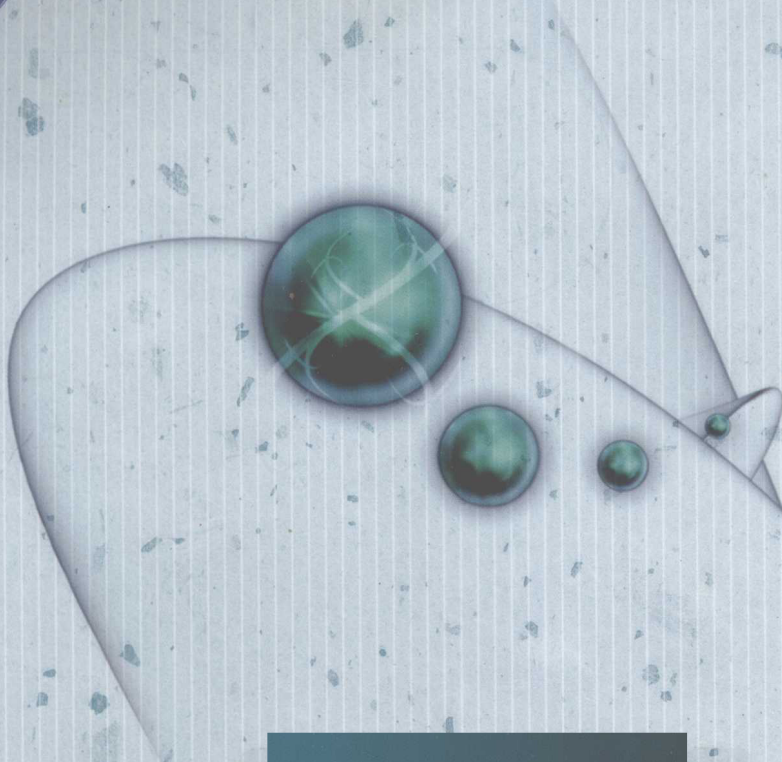




国防特色学术专著·兵器科学与技术



毫米波近感技术基础

HAOMIBO JINGANJISHU JICHU

李兴国 李跃华 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·兵器科学与技术

毫米波近感技术基础

李兴国 李跃华 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书突出作用距离为几十厘米至几千米的毫米波近程探测技术（简称毫米波近感技术）的特点，以全固态、小型和超小型、低成本的毫米波近感探测系统为主要介绍对象，系统介绍了毫米波近感技术基础、毫米波元部件、毫米波近程辐射计（毫米波被动探测系统）、毫米波近程被动成像系统、毫米波近程雷达（毫米波主动探测系统）、毫米波近程高分辨力雷达、毫米波主被动复合近程探测系统（毫米波雷达与辐射计复合探测系统）、亚毫米波近程探测系统概述及毫米波近程技术应用等。本书基本反映了作者及其领导的学术团队近 30 年的研究成果，也介绍了国内外近年来有关毫米波近感技术的应用及发展动态。

本书可作为高等学校无线电引信、探测与制导专业本科生、研究生的教学参考书，也可作为精确制导、灵巧弹药、近炸引信、电子对抗、自动控制、交通管制、安全检查、防盗反恐、医疗器械等领域从事探测系统研究的工程技术人员和大专院校师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

毫米波近感技术基础/李兴国, 李跃华编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 12

(国防特色学术专著. 兵器科学与技术)

ISBN 978-7-5640-2883-1

I. 毫… II. ①李…②李… III. 毫米波元件-应用-探测 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 183050 号

毫米波近感技术基础

李兴国 李跃华 编著

责任编辑 刘志实

*

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街 5 号 (100081) 发行部电话: 010-68944990 传真: 010-68944450

<http://www.bitpress.com.cn>

北京圣瑞伦印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 19 字数: 388 千字

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷 印数: 1~3000 册

ISBN 978-7-5640-2883-1 定价: 50.00 元

序

毫米波介于微波和红外之间，既兼具两者的特点又有区别于它们的独特之处，是整个电磁波频谱中十分重要的资源。但是，由于受到材料、元器件、工艺条件的限制，毫米波虽然早在一个多世纪前（1889年）就已提出，直到20世纪70年代才得到长足的发展和应用，并由此而备受国内外专家和学者的关注。

