



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家重点出版物出版规划项目




国之重器出版工程
国防现代化建设

空间科学与技术研究丛书

Space Terahertz Remote Sensing Technology

空间太赫兹遥感技术

胡伟东 李雅德 吕昕 

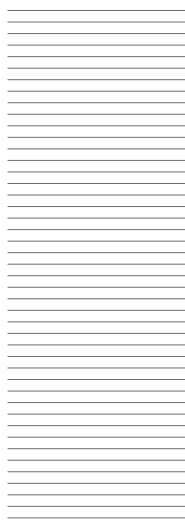


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家重点出版物出版规划项目

空间科学与技术研究丛书



空间太赫兹遥感技术

Space Terahertz
Remote Sensing Technology

胡伟东 李雅德 吕昕 著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共分为10章。首先,概述了空间太赫兹遥感技术的国内外发展状况;然后,从太赫兹遥感理论基础出发,阐述了太赫兹遥感的辐射计系统和指标、太赫兹天线及其影响因素、太赫兹接收机和定标技术、太赫兹遥感图像的数学模型和评价指标、太赫兹遥感图像分辨率增强和复原技术等;最后,阐述了其在安检领域的应用。

本书适用于电子信息工程专业大学高年级学生、研究生和遥感领域工程技术人员阅读,也可供大气遥感领域和安检成像领域的研究人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间太赫兹遥感技术/胡伟东,李雅德,吕昕著.

--北京:北京理工大学出版社,2021.3

ISBN 978-7-5682-9657-1

I. ①空… II. ①胡…②李…③吕… III. ①大气遥感 IV. ①P407

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第049871号

出版/北京理工大学出版社有限责任公司

社址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮编/100081

电话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京虎彩文化传播有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/19.25

字 数/338千字

版 次/2021年3月第1版 2021年3月第1次印刷

定 价/120.00元

责任编辑/曾 仙

文案编辑/曾 仙

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于 全 | 中国工程院院士 |
| 王 越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李春明** 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉** 国际宇航科学院院士
- 李得天** 国际宇航科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿** 中国工程院院士
- 杨德森** 中国工程院院士
- 吴伟仁** 中国工程院院士
- 宋爱国** 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦** 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军** 中国工程院院士
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋** 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士





- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 中国工程院院士
- 赵沁平 中国工程院院士
- 郝 跃 中国科学院院士
- 柳百成 中国工程院院士
- 段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
- 闻雪友 中国工程院院士
- 姜会林 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 谭春林 航天系统开发总师

為胡偉東新作題字

太赫茲遙感

庚子仲秋 慶昕



褚庆昕，华南理工大学电子与信息学院教授，博士生导师，
IEEE Fellow 和中国电子学会会士。

明察秋毫
科技前瞻

恭祝胡伟志空间大赫兹
遥感技术专著出版

壬子年秋月 丰佩东贺



丰佩东，CCTV 纪录片《百年巨匠——舒同》执行导演，书法家。



序

太赫兹科学与技术的发展方兴未艾，并与多个学科交叉，展现出广阔的应用前景。空间科学、信息科学与大气科学的交叉融合可让我们更加了解人类生存的大气层及其变化规律。在卫星平台上利用太赫兹技术对大气进行遥感就是人类探索大气层的有效手段。NASA 和 ESA 最早在该领域取得了重要成果。我国的风云气象卫星应用毫米波太赫兹探测技术，可提供高精度的天气预报，正在为全球 93 个国家和地区以及国内 2 600 多家用户提供卫星资料和产品。

空间太赫兹遥感技术可用来探测大气温度、湿度以及痕量气体的浓度和分布，并进行高分辨成像。高精度的太赫兹遥感仪器需求牵引着太赫兹集成电路、太赫兹大口径天线、太赫兹接收机和太赫兹成像算法的发展，美国 Aura 对地观测卫星太赫兹仪器探测频率为 118 GHz ~ 2.5 THz，欧洲航天局 Herschel 卫星太赫兹仪器频率覆盖 450 GHz ~ 5 THz，相关仪器设计、结构材料、加工工艺、测试定标和成像算法等都对研究者提出了挑战，新原理、新方法和新技术有待探索。我国风云四号气象卫星的探测频段位于 54 ~ 425 GHz，已经突破了多频段准光馈电网络、高灵敏接收机、宽频段毫米波太赫兹定标，以及太赫兹遥感成像等关键技术。

北京理工大学毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室胡伟东团队长期从事太赫兹技术研究，承担国家自然科学基金重大科研仪器项目等研究任务，在太赫兹自主芯片、太赫兹雷达、太赫兹大气探测与遥感等方面取得了一系列成果。该团队参与了风云四号气象卫星毫米波太赫兹探测仪的仿真设计，先后攻克了星载辐射计的大口径天线仿真、空间分辨率增强技术和太赫兹图像处理等



