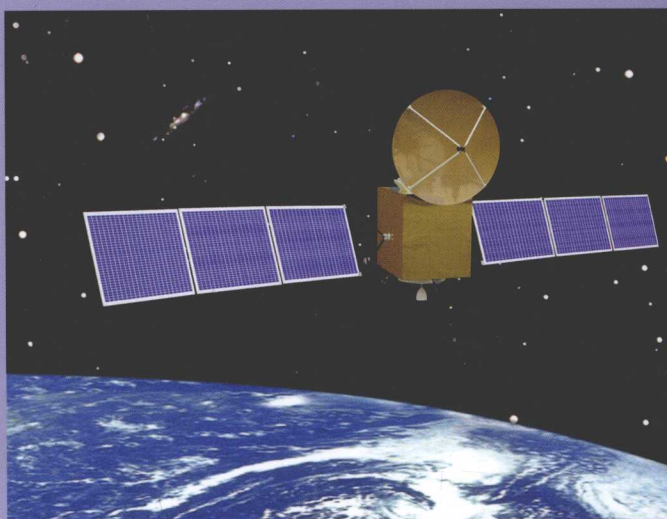


空间电子信息科学与技术系列



微波毫米波 功率合成技术

董士伟 王 颖
李 军 董亚洲 编著
朱忠博



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

空间电子信息科学与技术系列

微波毫米波功率合成技术

董士伟 王 颖 李 军 董亚洲 朱忠博 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是空间电子信息科学与技术系列之一。全书阐述微波毫米波功率合成的基础理论、技术内涵和实际应用,并结合空间系统的特定背景,重点讨论工程实践中的设计要点,给出典型的设计实例。全书共由8章构成,分为三个部分。第一部分主要论述微波毫米波技术的发展和应用、功率合成技术所涉及的一些基础理论;第二部分详细讨论目前应用较多的几类微波毫米波功率合成技术,包括空间功率合成技术、谐振型电路合成技术、非谐振型电路合成技术、准光功率合成技术等;第三部分介绍微波毫米波功率合成技术的应用,主要反映功率合成技术在各种微波毫米波系统中发挥的作用。

全书内容丰富,系统性和可读性强,具有较高的实际应用价值。本书可作为高等院校微波技术与电磁场理论、电路与系统等专业本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供从事空间微波毫米波有效载荷开发的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波毫米波功率合成技术 / 董士伟等编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2012

(空间电子信息科学与技术系列)

ISBN 978-7-313-08043-1

I. ①微… II. ①董… III. ①微波频率-功率合成
IV. ①TN73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 270471 号

微波毫米波功率合成技术

董士伟 等 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16 字数: 391 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-08043-1/TN 定价: 78.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 0512-52219025

空间电子信息科学与技术系列编辑委员会

主 任 史平彦

副 主 任 李 军 陈 豪

委 员

崔万照 黄普明 何兵哲 李正军 李 立 马伊民
宋燕平 王五兔 韦娟芳 张立新 周 詮 于洪喜
殷新社

前 言

功率放大器是微波技术领域的一项传统关键技术,目前仍然处于不断发展的过程中。从应用角度看,单一的功率放大器单元常常难以满足系统的要求,所以功率合成技术成为开发功率放大器的重要技术途径之一。在我国,尤其是在某些领域,一些基础功率元器件的使用受到极大限制,微波毫米波频段的功率合成技术的研究越发显得重要。到本书成稿之前,国内还没有一本综合讨论功率合成技术的著作,即使是在国外,最近的一部著作也是1997年出版的。我们感到有必要结合近年来的理论和工程研究进展,编写一本兼具学术和实用价值的书。在过去几年技术开发工作的基础上,经过通力合作,终于完成了本书。本书既可作为高等院校微波技术与电磁场理论、电路与系统等专业的本科生和研究生教材,也可供从事空间微波毫米波有效载荷技术研究的科研人员使用。

空间系统已经成为支持科技进步的重要环节,在信息的获取、传输等过程中,微波毫米波功率放大器都发挥着重要的作用。目前,从几瓦到几千瓦的发射功率都存在客观需求,其中相当一部分功率放大器需要采用功率合成技术进行开发。随着固态电子技术的发展,固态功率放大器将承担越来越多的任务,但其功率容量的限制决定了合成固态放大器技术将成为重要的技术分支,事实上,毫米波频段的合成固态放大器已经实现了空间应用。同时,在千瓦量级的应用中,行波管放大器的功率合成仍然是主要实现途径。目前,空间微波毫米波有效载荷保持着向更高频率、更高速率、更高功率发展的趋势,这些趋势对功率合成技术的发展都将产生积极的推动作用。