毫米波近感技术的主要研究内容是探测和识别几十厘米至几公里范围内的目标；在这样近的距离之内，大气对毫米波的影响可忽略，所需的毫米波发射功率较小，系统整机体积小，大部分近程系统的成本也都比较低。因此，毫米波近程探测系统广受欢迎，研究亦非常活跃。

李兴国教授及其领导的团队，从20世纪80年代初开始，就从事毫米波近程探测系统和相关技术的基础与应用的研究，至今已有近30年的历史，硕果累累、人才辈出。他们先后完成近50项部级科研项目，获得国家发明奖1项、省部级科技进步奖12项，国家发明专利7项，待批专利10余项，培养博士生及博士后30余名，硕士生90余名，在国内外刊物发表论文150余篇，并先后为本科生及研究生开出了“毫米波近感技术”、“毫米波固态探测系统”、“毫米波被动探测及成像”等课程。在长期的科研和教学实践中，他们积累了丰富的经验，形成了自己独特的风格和特色。该书就是他们长期工作的结晶。

我有幸拜读了原书的初稿，大有先睹为快的感觉，印象非常深刻。

本书的特点之一是，不但内容新颖、丰富、翔实，而且多取自作者及其团队近30年来一系列研究工作的成果，特色鲜明，书中主要的内容均植根于坚实的实验或工程实践。

本书的特点之二是，搜集了作者及其团队的许多发明、专利以及由之衍生的各种系统，这些成果或已大批量生产、或已付诸工程应用、或已经历了多年的实用化研究。例如，作者发明了毫米波弹载交流辐射计，书中关于目标的毫米波辐射特性建模及分析、毫米波辐射计设计及测试、被动毫米波成像等内容均是以该发明专利为基础获得的研究成果；书中介绍的毫米波主被动复合探测系统，是作者已获得的发明专利，已在工程中获得应用，由此派生出的多种毫米波主被动阵列探测系统，已经历了多年的实用化研究；作者发明了多种弹载近程毫米波雷达系统、收发组件和天线，由之组成的低成本、小型化、耐高过载的毫米波近程探测系统在我国已大批量生产，大大推动了我国国防现代化及毫米波技术产业化的进程，在本书中也有详细的介绍；凡此种种，使全书有极强的实用性。

本书的特点之三是，从毫米波近程探测系统的特殊要求出发，对于一些基础性的问题进行了深入的阐述。例如，提出了毫米波辐射截面积的概念，并探讨其测量方法；讨论了近程目标特性及相关的测量；专门介绍了毫米波在大气内的传播特性以及毫米波元部件；等等。这些内容为全书详细研究毫米波近感技术及其应用做了很好的铺垫、打下了良好的基础。

总之，本书是一本特色鲜明的著作。我相信，本书的出版对推动我国毫米波技术的研究和发展会有重要的作用。

吴培亨

中国科学院院士、南京大学教授
中国科学院信息技术科学部副主任
2009年7月

前 言

在整个电磁波频谱中, 介于微波和红外波之间的电磁波资源是国内外学者十分关注并致力研究开发的新频段。此频段包括工作波长从 $10 \sim 1 \text{ mm}$ (频率从 $30 \sim 300 \text{ GHz}$) 的毫米波; 工作波长从 $1 \sim 0.1 \text{ mm}$ (频率从 $300 \sim 3\,000 \text{ GHz}$) 的亚毫米波。近年来, 也有人将工作频率从 300 GHz (0.3 THz) $\sim 15\,000 \text{ GHz}$ (15 THz), 波长从 $1 \text{ mm} \sim 20 \mu\text{m}$ 波段称为太赫兹波。本书主要介绍毫米波波段的近程探测系统及相关技术, 对亚毫米波近程探测近期研究动向也作了简要介绍。

