹波概述	1
1.1.2 国内外太赫兹研究现状	2
1.1.3 太赫兹波的应用	5
1.2 太赫兹通信的应用背景与发展形势	9
1.2.1 太赫兹通信的应用背景	9
1.2.2 太赫兹通信的发展形势	11
1.3 太赫兹通信的技术特色与应用场景	12
1.3.1 太赫兹通信的技术特色	12
1.3.2 太赫兹通信的应用场景	13
1.4 太赫兹通信系统分类	15
1.4.1 太赫兹发射子系统分类	15
1.4.2 太赫兹接收子系统分类	16
参考文献	16
第 2 章 太赫兹波传输特性和信道模型分析	17
2.1 太赫兹波大气传输特性	17
2.1.1 太赫兹波大气衰减原理	17
2.1.2 太赫兹波大气衰减计算模型	19
2.2 太赫兹波信道特性分析	23
2.2.1 信道	23
2.2.2 太赫兹波信道基本特性	24
2.3 太赫兹波传输信道建模与仿真	25
2.3.1 信道仿真软件结构	25
2.3.2 信道仿真软件功能模块设计	27
2.3.3 信道仿真分析	28
2.4 太赫兹波在等离子体中的传输特性	30
2.4.1 等离子体简介	30
2.4.2 高速飞行器的等离子体鞘套	31

2.4.3 太赫兹波在等离子体中传输的研究进展	32
参考文献	33
<b>第 3 章 太赫兹通信系统信号产生和探测</b>	<b>34</b>
3.1 太赫兹无线通信信号产生	34
3.1.1 真空电子学太赫兹辐射源	34
3.1.2 光学太赫兹辐射源	45
3.1.3 固态半导体电子学太赫兹辐射源	50
3.1.4 太赫兹量子级联激光器	54
3.2 太赫兹无线通信信号检测	56
3.2.1 太赫兹探测器的基本参数	57
3.2.2 外差探测器	58
3.2.3 热探测器	74
3.2.4 光电导探测器	78
参考文献	81
<b>第 4 章 基于电子学方法的太赫兹通信系统</b>	<b>84</b>
4.1 全固态电子学太赫兹高速无线通信系统	84
4.1.1 系统总体技术	84
4.1.2 太赫兹产生和功率放大技术	88
4.1.3 太赫兹传输技术	91
4.1.4 太赫兹上下变频技术	93
4.1.5 太赫兹集成微系统技术	94
4.2 光电结合的电子学方法太赫兹高速无线通信系统	96
4.2.1 0.1THz 的光载太赫兹通信系统	96
4.2.2 基于光电结合产生高功率的 0.1THz 太赫兹波	100
4.2.3 光载太赫兹无线通信的基站简化	101
4.3 RoF 技术	103
4.3.1 RoF 技术产生背景	103
4.3.2 RoF 技术基本原理	103
4.3.3 毫米波 RoF 技术	104
4.3.4 对光源的调制	105
4.3.5 光纤色散控制技术	108
4.3.6 非线性效应控制技术	109
4.3.7 波长交叉的波分复用技术	109
4.3.8 RoF 技术的应用	110
参考文献	110



第 5 章 太赫兹波直接调制技术 .....	111
5.1 基于人工电磁材料的太赫兹直接调制技术 .....	111
5.2 基于光子晶体的太赫兹直接调制技术 .....	114
5.2.1 光子晶体简介 .....	114
5.2.2 基于光子晶体的太赫兹调制器的研究进展 .....	115
5.3 基于石墨烯的太赫兹调制器研究 .....	117
5.3.1 石墨烯的基本概念及其性能 .....	117
5.3.2 大面积、高质量石墨烯薄膜的制备 .....	119
5.3.3 石墨烯太赫兹调制器主要技术进展 .....	125
5.3.4 基于石墨烯晶体管的太赫兹波调制技术研究 .....	128
5.4 基于半导体的光控太赫兹调制技术的研究 .....	136
5.4.1 光作用半导体的电学性能 .....	136
5.4.2 半导体硅的太赫兹调制特性研究 .....	137
5.4.3 基于掺金 Si 的太赫兹调制技术研究 .....	141
参考文献 .....	145
第 6 章 太赫兹通信技术展望 .....	148
6.1 太赫兹通信技术的应用前景及展望 .....	148
6.2 太赫兹通信技术领域的发展趋势 .....	149
参考文献 .....	150