全书共由8章构成,分为三个部分。第一部分包括第1~2章,第二部分包括第3~7章,第三部分为第8章。各章的内容如下:

第1章简要阐述微波毫米波频谱及其特点,介绍典型的微波毫米波应用,重点讨论空间微波毫米波系统及其特点。

第2章介绍微波毫米波功率合成技术必需的理论和工程基础,包括电磁场理论、微波工程与天线理论、功率放大器技术等,并从总体上介绍功率合成技术。

第3章详细讨论空间功率合成技术,介绍空间功率合成放大器特性、结构,并从封闭空间和开放空间两种状况分别阐述放大器设计中的功率合成和发射机设计中的功率合成。

第4章重点讨论谐振型电路功率合成技术,围绕三种常用的功率合成器描述设计理论和方法、杂模抑制措施等,并对空间微波大功率系统的特殊现象——微放电问题进行专门阐述。

第5章重点讨论应用波导合成器的非谐振型电路功率合成技术,分别介绍 N 路直接合成、级联分支合成和行波合成三种主要技术分支,并针对空间系统热管理的限制专门阐述热设计问题。

第6章重点阐述应用平面传输线合成器的非谐振型电路功率合成技术,既包括传统的微带功率合成电路,也包括近年来研究较多的基片集成波导功率合成电路,这种平面功率合成结

构是合成固态放大器的基本方法。

第7章针对一类特殊的空间功率合成——准光功率合成技术进行阐述,首先介绍准光传播理论,然后分别讨论空间功率合成和二维空间功率合成的相关技术和系统。

第8章介绍微波毫米波功率合成技术在各种系统中的应用,包括通信、雷达、有源集成天线、波束控制阵列、振荡器等,这些应用分别采用了前文涉及的各种功率合成技术。

本书的编写分工如下:第1章董士伟、李军,第2章董士伟、王颖,第3章董士伟、王颖、李军,第4章董亚洲、朱忠博、胡天存、袁建荣,第5章董亚洲、袁建荣,第6章王颖、董士伟,第7章朱忠博、董士伟,第8章王颖、董士伟、朱忠博。本书编写过程中,车文荃、尚社、王新波等提供了重要的参考资料,于洪喜、陈豪、李胜先、汪蕾、崔福利、陈先等与编者进行了有益的探讨,在此深表谢意。

空间电子信息科学与技术系列是中国空间技术研究院西安分院针对研究生培养和科研人员教育计划而组织编写的。本书为空间电子信息科学与技术系列之一,在编写过程中参阅了大量中外资料和经典著作,均已列入各章之后的参考文献中,在此谨向这些文献的作者表示深切的感谢。

本书有不妥之处,敬请广大读者予以批评指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁波频谱	1
1.1.1 电磁波频谱的划分	1
1.1.2 微波毫米波的特点	3
1.2 微波毫米波应用	3
1.2.1 雷达与导航	3
1.2.2 通信	4
1.2.3 探测	5
1.2.4 电子对抗	6
1.3 空间微波毫米波系统	6
1.3.1 通信卫星	6
1.3.2 遥感卫星	8
1.3.3 导航卫星	9
1.3.4 科学与技术试验卫星	10
1.3.5 其他航天器	10
参考文献	10
第 2 章 微波理论和工程基础	12
2.1 电磁场理论	12
2.1.1 麦克斯韦方程	12
2.1.2 波动方程及其边界条件	13
2.1.3 电磁波的传播理论	13
2.2 微波工程与天线理论	16
2.2.1 传输线理论	16
2.2.2 微波网络理论	21
2.2.3 天线理论	22
2.3 功率放大器技术	25
2.3.1 功率器件基础	25
2.3.2 功率放大器关键特性	28
2.3.3 固态功率放大器	33
2.3.4 行波管放大器	35