毫米波的研究早在 1889 年就已提出, 至今已经历了一个多世纪的漫长岁月。直至 20 世纪 70 年代之后, 随着毫米波材料、器件、工艺及相关技术的突破, 毫米波技术才有了长足的进步。由于毫米波近程探测距离一般为几十厘米到几公里, 大气对毫米波的影响可以忽略, 所需的毫米波发射功率较低, 整机体积小, 大部分近程系统成本低, 使得近程毫米波探测技术的发展尤为迅速和活跃, 也为本书的编写创造了良好的条件。

近程毫米波探测技术主要介绍作用距离为几十厘米至几公里的毫米波雷达、毫米波辐射计、毫米波雷达与辐射计复合探测系统、毫米波成像、毫米波近程探测系统的应用, 以及相关的毫米波目标辐射特性和散射特性、大气传输特性、大气和各种背景的吸收特性、毫米波元部件等。

本书在 20 世纪 80 年代末作者编著的《毫米波近感技术及其应用》的基础上, 除原有内容充实更新外, 新增了“毫米波近程被动成像系统”、“毫米波近程高分辨力雷达”、“毫米波主被动复合近程探测系统”和“亚毫米波近程探测系统概述”等章。本书是作者多年来为本科生和研究生开设的“毫米波近感技术”、“毫米波固态探测系统”、“毫米波被动探测及成像”等课程教学内容以及所指导研究生论文的概括和整理, 也是作者领导的科研团队近 30 年来大量科研实践的深化及提高。本书主要内容均为作者及其团队近年来取得的发明专利和科研成果, 比较全面地反映了国内外近年来毫米波近感技术研究的最新进展。

本书由李兴国教授编著第 1, 第 2, 第 3, 第 4, 第 5, 第 6, 第 8, 第 9, 第 10 章, 李跃华教授编写第 7 章, 并协助全书整理、校核; 娄国伟研究员协助编写第 2 章和第 8 章, 钱嵩松博士协助编写第 4 章、第 3.2、第 5.1、第 5.3 和第 5.4 节; 时翔博士协助编写第 1 章、第 2.3、第 2.4、第 2.5、第 2.6 节和第 10 章; 朱莉讲师协助编写第 2.1、第 2.2 节、第 6 章; 张光锋副教授协助编写第 3.1 节、第 3.3 $\sim$ 第 3.8 节和第 9.1、第 9.5 节; 龚冰博士生协助编写第 9.2、第 9.3 和第 9.4 节,

王本庆博士生协助编写第 5.2 节。本书还参考了唐义平博士、章勇博士、王华力博士、王一丁博士、李跃华博士、牟善祥博士、蒋金水博士、汪敏博士、刘静博士、李鸣博士、孙长贵博士、钱嵩松博士、时翔博士、胡体玲博士、杨国博士、王本庆博士生等的学位论文和相关文章，在此表示衷心感谢。

南京大学吴培亨院士审读了书稿，并欣然为本书作序；北京理工大学崔占忠教授对全书进行了认真、细致的审查；南京理工大学牟善祥研究员负责全书的保密审查。作者从他们提出的很多宝贵意见中得益良多，并据此对初稿进行了重要的改动，在此向他们表示衷心的感谢。同时，作者在此郑重声明，对于书中可能残留的问题或错误，由作者自己负全责。