# 第 1 章 太赫兹通信技术概论

## 1.1 太赫兹波简介

### 1.1.1 太赫兹波概述

“太赫兹”（THz）是一个频率单位，1THz 等于  $10^{12}$ Hz。频率在  $0.1\sim 10$ THz（波长为  $30\sim 3000\mu\text{m}$ ）范围内的电磁波，称为太赫兹波。太赫兹波介于技术相对成熟的微波频段与红外线频段两个区域之间，如图 1-1 所示。太赫兹波的长频段与亚毫米波重合，发展主要依靠电子学技术；短波频段与红外频段重合，发展主要依靠光子学技术。太赫兹频段是宏观电子学向微观光子学过渡的频段，也是最后一个人类尚未完全认知和利用的频段，被称为电磁波频谱资源中的“太赫兹空隙”（THz gap）。

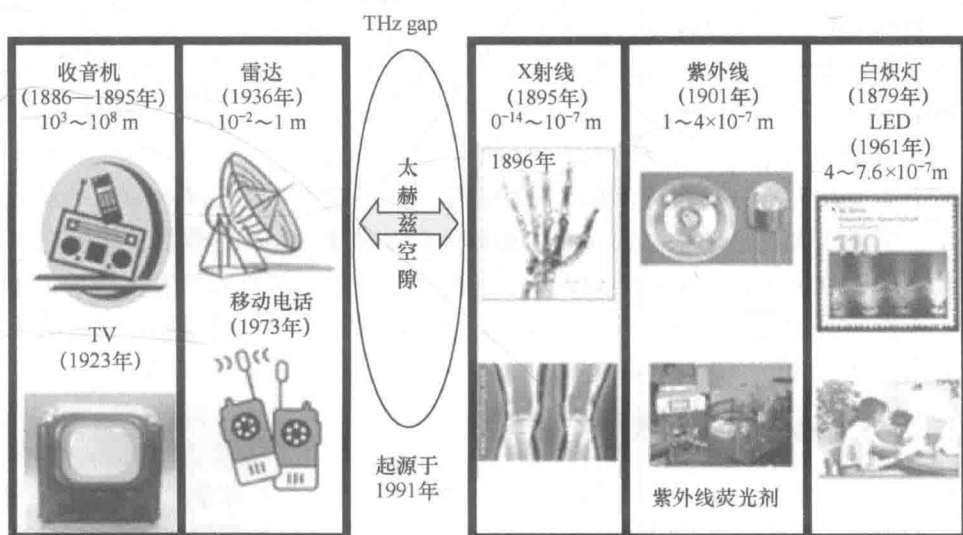
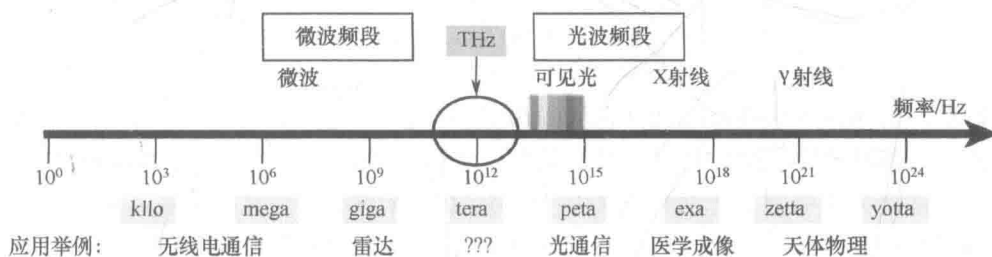


图 1-1 太赫兹在电磁波谱中的位置

从图 1-1 可以看出,在电磁频谱资源中,处于太赫兹频段以下的微波频段自 19 世纪发展至今已广泛用于广播、卫星广播电视、移动通信、雷达、遥测遥控、电子侦察、医疗等领域,处于太赫兹频段以上的红外线、光波直至紫外线、X 射线更是广泛用于显示、医疗、探伤、战略武器、加工行业及人类日常生活用品等重要领域。微波和光波科学技术彻底改变了现代社会的生活方式和工业进程,为人类社会的发展和进步做出了不可磨灭的贡献,长期以来被誉为人类认知物理世界的“两只眼睛”。随着人类对电磁频谱资源的不断认识与开发,位于微波和光波之间的太赫兹频段信息资源,这块沉寂了半个多世纪被称为“太赫兹空隙”的频谱“处女地”走进了 21 世纪科学前沿领域。