2.4 功率合成技术	36
2.4.1 功率合成技术发展需求	36
2.4.2 功率合成的技术途径	36
参考文献	42
第3章 空间功率合成放大器	44
3.1 功率分配与合成形式	44
3.2 空间功率合成放大器特性	46
3.2.1 损耗	46
3.2.2 效率	48
3.2.3 噪声	50
3.2.4 增益	51
3.2.5 完美降级	52
3.3 空间功率合成放大器方案	53
3.3.1 系统构架	53
3.3.2 阵列结构	54
3.3.3 功率分配方式	55
3.3.4 天线形式	56
3.3.5 实现方式	56
3.3.6 小结	57
3.4 波导内空间功率合成放大器	58
3.4.1 波导内空间功率合成器结构	58
3.4.2 Tray 型空间功率合成放大器	59
3.4.3 Tile 型空间功率合成放大器	64
3.4.4 复合式功率合成放大器	67
3.4.5 热设计	72
3.4.6 电装工艺	77
3.5 开放空间功率合成放大器	78
3.5.1 开放空间功率合成放大器实现方法	78
3.5.2 分析模型	80
3.5.3 设计要点	82
参考文献	86
第4章 谐振型电路功率合成	89
4.1 矩形波导腔功率合成	89
4.1.1 基本模型及电路分析	89
4.1.2 梯形网络功率合成放大器设计	92

4.1.3 其他形式的矩形波导腔功率合成器分析	95
4.2 圆柱波导腔功率合成	99
4.2.1 基本模型及分析	100
4.2.2 杂模抑制方法	102
4.2.3 功率合成器设计	103
4.3 同轴波导腔功率合成	106
4.3.1 电路原理分析	106
4.3.2 功率合成器仿真设计	106
4.3.3 微放电问题	109
参考文献	113
第5章 波导非谐振型电路功率合成	115
5.1 概述	115
5.2 N 路功率直接合成	116
5.2.1 径向波导功率合成器	117
5.2.2 圆锥波导功率合成器	122
5.3 二进制级联功率合成	125
5.3.1 结构形式及电路分析	125
5.3.2 空间环境适应性设计	129
5.3.3 设计实例	132
5.4 行波功率合成	138
5.4.1 结构形式及电路分析	139
5.4.2 设计方法	140
5.4.3 设计实例	143
参考文献	145
第6章 平面电路功率合成	147
6.1 二进制级联平面功率合成	148
6.1.1 电路结构	148
6.1.2 设计方法	149
6.1.3 设计实例	152
6.2 N 路平面功率合成	154
6.2.1 N 路 Wilkinson 平面合成	155
6.2.2 新型 N 路平面合成	156
6.2.3 Bagley 多边形平面合成	160
6.3 多层次平面功率合成	163
6.3.1 电路结构	163

6.3.2	设计方法	163
6.4	平面功率合成结构热分析	168
6.4.1	SIW 导体损耗和介质损耗的计算分析	168
6.4.2	SIW 结构的平均功率容量和峰值功率容量	170
6.4.3	小结	173
	参考文献	174
第7章	准光功率合成	177
7.1	简介	177
7.2	准光传播理论	179
7.2.1	准光基本概念	179
7.2.2	高斯波束转换理论	181
7.2.3	高斯波束展开	183
7.3	准光空间功率合成	183
7.3.1	准光空间功率合成放大器设计	185
7.3.2	设计实例	188
7.4	二维准光功率合成	190
7.4.1	平面准光导波理论	190
7.4.2	二维准光功率合成放大器	191
7.5	偏振式准光功率合成	194
7.5.1	偏振式准光功率合成原理	194
7.5.2	偏振式准光功率合成设计	195
	参考文献	198
第8章	微波毫米波功率合成应用	200
8.1	有源集成天线	200
8.1.1	有源集成天线简介	200
8.1.2	有源集成天线设计与开发要点	201
8.1.3	分析方法	203
8.1.4	应用实例	205
8.2	发射机	208
8.2.1	系统设计中的关键指标	208
8.2.2	应用实例	209
8.3	波束控制阵列	213
8.3.1	波束控制系统	213
8.3.2	波束控制基本原理	215
8.3.3	波束控制阵列受限因素	219

8.3.4 应用实例	220
8.4 功率合成振荡器与变频器阵列	222
8.4.1 功率合成振荡器	222
8.4.2 功率合成变频器	227
参考文献	234
附录	238

第 1 章 绪 论

电磁波不仅为人类打开了一扇认识世界的窗口,而且为人类提供了一种开发宇宙的工具。在法拉第(M. Faraday)、麦克斯韦(J. C. Maxwell)、马可尼(G. Marconi)等电磁学领域先驱的指引下,电磁波频谱不断被拓展和利用,各具特点的不同频谱闪耀着璀璨的光芒。

微波毫米波是电磁波频谱中的重要部分,微波毫米波技术与工程的发展为人类进入信息社会阶段之后的进步发挥了巨大的作用,也必将成为人类科学技术史的重要篇章。今天,当我们享受移动通信、无线局域网、GPS 卫星导航带来的便捷时,享受防撞雷达、射频识别带来的安全时,享受射电望远镜、遥感观测卫星带来的新知时,都会发现微波毫米波技术真是无处不在。