毫米波技术发展迅速，特别是毫米波近程探测及相关技术发展更加活跃，还因很多内容涉及国内外保密范围，加之内容涉及面广，资料杂散，作者水平有限，时间仓促，错误与不妥之处一定难免，希望读者批评、指正。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 毫米波的特点	1
1.1.1 毫米波频段划分	1
1.1.2 毫米波的主要特点	2
1.2 毫米波近感技术概述	4
1.2.1 毫米波近感技术概述	4
1.2.2 毫米波近感系统分类	5
第 2 章 毫米波近感技术基础	7
2.1 大气对毫米波传播的影响	7
2.1.1 大气吸收及大气窗口	7
2.1.2 大气散射的影响	9
2.1.3 大气折射的影响	9
2.1.4 大气衰减	9
2.2 某些物质对毫米波的影响	10
2.2.1 基本参数	10
2.2.2 雨对毫米波的影响	12
2.2.3 雾对毫米波的影响	13
2.2.4 其他物质对毫米波的影响	16
2.3 物体的毫米波辐射特性	17
2.3.1 毫米波黑体辐射	17
2.3.2 毫米波功率—温度对应关系	19
2.3.3 毫米波表观温度	20
2.4 物体的毫米波辐射模型	21
2.4.1 辐射方程	21
2.4.2 辐射温度模式	22
2.4.3 反射率和发射率的关系	22
2.4.4 目标辐射探测原理	24
2.5 目标的毫米波辐射截面积	25
2.5.1 毫米波辐射计探测距离方程分析	26
2.5.2 目标毫米波辐射截面的建模	28
2.5.3 目标辐射截面积测试	31
2.6 目标的毫米波散射特性	34

2.6.1	目标雷达散射截面概念	34
2.6.2	目标近程毫米波散射特性	36
2.6.3	目标近程毫米波散射特性测试	38
第3章	毫米波元部件	42
3.1	概述	42
3.1.1	毫米波部件的现状和发展	42
3.1.2	毫米波部件的分类	42
3.2	毫米波天线	43
3.2.1	毫米波近感系统天线分类	43
3.2.2	毫米波天线参数	43
3.2.3	常用毫米波天线	44
3.3	毫米波固态功率元部件	47
3.3.1	雪崩二极管 (IMPATT)	47
3.3.2	耿氏二极管 (GUNN)	49
3.3.3	毫米波三端功率器件	52
3.4	毫米波固态接收机器件	53
3.4.1	肖特基混频和检波二极管	53
3.4.2	毫米波三端接收器件	54
3.4.3	毫米波超导器件	56
3.5	波导式毫米波部件	56
3.5.1	毫米波波导传输线及部件	56
3.5.2	毫米波波导式部件	57
3.6	毫米波平面集成电路和部件	59
3.6.1	毫米波平面集成电路和部件	59
3.6.2	鳍线的特性和工程设计	60
3.6.3	毫米波 E 平面电路和部件	64
3.7	毫米波介质波导和其他传输线	67
3.7.1	毫米波介质波导	67
3.7.2	微带线及部件	69
3.7.3	H 波导和 Groove 波导	72
3.8	毫米波单片集成电路	72
3.8.1	MMIC 专用传输线	72
3.8.2	MMIC 毫米波部件	73
第4章	毫米波近程辐射计	76
4.1	概述	76
4.1.1	天线温度	76

4.1.2 辐射计接收机的噪声温度	78
4.2 毫米波全功率辐射计原理及分类	81
4.2.1 全功率辐射计原理	81
4.2.2 全功率辐射计举例	83
4.3 其他类型的毫米波辐射计原理及分类	85
4.3.1 比较辐射计原理	85
4.3.2 噪声相加型辐射计	87
4.3.3 其他类型毫米波辐射计实例	88
4.4 扫描型辐射计天线温度计算	90
4.4.1 圆锥扫描	91
4.4.2 水平扫描	92
4.4.3 目标处于天线波束中心时的近似计算	94
4.5 毫米波辐射计的距离方程	96
4.6 毫米波辐射计的设计	98
4.6.1 辐射计体制的选择	99
4.6.2 天线的选择	99
4.6.3 中频放大器	99
4.6.4 视频放大器设计	101
4.6.5 直接检波式接收机	102
4.7 毫米波辐射计的测试	102
4.7.1 辐射计的主要技术指标	103
4.7.2 辐射计灵敏度的测定	103
4.7.3 绝对准确度的测定	104
4.7.4 相对准确度的测定	105
4.7.5 非线性误差的测定	106
4.7.6 积分时间的测定	107
4.7.7 测温动态范围的测定	107
4.7.8 测温非稳定度的测定	107
4.7.9 工作频率的允许误差的测定	107
第5章 毫米波近程被动成像系统	108
5.1 概述	108
5.1.1 毫米波被动成像的特点及发展	108
5.1.2 毫米波被动成像的基本要求	109
5.1.3 毫米波被动成像系统的分类	110
5.2 毫米波合成孔径成像	111
5.2.1 合成孔径成像原理	111
5.2.2 合成孔径系统实现	115