一系列关键技术，为风云卫星太赫兹遥感应用做出了积极贡献。

本书是作者在该领域研究成果的总结和提炼，对于促进太赫兹技术在遥感领域的应用起到积极的推动作用。未来深空探测将成为科技的制高点，太赫兹遥感将是重要的手段之一。本书也可作为遥感领域的工程师和研究生的教材，提供新的参考。

太赫兹遥感技术在人体安检领域的应用和产业化才刚刚开始，本书也将起到抛砖引玉的作用。

中国科学院院士 崔铁军

2021年3月



前 言

太赫兹技术被誉为“改变未来世界的十大技术之一”，是人类探索未知世界的有力工具。太赫兹遥感就是在一定的距离上感知物体辐射的太赫兹波能量，从而反演温度、湿度乃至成像。广义的空间是指地球之上的空间，包括地面、大气层、临近空间及外层太空，太赫兹技术是空间探测的利器。

2016年12月11日，我国风云四号气象卫星发射成功，搭载了最高工作频率为425 GHz的太赫兹成像仪，这是我国第一次尝试在静止轨道（距离地球36 000 km）上应用太赫兹技术。2018年3月，美国发射立方星，搭载883 GHz的太赫兹冰云探测仪。相信在不久的将来，有更多太赫兹载荷出现。

近年来，人工智能在各国得到广泛重视，数字地球、智慧城市、智慧安全、智慧气象、智慧医疗等概念不断推广，而通过太赫兹遥感获取的大量的数据，可以用数据驱动的思想 and 超分辨卷积神经网络的方法进行处理，本书做了有益的探索和尝试，在被动微波遥感领域应用大数据和人工智能方法做出了开拓性工作。

太赫兹遥感技术已经被应用于大气探测、安检成像、医疗检查以及无损检测等领域，本书抛砖引玉，为太赫兹技术的应用提供一定的参考。太赫兹遥感成像在安检领域的产业化已经开始，其原理与空间探测基本相同，由于其“无辐射、无感知、无停留、无触摸”的特点，可用于机场、地铁、海关、医院等处检测人体隐匿违禁物品，已成为当前太赫兹技术的应用热点。

本书针对太赫兹遥感应用，系统地梳理了太赫兹遥感的理论、太赫兹反射面天线、太赫兹接收机、太赫兹遥感空间分辨率增强技术以及太赫兹人体安检应用，重点介绍了空间分辨率增强方法，可为系统设计提供重要依据。本书适



用于高年级本科生、研究生和微波遥感领域的工程技术人员；对于人工智能和深度学习方法在微波遥感领域的应用，本书重点阐述了图像复原与分辨率匹配，因此也适合人工智能应用领域的工程技术人员参考。

本书共分为10章，第1、3、4、5、6、7、8、10章由胡伟东撰写，第2章由吕昕撰写，第9章由李雅德撰写。全书由胡伟东统稿。

风云卫星项目张志清总师、胡秀清总师、董瑶海总师和陈文强总指挥对本书的出版给予极大关注，在此谨致谢忱！感谢国家卫星气象中心陆风、徐娜、商建、安大伟、吴琼、王静、窦芳丽等同事和数值预报中心韩威研究员的合作和支持！感谢俄罗斯外籍院士、荷兰代尔夫特理工大学 Leo P. Ligthart 教授对全书章节结构及学术创新点的指导！感谢中国科学院国家空间科学中心董晓龙教授，中电集团首席科学家年夫顺先生，中国计量科学研究院崔孝海研究员，南京大学赵坤教授，北京师范大学闫广健教授，清华大学赵自然教授，北京航空航天大学苗俊刚教授，北京邮电大学俞俊生教授，首都师范大学张存林教授，上海航天技术研究院余世里研究员、徐红新研究员、谢振超研究员，中电集团电真空技术研究所冯进军研究员、蔡军研究员，航天恒星科技有限公司董涛研究员，中国空间技术研究院西安分院李浩研究员、崔万照研究员、朱忠博研究员的建议和支持！感谢北京理工大学校长张军院士的指导和支持！感谢北京理工大学盛新庆教授、孙厚军教授、薛正辉教授、王学田教授、何芒教授、李镇研究员、章传芳研究员提出的宝贵建议！感谢北京理工大学毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室师生的共同努力，包括博士研究生陈实、刘阳、许志浩、司炜康、袁文泽、张凯旗、Waseem Shahzad、Abdul Samad、Vahid Rastinasad，硕士研究生孟祥新、张文龙、季金佳、王雯琦、王璐、张欣、孙健航、岳芬、刘莞喽、任豪、赵云璋、邢柏阁、倪佳琪、张铄宸、韩钟德、赵鹏、周思远、蒋环宇、姚智宇、丰志妍、刘庆国、Hamid Raza。本书的相关研究得到了国家自然科学基金重大科研仪器项目（61527805）、国家自然科学基金创新研究群体（61421001）、国家自然科学基金重点项目（61731001）和教育部“111”引智项目（B14010）、北京理工大学研究生院的资助，在此表示衷心感谢。本书的出版得到了北京理工大学出版社的大力支持，特别是李炳泉、曾仙、宋肖等编辑做了大量工作，在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