空间微波毫米波系统是微波毫米波技术的一种重要应用,它充分利用空间飞行平台的优势,在通信、遥感、导航和科学探测等领域都得到飞速的发展。当今,多种类型的空间飞行器在轨运行,空间微波毫米波系统发挥着举足轻重的作用,电视直播、天气预报、全球定位等应用已经与人类的各种活动息息相关。

1.1 电磁波频谱

1.1.1 电磁波频谱的划分

简谐电磁波的排列形成了电磁波频谱,其中重要的一段如图 1.1 所示。电磁波可以用频率 f 描述,也可以用波长 λ 描述,两者的关系是:

$$f \cdot \lambda = c \quad (1.1)$$

式中, c 为自由空间的光速。

在电磁波频谱中,无线电技术领域的学者和工程师最多涉及的是射频和微波频段,即 300 kHz~300 GHz 这一段;而空间通信、遥感、导航等系统主要涉及的是微波频段,包括了特高频、超高频和极高频,即 300 MHz~300 GHz 这一段。从图 1.1 可见,毫米波频段(也即极高频)实际上位于微波频段的高端,只是因为考察到较小的频率范围时毫米波表现出一些特点,因此有时将微波和毫米波并称,本书就采用这种用法。

在相关技术的具体研究过程中,可以将微波毫米波频谱进一步细分,如表 1.1 所列^[1]。这种划分方法是雷达工程界最早提出的,如今已广为微波毫米波技术领域所采用。当然,有一些国家或组织也采用不同的划分方式。

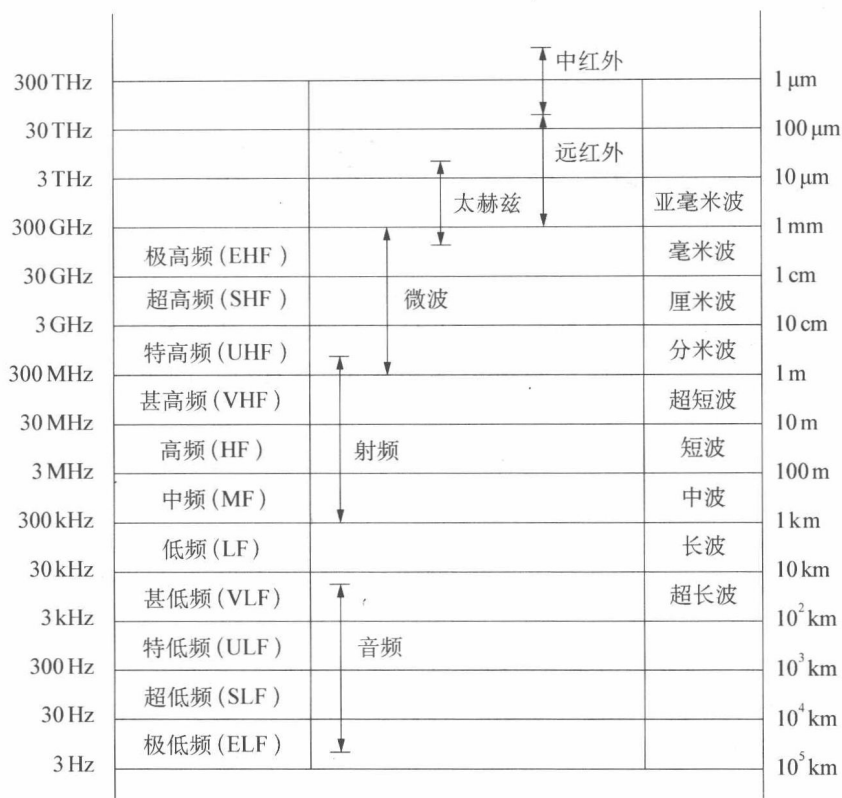


图 1.1 电磁波频谱

表 1.1 微波毫米波频谱划分

频段代号	频率范围/GHz	波长范围/mm
L	1.0~2.0	150.0~300.0
S	2.0~4.0	75.0~150.0
C	4.0~8.0	37.5~75.0
X	8.0~12.5	24.0~37.5
Ku	12.5~18.0	16.7~24.0
K	18.0~26.5	11.3~16.7
Ka	26.5~40.0	7.5~11.3
U	40.0~60.0	5.0~7.5
V	50.0~75.0	4.0~6.0
E	60.0~90.0	3.33~5.0
W	75.0~110.0	2.73~4.0
F	90.0~140.0	2.14~3.33