5.2.3 合成孔径成像系统举例	116
5.3 毫米波焦平面成像	117
5.3.1 毫米波焦平面成像原理	117
5.3.2 单波束机械扫描成像	117
5.3.3 毫米波焦平面成像系统指标分析	118
5.3.4 毫米波焦平面成像系统举例	121
5.4 毫米波相控阵被动成像	122
5.4.1 传统相控阵技术的困难	122
5.4.2 注锁扫描相控阵	122
第6章 毫米波近程雷达	126
6.1 概述	126
6.1.1 毫米波近程雷达的基本概念	126
6.1.2 毫米波近程雷达分类	130
6.1.3 雷达方程及性能指标	130
6.2 毫米波连续波多普勒雷达	132
6.2.1 毫米波自差式连续波雷达	133
6.2.2 毫米波外差式连续波雷达	134
6.2.3 毫米波多普勒雷达的主要性能分析	136
6.3 毫米波调频雷达的信号分析	139
6.3.1 差频信号的频域分析	139
6.3.2 差频信号的时域分析	148
6.3.3 调频雷达的参数选择	149
6.4 毫米波调频雷达	152
6.4.1 毫米波调频测距雷达原理	152
6.4.2 毫米波调频多普勒雷达原理	153
6.4.3 毫米波调频测角雷达原理	154
6.5 毫米波脉冲调制雷达	156
6.5.1 毫米波脉冲雷达的工作原理	156
6.5.2 毫米波脉冲多普勒雷达	159
6.5.3 毫米波脉冲调频雷达	161
6.5.4 毫米波脉冲测角雷达	161
6.6 其他体制的毫米波雷达	162
6.6.1 毫米波噪声调制雷达	162
6.6.2 毫米波伪码调制雷达	162
第7章 毫米波近程高分辨力雷达	164
7.1 高分辨力雷达的性能及分类	164

7.1.1	距离分辨率	164
7.1.2	速度分辨率	165
7.1.3	距离——速度分辨率	165
7.1.4	角分辨率	166
7.1.5	高分辨力雷达及其分类	166
7.2	高分辨力雷达的关键部件	166
7.2.1	宽带无源部件	166
7.2.2	快速频率合成器	167
7.2.3	毫米波脉冲注入锁定放大器	171
7.2.4	脉冲中频放大器	172
7.2.5	脉冲调制器的研究	175
7.2.6	毫米波上变频器	175
7.3	毫米波脉间频率步进高分辨雷达	180
7.3.1	毫米波脉间频率步进高分辨雷达原理	180
7.3.2	毫米波脉间频率步进高分辨雷达的波形设计	182
7.3.3	毫米波频率步进雷达的波形设计举例	184
7.3.4	毫米波脉间频率步进高分辨雷达的模糊函数	186
7.3.5	毫米波脉间频率步进高分辨雷达的信号处理方法	187
7.3.6	毫米波脉间频率步进高分辨雷达的速度补偿	191
7.4	毫米波脉内脉间频率调制复合雷达	193
7.4.1	脉内脉间频率复合调制雷达的波形分析	193
7.4.2	脉内脉间频率复合调制雷达的信号处理	199
第 8 章	毫米波主被动复合近程探测系统	202
8.1	概述	202
8.1.1	毫米波主被动复合探测原理	202
8.1.2	毫米波主被动复合探测系统的分类	203
8.2	主被动兼容部件的参数选择	203
8.2.1	射频兼容部件参数的选择	203
8.2.2	主被动复合系统中频放大器的参数选择	207
8.2.3	其他兼容部件的参数选择	208
8.3	主被动通道电磁兼容	208
8.3.1	系统内电磁干扰的分析	208
8.3.2	系统内电磁干扰的抑制	209
8.4	毫米波时分式主被动复合探测系统	211
8.4.1	先主动后被动时分探测系统	211
8.4.2	主被动兼容时分式探测系统	213
8.5	毫米波频分式主被动复合探测系统	215

