

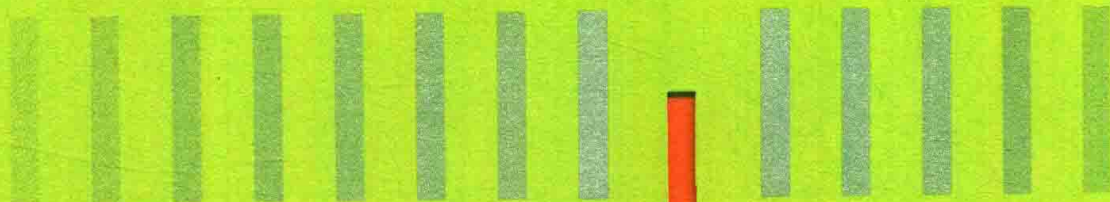
丛书总主编 曹俊诚

战略前沿新技术——太赫兹出版工程

# TERA HERTZ

Terahertz Radar and Communication Technology

10



## 太赫兹雷达与通信技术

张健 成彬彬 邓贤进 林长星 江舸 / 著

 华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

Terahertz Radar and Communication Technology

# 太赫兹雷达与通信技术

张健 成彬彬 邓贤进 林长星 江舸 / 著

10

战略前沿新技术  
——太赫兹出版工程  
丛书总主编 / 曹俊诚



上海出版资金项目  
Shanghai Publishing Funds

 华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

太赫兹雷达与通信技术 / 张健等著. —上海: 华东理工大学出版社, 2021. 9

战略前沿新技术: 太赫兹出版工程 / 曹俊诚总主编

ISBN 978-7-5628-6418-9

I. ①太… II. ①张… III. ①电磁辐射—雷达—通信技术 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 162266 号

## 内 容 提 要

自 21 世纪初以来,太赫兹雷达与通信技术成为继太赫兹光谱检测与成像技术之后的又一个重要应用领域,得到了世界各国的高度重视,并逐渐从实验室演示阶段走向了实际应用推广阶段。本书对国内外太赫兹雷达与通信领域的研究进展进行了归纳总结,较为全面地阐述了太赫兹雷达与通信的基本原理、关键技术、典型系统与应用场景。本书太赫兹雷达与通信的实现技术以电子学方法为主,同时也兼顾了电子学与光子学的交叉融合实现方法。

本书可供从事太赫兹雷达与通信相关研究与应用领域的本科生、研究生及相关研究人员阅读参考。

项目统筹 / 马夫娇 韩 婷

责任编辑 / 韩 婷

装帧设计 / 陈 楠

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: 021-64250306

网址: [www.ecustpress.cn](http://www.ecustpress.cn)

邮箱: [zongbianban@ecustpress.cn](mailto:zongbianban@ecustpress.cn)

印 刷 / 上海雅昌艺术印刷有限公司

开 本 / 710mm×1000mm 1/16

印 张 / 30.75

字 数 / 511 千字

版 次 / 2021 年 9 月第 1 版

印 次 / 2021 年 9 月第 1 次

定 价 / 368.00 元

版权所有 侵权必究

# 战略前沿新技术——太赫兹出版工程

丛书编委会

顾 问 雷啸霖 中国科学院院士

庄松林 中国工程院院士

姚建铨 中国科学院院士

总主编 曹俊诚 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,研究员

编 委 (按姓氏笔画排序)

马国宏 王与焜 邓贤进 石艺尉 史生才 冯志红 成彬彬

朱亦鸣 任 远 庄松林 江 舸 孙建东 李 婧 汪 力

张 文 张 健 陈 麟 范 飞 范文慧 林长星 金钻明

钟 凯 施 卫 姚建铨 秦 华 徐新龙 徐德刚 曹俊诚

常胜江 常 超 雷啸霖 谭智勇 缪 巍

太赫兹是频率在红外光与毫米波之间、尚有待全面深入研究与开发的电磁波段。沿用红外光和毫米波领域已有的技术,太赫兹频段电磁波的研究已获得较快发展。不过,现有的技术大多处于红外光或毫米波区域的末端,实现的过程相当困难。随着半导体、激光和能带工程的发展,人们开始寻找研究太赫兹频段电磁波的独特技术,掀起了太赫兹研究的热潮。美国、日本和欧洲等国家和地区已将太赫兹技术列为重点发展领域,资助了一系列重大研究计划。尽管如此,在太赫兹频段,仍然有许多瓶颈需要突破。