作为微波到红外频段过渡区域的电磁波,太赫兹波主要具有以下重要特征。

(1) 量子能量和黑体温度很低。

(2) 许多物质大分子,特别是生物大分子的转动和振动能级在太赫兹频段具有相应的特征谱,因此在太赫兹频段表现出很强的吸收和谐振,不仅可以探测到物质组成的元素而且可以测定物质分子结构。

(3) 太赫兹辐射能以很小的衰减穿透如陶瓷、脂肪、碳板、布料、塑料等物质。因此可用太赫兹探测低浓度极化气体,适用于控制污染;还可以无损穿透墙壁、布料,在某些特殊领域发挥作用。

(4) 太赫兹的时域频谱信噪比很高,这使得其非常适用于成像应用。

(5) 瞬时带宽很宽(0.1~10THz),可实现大容量数据的实时无线传输。

(6) 可形成很窄的脉冲(飞秒级)。不但可以方便地进行时间分辨的研究,而且通过取样测量技术,能够有效地抑制远红外背景噪声的干扰。

太赫兹波兼有微波和光波的特性,具有低量子能量、大带宽、强穿透性等独特的优势。因此太赫兹波被誉为继微波、光波后人类更全面认知世界的“第三只眼睛”,对促进人类社会进步和发展具有重要的意义。但是,多年来由于人们认知度、研究手段和科学技术发展水平等系列限制,这块沉寂多年的频谱“处女地”一直未能得到开垦。

随着科学技术的飞速发展以及人类认知的不断提升,20 多年来,太赫兹科学成为国际电磁领域的焦点,国际上多个科学前沿领域都被太赫兹所吸引,如亚波长光学、微纳光学、表面等离子体激元、人工电磁媒质、石墨烯等,使太赫兹科学不断得到丰富和发展。目前已形成多个交叉研究方向和领域,如太赫兹光学、太赫兹表面等离子体学、太赫兹人工结构材料学、太赫兹自旋电子学、太赫兹生命科学和太赫兹强场物理学等。太赫兹科学为物理学、化学、生物医学、环境科学、天文学和材料学等学科的基础研究方面提供了新的认知手段,不断地推动人们对基础科学领域进行“重新认识”。太赫兹科学已成为了一门新兴的具有重要学术价值的交叉前沿学科。

## 1.1.2 国内外太赫兹研究现状

太赫兹科学技术是非常重要的交叉前沿技术领域,是当今国际学术研究的前沿和热点。2011 年全球最具权威的 IT (Information Technology) 研究与顾问咨询公司高德纳公司(Gartner Group) 将太赫兹科学列为世界六大创新科学技术之一。

2004年,美国麻省理工学院将太赫兹科技评为“改变未来世界的十大技术”之一。2007年,美国集合麻省理工大学、斯坦福大学、加州理工大学等研究单位开展了全国性太赫兹电子学 (THzE) 计划和高频集成真空电子学 (HiFIVE) 计划; 2008年至今,美国集合加州大学伯克利分校、加州理工大学等多家高校以及劳伦斯-利弗莫尔、喷气推进、洛斯阿拉莫斯实验室等开展亚毫米波焦平面技术 (SWIFT) 和太赫兹焦平面技术 (TIFT) 全国性计划; 2010年,美国再次实施了关于太赫兹视频合成孔径成像雷达开发和研究全国计划。美国国家基金会 (NSF)、国防部先进研究项目局 (DARPA) 和航空航天局 (NASA) 等机构从20世纪90年代中期开始对太赫兹科技研究进行了大规模的投入。美国的一些重要的实验室,如劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore, LLNL)、劳伦斯·伯克利国家重点实验室 (Lawrence Berkeley, LBNL)、斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 等都在开展太赫兹的研究工作。美国几乎所有的顶尖大学都在从事太赫兹的研究工作,美国国防高级研究计划署 DARPA 0.1~0.1THz 太赫兹源的部署计划如图 1-2 所示。