8.5.1	射频频分式主被动复合探测系统	215
8.5.2	中频频分式主被动复合探测系统	218
8.5.3	视频频分式主被动复合探测系统	220
8.6	主被动复合阵列探测系统	221
8.6.1	主被动复合阵列探测的基本原理	221
8.6.2	毫米波主被动复合阵列探测设计原理	223
8.6.3	毫米波主被动复合阵列探测的实现	225
第9章	亚毫米波近程探测系统概述	228
9.1	概述	228
9.1.1	亚毫米波的基本特性	228
9.1.2	亚毫米波的应用及发展	230
9.2	亚毫米波的目标辐射特性	232
9.2.1	亚毫米波黑体辐射特性	232
9.2.2	实际物体的亚毫米波辐射	234
9.3	亚毫米波的穿透特性	237
9.3.1	亚毫米波波段透过材料的传输机理	237
9.3.2	亚毫米波波段带通材料	238
9.4	亚毫米波的大气传输特性	240
9.4.1	亚毫米波大气吸收特性	241
9.4.2	亚毫米波大气散射特性	243
9.4.3	亚毫米波雨衰减特性	243
9.5	亚毫米波成像应用	248
9.5.1	概述	248
9.5.2	亚毫米波被动成像原理	248
9.5.3	亚毫米波成像应用	251
第10章	毫米波近感技术应用	254
10.1	毫米波近炸引信	254
10.1.1	毫米波调频测距引信	254
10.1.2	毫米波高频比相引信	257
10.2	毫米波寻的引信	260
10.2.1	远射程毫米波末端敏感弹	261
10.2.2	直射式末端敏感弹	261
10.2.3	敏感弹寻的引信原理	262
10.3	毫米波技术在精确制导中的应用	265
10.3.1	毫米波技术在导弹制导系统中的应用	265
10.3.2	毫米波雷达导引头	266

10.3.3 毫米波制导雷达系统	266
10.3.4 毫米波制导辐射系统设计	269
10.4 毫米波被动成像的应用	272
10.4.1 毫米波被动成像在安全检查中的应用	272
10.4.2 毫米波被动成像在导航系统中的应用	273
10.4.3 毫米波被动成像在汽车防撞中的应用	274
10.4.4 毫米波被动成像在其他方面中的应用	275
10.5 毫米波辐射计在医学上的应用	277
10.5.1 人体的电磁辐射及辐射传递	277
10.5.2 生理热传递	278
10.5.3 温度分辨力和记录测量	278
10.5.4 温度记录的结果与讨论	279
10.6 毫米波雷达在交通管理中的应用	280
10.6.1 毫米波汽车测速雷达	280
10.6.2 毫米波汽车防碰雷达	282
10.6.3 直升机前方障碍物探测雷达	284
参考文献	286

第1章 绪 论

利用物体辐射毫米波或散射毫米波的特性，在几十厘米至几公里范围内探测、识别目标的技术，称为毫米波近感技术。

毫米波是指波长在 10~1 mm（频率在 30~300 GHz）之间的电磁波。与之相关联的还有亚毫米波（波长从 1~0.1 mm，频率从 300~3 THz）或太赫兹波（波长从 3~30 μm，频率从 0.1~10 THz），它们的频率介于微波与远红外之间，一直都是人们很有兴趣进行深入研究的领域。早在 1889 年就已有学者提出对毫米波的研究，在一个多世纪的漫长岁月中，尽管经历了曲折发展的过程，但毫米波所具有的魅力总是吸引着众多学者，从而积累了大量的基本知识和实用技术。