作为信息传输中的一种可用载波,太赫兹是未来超宽带无线通信应用的首选频段,其频带资源具有重要的战略意义。掌握太赫兹的关键核心技术,有利于我国抢占该频段的频带资源,形成自主可控的系统,并在未来6G和空-天-地-海一体化体系中发挥重要作用。此外,太赫兹成像的分辨率比毫米波更高,利用其良好的穿透性有望在安检成像和生物医学诊断等方面获得重大突破。总之,太赫兹频段的有效利用,将极大地促进我国信息技术、国防安全和人类健康等领域的发展。

目前,国内外对太赫兹频段的基础研究主要集中在高效辐射的产生、高灵敏度探测方法、功能性材料和器件等方面,应用研究则集中于安检成像、无线通信、生物效应、生物医学成像及光谱数据库建立等。总体说来,太赫兹技术是我国与世界发达国家差距相对较小的一个领域,某些方面我国还处于领先地位。因此,进一步发展太赫兹技术,掌握领先的关键核心技术具有重要的战略意义。


当前太赫兹产业发展还处于创新萌芽期向成熟期的过渡阶段,诸多技术正处于蓄势待发状态,需要国家和资本市场增加投入以加快其产业化进程,并在一些新兴战略性行业形成自主可控的核心技术、得到重要的系统应用。

“战略前沿新技术——太赫兹出版工程”是我国太赫兹领域第一套较为完整

的丛书。这套丛书内容丰富,涉及领域广泛。在理论研究层面,丛书包含太赫兹场与物质相互作用、自旋电子学、表面等离激元现象等基础研究以及太赫兹固态电子器件与电路、光导天线、二维电子气器件、微结构功能器件等核心器件研制;技术应用方面则包括太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术、光电测试技术、光纤技术、通信和成像以及天文探测等。丛书较全面地概括了我国在太赫兹领域的发展状况和最新研究成果。通过对这些内容的系统介绍,可以清晰地透视太赫兹领域研究与应用的全貌,把握太赫兹技术发展的来龙去脉,展望太赫兹领域未来的发展趋势。这套丛书的出版将为我国太赫兹领域的研究提供专业的发展视角与技术参考,提升我国在太赫兹领域的研究水平,进而推动太赫兹技术的发展与产业化。

我国在太赫兹领域的研究总体上仍处于发展中阶段。该领域的技术特性决定了其存在诸多的研究难点和发展瓶颈,在发展的过程中难免会遇到各种各样的困难,但只要我们以专业的态度和科学的精神去面对这些难点、突破这些瓶颈,就一定能将太赫兹技术的研究与应用推向新的高度。

中国科学院院士



2020年8月

太赫兹频段介于毫米波与红外光之间,频率覆盖  $0.1\sim 10$  THz,对应波长  $3\text{ mm}\sim 30\ \mu\text{m}$ 。长期以来,由于缺乏有效的太赫兹辐射源和探测手段,该频段被称为电磁波谱中的“太赫兹空隙”。早期人们对太赫兹辐射的研究主要集中在天文学和材料科学等。自 20 世纪 90 年代开始,随着半导体技术和能带工程的发展,人们对太赫兹频段的研究逐步深入。2004 年,美国将太赫兹技术评为“改变未来世界的十大技术”之一;2005 年,日本更是将太赫兹技术列为“国家支柱十大重点战略方向”之首。由此世界范围内掀起了对太赫兹科学与技术的研究热潮,展现出一片未来发展可期的宏伟图画。中国也较早地制定了太赫兹科学与技术的发展规划,并取得了长足的进步。同时,中国成功主办了国际红外毫米波-太赫兹会议(IRMMW-THz)、超快现象与太赫兹波国际研讨会(ISUPTW)等有重要影响力的国际会议。

太赫兹频段的研究融合了微波技术和光学技术,在公共安全、人类健康和信息技术等诸多领域有重要的应用前景。从时域光谱技术应用于航天飞机泡沫检测到太赫兹通信应用于多路高清实时视频的传输,太赫兹频段在众多非常成熟的技术应用面前不甘示弱。不过,随着研究的不断深入以及应用领域要求的不断提高,研究者发现,太赫兹频段还存在很多难点和瓶颈等待着后来者逐步去突破,尤其是在高效太赫兹辐射源和高灵敏度常温太赫兹探测手段等方面。