胡伟东

2021年3月



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 空间太赫兹遥感技术	002
1.2 空间太赫兹遥感技术的发展	003
1.2.1 国外发展现状	003
1.2.2 国内发展现状	006
1.3 空间太赫兹遥感技术的应用	007
1.4 空间太赫兹技术的相关应用	011
1.4.1 空间通信	011
1.4.2 空间探测雷达	016
1.4.3 太赫兹人体安检成像	018
参考文献	019
第 2 章 空间太赫兹遥感理论	025
2.1 太赫兹辐射基本理论	026
2.1.1 普朗克黑体辐射定律	026
2.1.2 瑞利 - 琼斯定律	027
2.2 大气传输方程	028
2.3 大气分子的吸收与散射	029
2.3.1 大气吸收	029



2.3.2	大气散射	031
2.4	太赫兹波与大气的相互作用	033
2.4.1	太赫兹波谱	033
2.4.2	太赫兹波的吸收与衰减	038
	参考文献	040
第3章	太赫兹遥感辐射计	043
3.1	太赫兹辐射计的类型	044
3.1.1	全功率型辐射计	044
3.1.2	迪克型辐射计	046
3.2	太赫兹辐射计的空间分辨率	047
3.3	太赫兹辐射计的指标	050
3.4	太赫兹辐射计的相关应用	051
	参考文献	053
第4章	太赫兹反射面天线及其容差分析	055
4.1	反射面天线的工作原理及主要参数	056
4.1.1	天馈系统基本组成及工作原理	056
4.1.2	主要参数及指标	057
4.2	反射面天线系统建模与仿真	058
4.3	反射面天线热形变对天线性能的影响	059
4.4	反射面天线位变对天线性能的影响	061
4.4.1	天线第一副反射面位变仿真分析	061
4.4.2	天线第二副反射面位变仿真分析	069
4.4.3	小结	074
	参考文献	075
第5章	太赫兹辐射计定标与接收机链路	077
5.1	国内外辐射计定标方法	078
5.2	太赫兹辐射计定标方法	079
5.2.1	周期两点定标法	079
5.2.2	定标误差分析	081
5.3	接收机系统仿真	082
5.3.1	接收机关键参数	082



5.3.2 接收机通道仿真	083
5.4 接收机通道增益压缩仿真	099
参考文献	106
第6章 空间太赫兹遥感图像	107
6.1 遥感图像退化模型	108
6.2 遥感图像质量评价指标	110
6.2.1 不需要参考图像的评价指标	110
6.2.2 需要参考图像的评价指标	111
6.3 遥感分辨率增强技术	114
6.4 遥感图像复原技术	118
参考文献	120
第7章 过采样数据空间分辨率增强	125
7.1 过采样数据	126
7.2 维纳滤波去卷积算法	126
7.2.1 算法概述	126
7.2.2 实验结果与分析	128
7.3 Backus - Gilbert 反演算法	131
7.3.1 算法概述	131
7.3.2 模拟数据分析	137
7.3.3 MWRI 实测数据分析	145
7.4 改进维纳滤波去卷积算法	148
7.4.1 改进维纳滤波去卷积算法原理	149
7.4.2 模拟数据仿真	150
7.4.3 模拟数据处理与分析	155
7.4.4 实测数据处理与分析	163
参考文献	169
第8章 非过采样数据空间分辨率增强	171
8.1 非过采样数据	172
8.2 插值重建算法	172
8.2.1 算法概述	172
8.2.2 模拟数据仿真及分析	175



8.2.3 实测数据处理及分析	177
8.3 超分辨重建算法	180
8.3.1 算法概述	180
8.3.2 插值重采样	180
8.3.3 逆滤波	182
8.3.4 模拟数据分析	182
8.3.5 MWRI 实测数据分析	184
8.4 图像融合技术	186
8.4.1 算法概述	186
8.4.2 模拟数据分析	188
8.4.3 MWRI 实测数据分析	191
参考文献	196
第9章 基于深度学习的遥感图像复原	197
9.1 基于卷积神经网络的遥感图像超分辨	198
9.1.1 卷积神经网络	198
9.1.2 遥感图像超分辨	200
9.1.3 遥感图像退化模型	201
9.2 基于 SRCNN 的遥感图像超分辨	204
9.3 基于 EDSR 网络的遥感图像超分辨	217
9.4 基于可调网络的遥感图像分辨率匹配	227
参考文献	248
第10章 太赫兹遥感技术在人体安检中的应用	253
10.1 太赫兹人体安检成像技术现状	254
10.2 太赫兹人体安检成像指标	257
10.2.1 辐射计性能指标	257
10.2.2 图像去噪质量评价指标	258
10.3 太赫兹人体安检成像去噪算法	260
10.3.1 被动安检常见噪声类型	261
10.3.2 小波域安检图像噪声类型估计	262
10.3.3 应用于太赫兹安检成像的全变差去噪	265
10.4 太赫兹人体安检图像特征提取与图像分割	270
10.4.1 被动安检图像特征结构分析	270