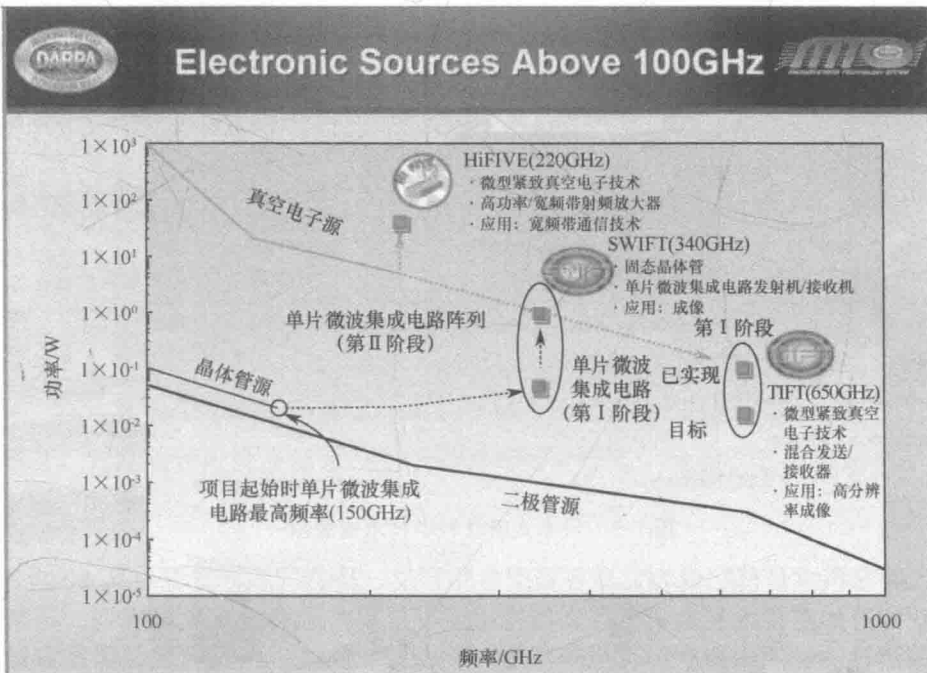


图 1-2 美国国防高级研究计划署 DARPA 0.1~1.0THz 太赫兹源的部署计划

欧盟第五到七框架计划中启动了一系列跨国协同的太赫兹科学研究计划。其中包括由英国剑桥大学牵头,法国、瑞士和意大利的6家研究机构联合参与的WANTED(Wireless Area Networking of THz Emitters and Detectors)计划; 意大利牵头的THz-Bridge计划,协同了德国、以色列、希腊和英国共10家科研机构的20多名领域科学家共同攻关; 欧洲太空总署启动的Star-Tiger计划由英国牛津的拉瑟福德·阿普尔顿实验室组织牵头,欧盟15国共同参与; 此外还有瞄准0.5THz半导体元器件的欧盟半导体产业振兴实施计划——DOTFIVE计划。一系列跨国大型技术的实施在加速欧盟太赫兹科学技术发展的同时,也显示出欧盟发展太赫兹这一新型前沿学科的决心。

日本政府于 2005 年将太赫兹科学列为未来 10 年科技战略规划 10 项重大关键科学技术之首，并列入日本政府从 2006 年开始至 2010 年结束的第三期科学技术基本计划予以支持。日本学术振兴机构（JST）组织了 12 家大学和理化研究所的主要科研机构，开展面向重要应用的太赫兹技术产学合作基础研究，旨在进一步加强主要科研机构的太赫兹基础研究力度，并大力推进太赫兹基础研究成果向产业快速转化。日本各大高校及 SLLSC、NTT 等公司都大力开展太赫兹的研究与开发工作。日本还与欧美合作，建设了全球最大射电天文毫米/亚毫米波天线阵（ALMA）。日本太赫兹科学技术规划如图 1-3 所示。

韩国于 2009 年设立了为期 10 年的全国太赫兹科学技术发展计划。韩国政府组织各大研究机构，联合 10 所高校新成立了太赫兹系统全球前沿中心（Global Frontier Center for Terahertz Systems），并将从 2013 年开始针对该中心启动连续 9 年的太赫兹科学研究计划。