当前太赫兹频段的产业发展还处于初期阶段,诸多产业技术还需要不断革新和完善,尤其是在系统应用的核心器件方面,还需要进一步发展,以形成自主可控的关键技术。

这套丛书涉及的内容丰富、全面,覆盖的技术领域广泛,主要内容包括太赫兹半导体物理、固态电子器件与电路、太赫兹核心器件的研制、太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术以及光电测试技术等。丛书从理论计算、器件研制、系

统研发到实际应用等多方面、全方位地介绍了我国太赫兹领域的研究状况和最新成果,清晰地展现了太赫兹技术和系统应用的全景,并预测了太赫兹技术未来的发展趋势。总之,这套丛书的出版将为我国太赫兹领域的科研工作者和工程技术人员等从专业的技术视角提供知识参考,并推动我国太赫兹领域的蓬勃发展。

太赫兹领域的发展还有很多难点和瓶颈有待突破和解决,希望该领域的研究者们能继续发扬一鼓作气、精益求精的精神,在太赫兹领域展现我国科研工作者的良好风采,通过解决这些难点和瓶颈,实现我国太赫兹技术的跨越式发展。

中国工程院院士



2020年8月

太赫兹领域的发展经历了多个阶段,从最初为人们所知到现在部分技术服务于国民经济和国家战略,逐渐显现出其前沿性和战略性。作为电磁波谱中最后有待深入研究和发展的电磁波段,太赫兹技术给予了人们极大的愿景和期望。作为信息技术中的一种可用载波,太赫兹频段是未来超宽带无线通信应用的首选频段,是世界各国都在抢占的频带资源。未来6G、空-天-地-海一体化应用、公共安全等重要领域,都将在很大程度上朝着太赫兹频段方向发展。该频段电磁波的有效利用,将极大地促进我国信息技术和国防安全等领域的发展。

与国际上太赫兹技术发展相比,我国在太赫兹领域的研究起步略晚。自2005年香山科学会议探讨太赫兹技术发展之后,我国的太赫兹科学与技术研究如火如荼,获得了国家、部委和地方政府的大力支持。当前我国的太赫兹基础研究主要集中在太赫兹物理、高性能辐射源、高灵敏探测手段及性能优异的功能器件等领域,应用研究则主要包括太赫兹安检成像、物质的太赫兹“指纹谱”分析、无线通信、生物医学诊断及天文学应用等。近几年,我国在太赫兹辐射与物质相互作用研究、大功率太赫兹激光源、高灵敏探测器、超宽带太赫兹无线通信技术、安检成像应用以及近场光学显微成像技术等方面取得了重要进展,部分技术已达到国际先进水平。

这套太赫兹战略前沿新技术丛书及时响应国家在信息技术领域的中长期规划,从基础理论、关键器件设计与制备、器件模块开发、系统集成与应用等方面,全方位系统地总结了我国在太赫兹源、探测器、功能器件、通信技术、成像技术等领域的研究进展和最新成果,给出了上述领域未来的发展前景和技术发展趋势,将为解决太赫兹领域面临的新问题和新技术提供参考依据,并将对太赫兹技术的产业发展提供有价值的参考。

本人很荣幸应邀主编这套我国太赫兹领域分量极大的战略前沿新技术丛书。丛书的出版离不开各位作者和出版社的辛勤劳动与付出,他们用实际行动表达了对太赫兹领域的热爱和对太赫兹产业蓬勃发展的追求。特别要说的是,三位丛书顾问在丛书架构、设计、编撰和出版等环节中给予了悉心指导和大力支持。

这套丛书的作者团队长期在太赫兹领域教学和科研第一线,他们身体力行、不断探索,将太赫兹领域的概念、理论和技术广泛传播于国内外主流期刊和媒体上;他们对在太赫兹领域遇到的难题和瓶颈大胆假设,提出可行的方案,并逐步实践和突破;他们以太赫兹技术应用为主线,在太赫兹领域默默耕耘、奋力摸索前行,提出了各种颇具新意的发展建议,有效促进了我国太赫兹领域的健康发展。感谢我们的丛书编委,一支非常有责任心且专业的太赫兹研究队伍。