伴随着半导体器件及其他相应器件基本性能所取得的突破性进展，碰撞雪崩渡越时间二极管（IMPATT）、耿氏二极管（Gunn）、场效应管（FET）等固态功率器件，均能在较高的频率下输出较大的功率，毫米波低噪声混频器件、无源器件中的毫米波集成电路、镜像电路、鳍线传输线以及准光学技术的突破，使得固态发射机、毫米波接收机、低成本和超小型毫米波系统的实现成为可能。

特别是近十几年来，毫米波单片电路的发展引起了国内外学者的极大兴趣，相继研制成功毫米波单片放大器、单片混频器、单片振荡器、单片倍频器、单片收发机、单片移相等，展现出毫米波元器件性能提高的宽广领域。

近感技术是毫米波技术中最为活跃的领域之一，而毫米波固态器件及单片集成电路的突破，必将促进近程探测系统理论及应用研究的飞速发展与长足进步。

1.1 毫米波的特点

近年来，毫米波技术已经在通信、雷达、辐射测量、遥感、导弹制导、射电天文和光谱学等领域得到广泛的应用与发展。毫米波系统研究和应用的大力发展，一方面归因于毫米波固态器件等新技术的发展，以及探测器和通信系统的新的要求；另一方面也归因于毫米波系统区别于微波系统或光学系统的自身独特之处。

1.1.1 毫米波频段划分

图 1-1 示出了毫米波波谱在整个电磁频谱中的位置。表 1-1 给出了常用的毫米波频段的代码及其对应的频率范围。

表 1-1 毫米波频段的代码及其对应的频率范围

雷达频段符号	K 频段 18~26.5 GHz	Ka 频段 26.5~40 GHz	W 频段 75~110 GHz		
英国频段符号	K 频段 18~27 GHz	Q 频段 27~40 GHz	O 频段 40~70 GHz	V 频段 50~75 GHz	>75 GHz

续表

雷达频段符号	K 频段 18~26.5 GHz	Ka 频段 26.5~40 GHz	W 频段 75~110 GHz		
旧美国军标符号	K 频段 10.9~30 GHz	Q 频段 36~46 GHz	V 频段 46~56 GHz	W 频段 56~100 GHz	>100 GHz
新美国军标符号	K 频段 20~40 GHz	L 频段 48~60 GHz	M 频段 60~100 GHz	N 频段 100~200 GHz	O 频段 200~300 GHz
1979 年 (WARC) 规定的 标准符号	Ka 频段 26.5~40 GHz	U 频段 40~60 GHz	E 频段 60~90 GHz	W 频段 75~110 GHz	D 频段 110~170 GHz