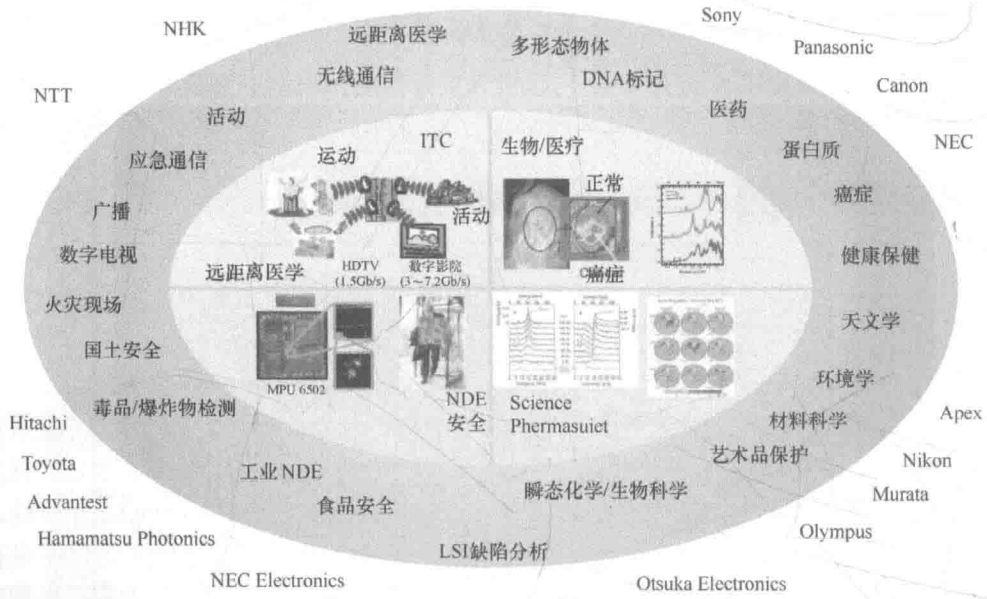


图 1-3 日本太赫兹科学技术规划图

可见太赫兹科学目前已成为世界各强国争相开发、抢占的频谱资源。从 20 世纪 90 年代开始，我国开始重视太赫兹研究，在国家“十二五”科学和技术发展规划、国家重大科技基础设施建设中长期规划中都有明确部署。中国科技部、中国科学院、国家自然科学基金委员会于 2005 年联合召开的以“太赫兹科学技术”为主题的第 270 次香山科学会议，成为我国太赫兹研究工作的里程碑，标志着中国太赫兹研究战略的启动。

2006 年太赫兹专家委员会成立。2011 年年底，科技部启动“毫米波与太赫兹无线通信技术开发”项目，为我国太赫兹领域第一个过亿元的“863 计划”主题项目，下设 5 个课题组，汇聚了国内十多所高校和研究所的优势力量。2012 年，国家推动实施“2011 计划”。2012 年 6 月，电子科技大学联合南京大学、清华大学以及中国科学院电子所、光电所等国内优势力量，在成都正式成立太赫兹科学协同创新中心，开启了中国高校、研究所、企业协同创新研究太赫兹的新时代。2013 年，太赫兹科学协同创新中心先后受中国电子学会委托成立“太赫兹分会”，受国家自然科学基金委员会与中国科学院联合委托成立“太赫兹科学技术前沿发展战略研究基地”，为国家太赫兹科学发展提供战略建议咨询和顶层规划

设计。由中心开创的“深圳国际先进科学技术会议——太赫兹科学技术”也被国际公认为太赫兹领域的顶尖学术会议，极大地提升了我国太赫兹国际学术地位。

目前，国内有 40 多家单位从事太赫兹科学研究，已经形成一支具有相当规模和实力的研究团队。电子科技大学、南京大学、清华大学、上海交通大学、南开大学、天津大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、首都师范大学、中国科学院电子学研究所、中国科学院半导体研究所等多家单位在开展太赫兹科学研究方面成效显著。

### 1.1.3 太赫兹波的应用

由于太赫兹波所处的特殊电磁波谱的位置，融合了微波和红外可见光的优点，相对于其他频段的电磁波具有非常强的互补特征，具有很多优越的特性。这使太赫兹波在无线通信、物体成像、反恐探测、生物医学与食品检测、环境检测、天文观测等领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景。

#### 1. 太赫兹无线通信

无线通信正面临有限频谱资源和迅速增长的高速业务需求的矛盾。太赫兹频段资源丰富，带宽大，具有特有的优良性质。将太赫兹用于无线通信传输有重要的实际应用价值和广阔的应用前景。这点将在本书的后面章节详细介绍。