丛书共分 14 册,包括太赫兹场与物质相互作用、自旋电子学、表面等离激元现象等基础研究,太赫兹固态电子器件与电路、光导天线、二维电子气器件、微结构功能器件等核心器件研制,以及太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术、光电测试技术、光纤技术及其在通信和成像领域的应用研究等。丛书从理论、器件、技术以及应用等四个方面,系统梳理和概括了太赫兹领域主流技术的发展状况和最新科研成果。通过这套丛书的编撰,我们希望能太赫兹领域的科研人员提供一套完整的专业技术知识体系,促进太赫兹理论与实践的长足发展,为太赫兹领域的理论研究、技术突破及教学培训等提供参考资料,为进一步解决该领域的理论难点和技术瓶颈提供帮助。

中国太赫兹领域的研究仍然需要后来者加倍努力,围绕国家科技强国的战略,从“需求牵引”和“技术推动”两个方面推动太赫兹领域的创新发展。这套丛书的出版必将对我国太赫兹领域的基础和应用研究产生积极推动作用。



2020 年 8 月于上海

自 21 世纪初以来,随着太赫兹物理特性研究的深入以及太赫兹器件技术的突破,太赫兹逐渐从学术研究走向了应用研究,太赫兹雷达与通信技术成为继太赫兹光谱检测与成像之后的又一个重要应用领域,得到了世界各国的高度重视,并逐渐从实验室演示阶段走向了实际应用推广阶段。

太赫兹频段的雷达和通信,需要吸取微波雷达与通信、激光雷达与通信的各自所长,同时也要避免其各自的劣势,达到扬长避短;同时由于太赫兹是电子学与光子学的交叉领域,太赫兹雷达与通信的实现也充分体现了电子学与光子学交叉融合的特点。

本书对国内外太赫兹雷达与通信领域的研究进展进行了归纳总结,较为全面地阐述了太赫兹雷达与通信的基本原理、关键技术、典型系统与应用场景。全书共分 8 章。第 1 章是概述;第 2~4 章分别介绍了太赫兹雷达原理与系统设计,太赫兹雷达成像、层析成像、全息成像机理与成像技术,典型太赫兹雷达系统;第 5 章、第 6 章分别介绍了太赫兹通信原理与系统设计,典型太赫兹通信系统;第 7 章介绍了太赫兹雷达与通信系统中的信道技术;第 8 章是发展展望。书中也介绍了作者所在团队近十年左右在太赫兹雷达与通信领域的研究工作,比如 0.14 THz、0.34 THz、0.67 THz 的太赫兹 ISAR 成像、雷达层析成像、雷达全息成像、稀疏 MIMO 雷达成像技术研究,0.14 THz、0.34 THz 的 16-QAM 高阶调制体制太赫兹高速通信技术研究,基于太赫兹肖特基二极管倍频器/混频器、共振隧穿二极管振荡器、集成电路与集成微系统的太赫兹雷达与通信信道技术研究等。

本书由张健、成彬彬负责策划。第1章及第8章由张健、成彬彬、邓贤进负责编写,第2~4章由成彬彬、江舸、喻洋、安健飞负责编写,第5章及第6章由林长星、吴秋宇负责编写,第7章由邓贤进、蒋均负责编写。谭为、苏娟、程序、韩江安、曾建平、唐杨、黄昆、何月、郝鑫、尹格、周人、吴强等参与了部分章节内容的编写。

太赫兹雷达与通信涉及的学科专业和研究面较广,本书只能是对目前太赫兹雷达与通信技术发展的一个初步介绍。由于太赫兹雷达与通信技术仍然处于发展过程之中,有些问题不同学者有不同看法,加上作者水平有限,书中不妥和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2020年6月

# Contents

目  
录

<b>1</b>	<b>概述</b>	001
	1.1 太赫兹雷达技术发展简介	005
	1.2 太赫兹通信技术发展简介	007
	参考文献	009
<b>2</b>	<b>太赫兹雷达原理与系统</b>	011
	2.1 太赫兹雷达探测原理与目标特性	013
	2.1.1 太赫兹雷达探测原理	013
	2.1.2 太赫兹雷达目标特性	018
	2.2 太赫兹雷达系统结构与参数论证	032
	2.2.1 太赫兹雷达系统结构	032
	2.2.2 太赫兹雷达系统参数论证	038
	2.3 太赫兹雷达信号处理	042
	2.3.1 太赫兹宽带信号产生与处理	042
	2.3.2 太赫兹雷达杂波特性建模	044
	2.3.3 太赫兹雷达目标检测方法	049
	参考文献	066
<b>3</b>	<b>太赫兹雷达成像机理与技术</b>	069
	3.1 太赫兹雷达成像机理	071
	3.1.1 电磁逆散射问题	073
	3.1.2 基于近似计算方法的成像问题求解	077
	3.1.3 三种成像方法的性能分析及比较	086
	3.2 太赫兹雷达转台成像	098
	3.2.1 雷达转台成像原理	098
	3.2.2 0.14 THz ISAR 成像系统	108
	3.3 太赫兹多普勒雷达层析成像	112
	3.3.1 层析成像原理	112