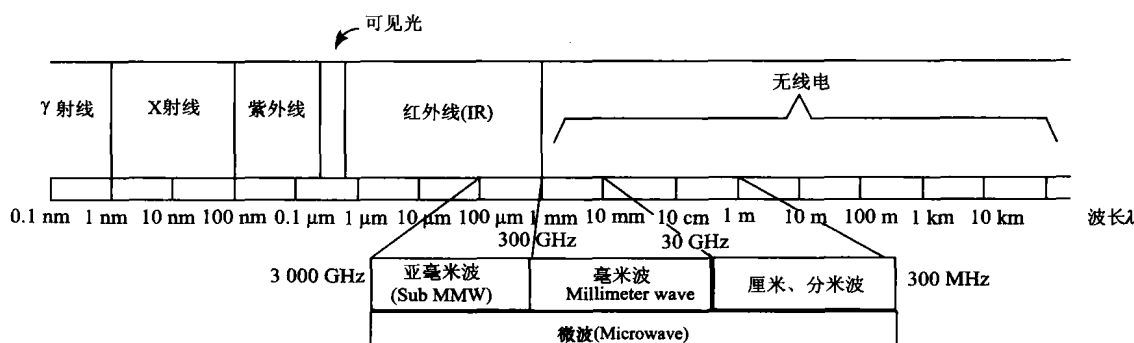


图 1-1 电磁波频谱图

1.1.2 毫米波的主要特点

与微波相比，毫米波有如下特点：

1. 精度高

近感装置的探测精度取决于对目标的空间分辨率，也就是取决于角度和距离分辨率。若近程雷达截面的角分辨率为 R_d ，则有

$$R_d = \theta R = K_h \frac{\lambda}{D} \quad (1-1)$$

式中 θ ——半功率点波束宽度；

R ——目标与雷达间的距离；

λ ——雷达的工作波长；

D ——天线的直径；

K_h ——决定于天线类型及加权函数的比例系数。

从式 (1-1) 可见，与厘米波相比，毫米波波长短，其系统的角分辨率比厘米波高。

由于多普勒频率的大小反比于工作波长，因此，在毫米波段多普勒灵敏度响应高，有利于对极低速目标的测量及跟踪。

2. 抗干扰能力强

在相同的天线口径下,毫米波系统的波束窄,抗干扰能力强。在相同的相对带宽下,毫米波系统频率高,绝对带宽大,在电子对抗中可迫使敌方干扰机功率分散,难以达到堵塞和干扰的目的。被动式毫米波系统不发射信号,敌人难侦察到,更难以开展电子对抗。

对于工作频率在大气窗口内的毫米波近程探测系统,由于雷达发射机的发射功率小,大气对毫米波的衰减大,敌方往往难以侦察;加之雷达接收机灵敏度低,要干扰该系统的工作,敌方必须发射很大的功率。特别当近感装置采用非大气窗口的工作频率时,尽管存在严重的大气衰减,对作用距离为几十厘米至几公里的近感装置的影响则可以忽略,但却迫使敌人大幅度地提高施放干扰的功率,因而近感装置具有较强的抗干扰能力。

3. 低仰角探测性能好

在一般微波系统中,当雷达探测仰角低于一个波束以下的目标时,天线的方向性对反射波失去抑制作用,产生严重的多路径效应,引起测角和测速的误差。

目前,实现低仰角跟踪的简便而有效的方法是,通过减窄波束宽度来减少投射到地面的电磁能。所以,毫米波段的波束窄和地物散射小可以减小多路径干扰和地物杂波。

4. 有穿透等离子体的能力

高速空间飞行体(导弹、炮弹)飞行时,由于弹体与周围气体冲击要产生气动加热,因而在弹体周围会形成等离子体,使弹载装置发射的无线电波产生严重的反射和衰减,造成信息中断。

试验表明,在流场温度为2500 K时,电子密度为 10^9 cm^{-3} ,相对等离子体频率为270 MHz;在3000 K时,等离子体频率为2700 MHz,对S波段以下的电磁传播产生很大影响。因此,对于弹载无线电装置,只要选择C波段以上的工作频率,系统受等离子体的影响大大减小。毫米波频率远远高于导弹或炮弹再入时产生的等离子体频率,其传输呈现十分微弱的衰减和反射,因此具有穿透等离子体的能力。

5. 体积小、质量轻

毫米波天线尺寸较小,元器件尺寸亦小。当用悬置微带线、镜像介质波导、介质波导、鳍线、微带等毫米波集成电路取代金属波导时,可使毫米波近感系统的体积更小、质量更轻。

特别是近几年飞速发展的毫米波单片电路,与一般微波集成电路比较,其性能和可靠性提高,体积和质量显著减小。毫米波近感装置可能实现全单片化的微型探测系统。

6. 受大气的衰减和雨的影响较大

毫米波系统的作用距离受大气传播特性的影响很大。影响系统作用距离的主要原因是毫米波在大气传输过程中,容易被水蒸气分子吸收,散射和雾天雨天时凝聚水滴的吸收及散射等。毫米波系统工作的频段,可选择工作频率为35 GHz、94 GHz、140 GHz、220 GHz四个吸收较小的大气窗口。由于近感装置工作距离近,可忽略大气衰减的影响,甚至也可工作于非大气窗口频率。例如,工作频率为35 GHz,晴天的大气衰减为0.3~0.4 dB/km,在每小时为16 mm的大雨时,雨的衰减为4 dB/km。可见,无论晴天和雨天,毫米波近程探测的衰减