#### 2. 太赫兹物体成像

太赫兹物体成像首先可实现对人体隐匿炸药、枪支、匕首等违禁品的远距离探测与识别。太赫兹波在传播、散射、反射、吸收、穿透等方面与毫米波、红外线、微波存在显著不同的特点。尤其是太赫兹波对非金属材料具有良好的穿透能力，且太赫兹波光子能量小，没有类似的 X 射线的电离效应，不会对物质产生破坏作用。此外，由于太赫兹频段的波长远小于微波、毫米波，更适合于极大信号带宽和极窄天线波束的实现，有利于获得目标的精细成像。物体运动引起的多普勒效应更为显著，利于低速运动目标的检测。因此，相对于其他频段，太赫兹频段的成像系统更加适合对隐匿炸药、枪支、匕首等违禁品的远距离探测与识别，如图 1-4、图 1-5 所示。



图 1-4 太赫兹技术用于穿透成像

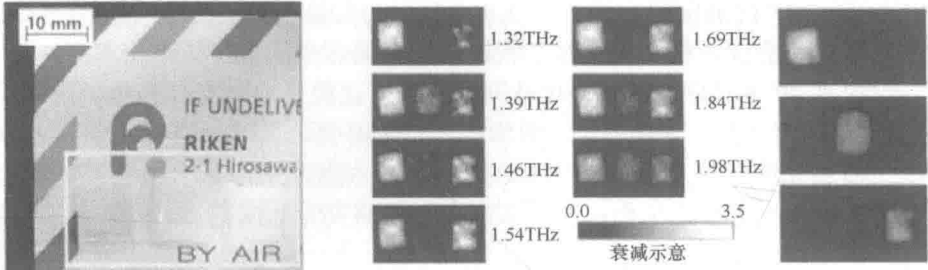


图 1-5 太赫兹波用于信件安检

此外，太赫兹高分辨率成像科学技术在缺陷的无损检测方面具有突出的优势，因此对高端制造业的质量控制具有重大需求。太赫兹波可应用于航天飞机故障和隐患的探测。哥伦比亚号航天飞机的失事，使得如何对航天飞机的故障和隐患进行无损探测成为一个非常重要的研究课题。对传统的检测技术难以分辨的缺陷，如超声检测无法分辨毫米以下的缺陷，微波成像不能提供足够的分辨率，而红外线又不能实现穿透成像，太赫兹波成像技术综合了微波成像系统的穿透性和红外成像系统高分辨率的特点，在无损检测和质量控制方面具有巨大的优势。目前，美国 NASA、国防系统已发展采用太赫兹成像对于飞行器的隔热材料、表面隐形层以及一些关键部件的表面保护涂层等，探测其在制备以及使用中出现的微小气泡和裂纹，以此确保产品的安全使用，如图 1-6 所示；国际计算机芯片业巨头英特尔已与英国著名太赫兹公司 Teraview 合作，全面采用太赫兹成像系统进行芯片无损检测以此完善芯片质量控制技术，如图 1-7 所示。太赫兹科学技术已成为了新一代高端制造业质量控制产业中的重要基础。