3.3.2	基于层析的雷达成像方法	118
3.3.3	0.67 THz 多普勒雷达层析成像实验	124
3.4	太赫兹雷达全息成像	132
3.4.1	全息雷达成像原理	132
3.4.2	基于距离多普勒的全息雷达成像算法	139
3.4.3	时域、波数域、距离多普勒域算法的比较	146
	参考文献	152
<b>4</b>	<b>典型的太赫兹雷达系统</b>	<b>155</b>
4.1	太赫兹 FMCW 测距测速雷达	157
4.1.1	基本原理	157
4.1.2	应用场景	160
4.1.3	典型系统	161
4.2	太赫兹 SAR 成像雷达	164
4.2.1	基本原理	164
4.2.2	典型系统	164
4.3	太赫兹逐点扫描成像雷达	168
4.3.1	基本原理	168
4.3.2	应用场景	171
4.3.3	典型系统	171
4.4	太赫兹线阵扫描成像雷达	183
4.4.1	基本原理	184
4.4.2	应用场景	188
4.4.3	典型系统	190
4.5	太赫兹面阵成像雷达	195
4.5.1	基本原理	195
4.5.2	应用场景	198
4.5.3	典型系统	199
4.6	其他新体制太赫兹雷达	204
4.6.1	极窄脉冲太赫兹雷达	204

4.6.2 孔径编码太赫兹雷达	207
参考文献	208

## 5 太赫兹通信原理与系统 211

5.1 太赫兹通信的应用需求及优势	213
5.1.1 太赫兹通信的应用需求	213
5.1.2 太赫兹通信的优势分析	215
5.2 太赫兹通信原理	219
5.2.1 数字通信基本概念	219
5.2.2 太赫兹通信基本考虑	226
5.3 太赫兹通信系统的组成与设计	228
5.3.1 太赫兹通信系统组成	228
5.3.2 太赫兹通信系统总体设计	230
5.3.3 太赫兹通信系统的数字部分设计	237
5.3.4 太赫兹通信系统的模拟部分设计	238
5.4 太赫兹通信信道特性与链路分析	243
5.4.1 太赫兹通信信道特性	243
5.4.2 太赫兹通信链路分析	255
5.5 太赫兹通信信号处理	258
5.5.1 高速基带信号调制技术	258
5.5.2 高速基带信号解调技术	271
5.5.3 高速编译码技术	292
5.6 太赫兹通信系统集成与测试	302
5.6.1 太赫兹通信系统集成	302
5.6.2 太赫兹通信系统性能测试	306
参考文献	311

## 6 典型的太赫兹通信系统 313

6.1 全电子学 OOK 类太赫兹通信系统	315
-----------------------	-----

6.1.1	基本原理	315
6.1.2	应用场景	322
6.1.3	典型系统	322
6.2	全电子学高阶调制类太赫兹通信系统	331
6.2.1	基本原理	331
6.2.2	应用场景	337
6.2.3	典型系统	338
6.3	光电结合OOK类太赫兹通信系统	343
6.3.1	基本原理	343
6.3.2	应用场景	347
6.3.3	典型系统	348
6.4	光电结合高阶调制类太赫兹通信系统	353
6.4.1	基本原理	353
6.4.2	应用场景	354
6.4.3	典型系统	354
6.5	小结	364
	参考文献	366
<b>7</b>	<b>太赫兹雷达与通信中的信道技术</b>	<b>369</b>
7.1	太赫兹雷达与通信射频信道概述	371
7.2	太赫兹倍频与混频技术	376
7.2.1	太赫兹肖特基二极管技术	376
7.2.2	基于肖特基二极管的太赫兹倍频技术	382
7.2.3	基于肖特基二极管的太赫兹混频相干检测技术	400
7.3	太赫兹功率放大与低噪声放大技术	412
7.3.1	太赫兹晶体管技术	412
7.3.2	太赫兹功率放大技术	413
7.3.3	太赫兹功率合成技术	414
7.3.4	太赫兹低噪声放大技术	421
7.4	太赫兹振荡器技术	430