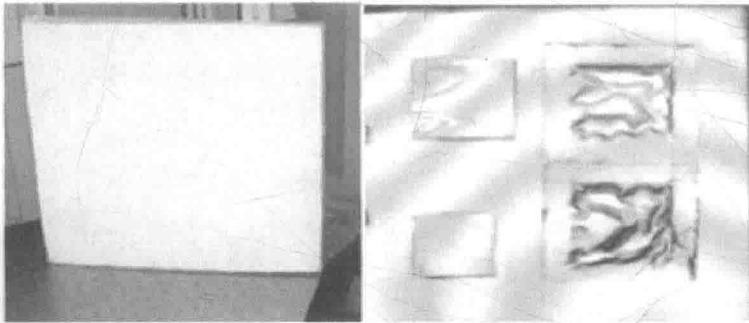


图 1-6 太赫兹波检测火箭燃料箱泡沫板内的缺陷

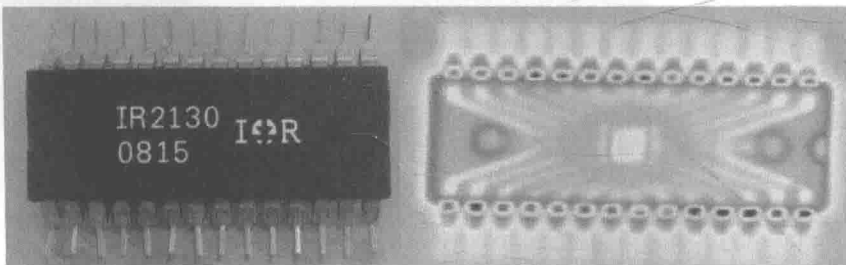


图 1-7 用于芯片质量控制的太赫兹无损检测

### 3. 太赫兹反恐探测

太赫兹探测是维护国家空间安全的重要科学基础。位于微波与红外线之间的太赫兹波，在合成孔径成像（SAR）方面既兼有光学系统的高分辨率和高帧速率，同时又兼有微波系统的高穿透能力，可显著弥补两者的不足。如太赫兹频段具有高达 10GHz 以上的瞬时带宽，因此 SAR 图像的分辨率可达到厘米甚至毫米量级；载波的频率高，成像的帧速率远大于微波 SAR。在太赫兹频段的一些大气窗口，其大气衰减远小于红外线，具有较强的穿透能力。为此，美国 DARPA2012 年启动高帧频合成孔径雷达（ViSAR）项目，旨在开发 100m 低能见度条件下实现对地面机动目标（如运载工具和人员）的实时监测与打击（见图 1-8、图 1-9），以弥补低能见度条件下现有微波和光学传感器的不足。

### 4. 太赫兹生物医学与食品检测

生物体对太赫兹波具有独特的响应，而且很多生物大分子（如 DNA 分子）的旋转及振动能级多处于太赫兹频段，因此太赫兹波在蛋白质等生物大分子无标志识别应用中有着举足轻重的作用。由于太赫兹波具有类似 X 射线的穿透能力，且其光子能量小，不会引起生物组织的光离化，因此在生物医学成像方面非常安全，适合于生物医学成像。可以通过太赫兹波对病变细胞的识别，实现皮肤癌、乳腺癌的早期诊断和预防（见图 1-10）。

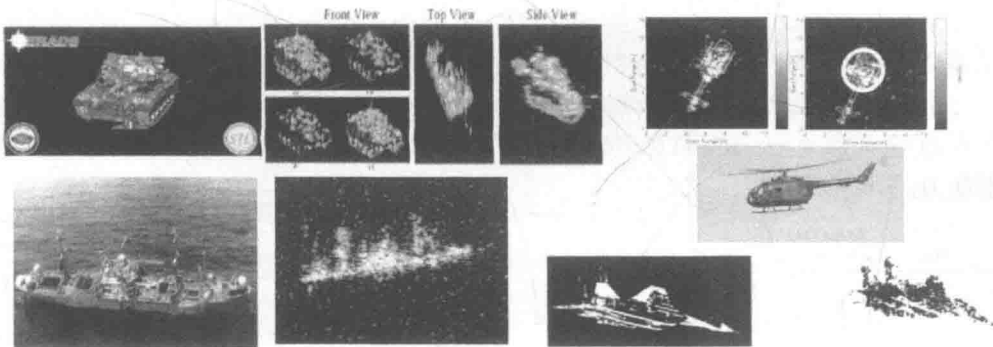


图 1-8 太赫兹成像雷达用于运动目标成像

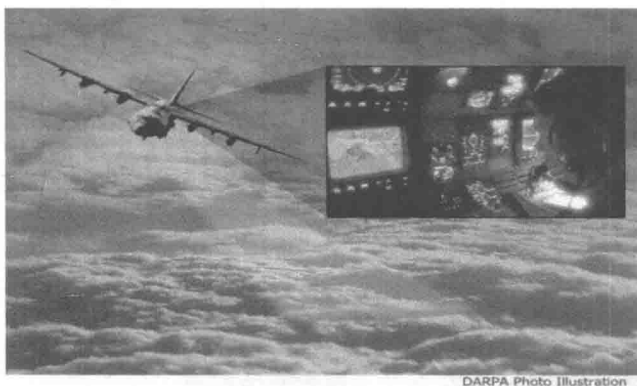


图 1-9 机载太赫兹成像雷达示意图

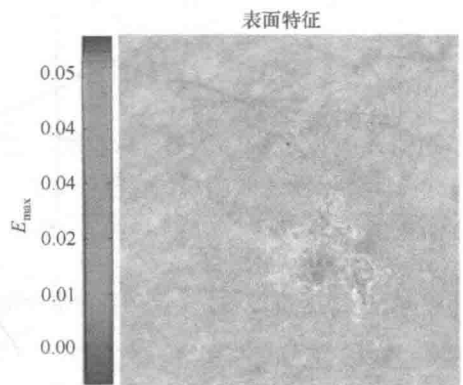


图 1-10 太赫兹用于对皮肤癌的检测

太赫兹辐射不仅在皮肤癌检测上得到应用，而且还在生物芯片和生物传感器方面发展迅速。另外，由于大量有机分子转动和振动跃迁、半导体的子带和微带能量在太赫兹范围，



因此太赫兹波有助于“指纹”识别、结构表征及分子生物信息应用的发展。例如，通过太赫兹技术来分析药物的物理、化学性质，生物成分，波谱特性，以及其分子、量子相互作用过程等重要信息以对药物生产质量进行控制。例如，太赫兹谱可以区分不同的水合物形态。乳糖是制药工业里常用的一种赋形剂，至少有3种不同的水合物形态。如图1-11所示，这3种水合物形态表现出的太赫兹光谱可以用于对药品制剂进行定性和定量分析。

太赫兹波可以用于食品检测。食品中的不同组成成分表现出不同的太赫兹光谱，可以用于对食品成分进行分析。例如，地沟油多来源于餐厅的废弃油渣或者提炼死亡动物尸体、内脏，大部分地沟油都含有动物脂肪，或者加工过程中产生过氧化物。动物油脂的结构比植物油结构复杂，两者的通过太赫兹波检测振动频率差别很大。通过数据比对，就能够找出潜在的地沟油。

### 5. 太赫兹环境检测

太赫兹技术能够对固体、气体、液体及火焰等介质的电学、声学性质及化学成分进行研究。科研人员可利用太赫兹波穿透烟雾来检测出大气中的有毒或有害分子，因此可用于环境的污染检测。大气层中的水、氧气、氮化物、氯化物等成分同样可以辐射出太赫兹波，辐射频率主要在300GHz~2.5THz之间。通过卫星携带的太赫兹波探测器，可以对大气中这些气体的含量及分布等进行检测（见图1-12），从而为近年来引起广泛关注的全球变暖以及臭氧层等环境问题提供第一手资料和数据。美国2003年发射的地球毫米波探测器携带了118GHz~2.5THz的探测器，用于地球大气研究。太赫兹技术在空间及环境探测应用中表现出以下优点：①全天候能力；②反目标隐蔽能力强；③抗背景杂波干扰能力强；④特别的穿透探测和识别能力；⑤可实现三维成像。

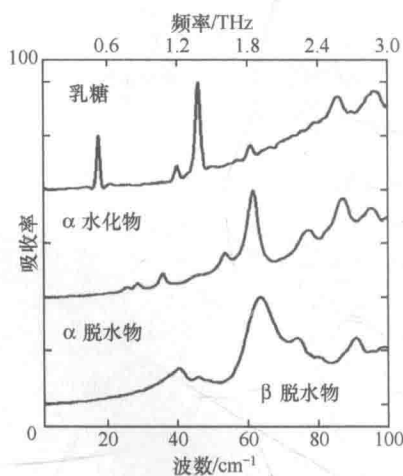


图1-11 太赫兹波区分不同的乳糖水合物

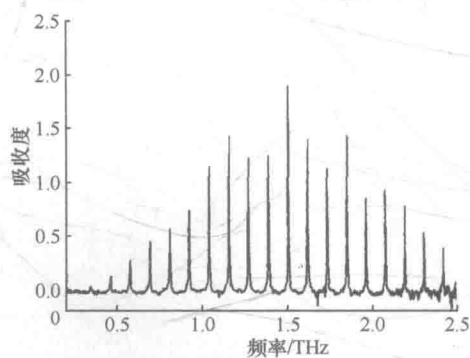


图1-12 一氧化碳的太赫兹吸收谱

### 6. 太赫兹天文观测

太赫兹波在天文学上占有极为重要的地位，是射电天文学上极重要的频段。在宇宙中，大量的物质在发出太赫兹波。炭、水、一氧化碳、氮、氧等大量的分子可以在太赫兹频段进行探测。而在应用太赫兹技术之前，这些物质中一部分根本无法探测，另一部分只能在海拔很高或者月球表面才可以探测到。因此，太赫兹技术在宇宙背景辐射、星际与星系际