1.1.2 微波毫米波的特点

无线电技术的研究和应用的一个重要趋势就是向更高频率发展,微波毫米波是继中波、短波、超短波之后的发展阶段。与低频电磁波相比,微波毫米波具有如下特点。

(1) 微波毫米波频带宽。微波频段从 300 MHz 覆盖到 300 GHz,是整个超短波频带的 1000 倍,可以满足大容量通信、高速数据传输等业务的需求。排除大气吸收峰的影响,微波毫米波频段仍能提供足够的带宽,这对跳频、扩频等抗干扰通信意义重大。

(2) 微波毫米波波长短。设备或系统的大小与波长有密切的关系,波长越短越有利于实现设备或系统的小型化和轻量化。以矩形波导为例,用于 K 频段的 BJ180 波导截面尺寸为 $12.954\text{ mm} \times 6.477\text{ mm}$,铜波导每米重量约为 390 g;而用于 60 GHz 频段的 BJ620 波导截面尺寸为 $3.759\text{ mm} \times 1.880\text{ mm}$,铜波导每米重量约为 140 g。后者的截面积为前者的 8.4%,重量是前者的 35.9%。同时,微波毫米波波长比一般物体尺寸更小,具有直线传播特性,有利于无线电定位和回波探测。

(3) 微波毫米波能穿透地球电离层。地球电离层对低频电磁波有吸收和折射作用,但对微波毫米波的作用可以忽略不计,这一特点使微波毫米波成为地球电磁波频谱的宇宙窗口,通信卫星、导航卫星等空间系统也强烈地依赖这一特点。

(4) 微波毫米波要采用特有的研究方法。低频无线电技术一般采用克希霍夫定律等电路理论进行研究,微波毫米波技术则采用麦克斯韦电磁场理论或微波网络理论进行研究,研究方法区别较大,相对独立。

此外,微波毫米波在与物质的相互作用、测试测量等方面也有鲜明的特点,此处不再赘述。毫米波相对于其他的微波频段来说,频率更高、波长更短、电离层透射更强,最为突出的特点是受大气及其水含量的影响十分显著。毫米波通过大气层传播时的衰减主要由水蒸气和氧的吸收引起,水分子和氧分子分别具有电偶极矩和磁偶极矩,与毫米波相互作用而产生谐振,在某些频率上产生能量吸收峰。研究表明,毫米波频段的大气吸收峰出现在 22 GHz、60 GHz、119 GHz、183 GHz 等处,与之对应形成了衰减较小的大气窗口,中心频率分别在 35 GHz、94 GHz、140 GHz、220 GHz 左右^[2]。

1.2 微波毫米波应用

1873 年,麦克斯韦建立了现代电磁理论^[3],O. Heaviside 在传输线方面的探索则将电磁理论引向微波毫米波工程^[4],微波毫米波应用的大幕就此拉开。第二次世界大战期间,雷达技术的发展将微波毫米波技术应用推向一个高潮,先后研制了 S 频段、X 频段和 K 频段雷达,微波通信系统也随即发展起来。在此后 70 年中,雷达和通信一直是微波毫米波应用的主要领域,除此之外,在导航、探测、电子对抗等领域微波毫米波也都得到了应用。

1.2.1 雷达与导航

雷达领域是微波毫米波技术发源地。雷达系统通过向目标发射无线电脉冲信号,并测量回波特性来确定目标的位置、速度等参数。因为目标尺寸与波长相比越大回波就越强,而且天线口径与波长相比越大测量精度就越高,所以雷达系统大多工作在微波毫米波频段。

二次世界大战以后,雷达技术仍然延续着高速发展势头,合成孔径雷达、电扫相控阵天线、数字信号处理、固态发射机等新技术不断进步,雷达技术也向着远距离、高精度、高分辨率、多功能、小型化等方向发展。20 世纪 90 年代以来的趋势是:机载、星载的雷达系统发展迅速,美国的“长曲棍球”卫星上的 L/X 频段合成孔径雷达在一些局部战争中发挥了重要作用;多功能相控阵雷达成为重要发展方向,如美国的 F-22 隐身战斗机上装载了 X 频段多功能相控阵火控雷达;毫米波宽带雷达得到发展,典型应用系统是美国的 Ka 频段单脉冲靶场测量雷达^[5]。

开发雷达系统涉及的关键技术包括大功率微波发射技术、高灵敏度接收技术、大口径天线技术、高速信号处理技术等。为了获得更多的目标信息,实现捕获、跟踪、多目标探测等功能,多种新体制雷达研制成功,如合成孔径雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达等。微波毫米波频段常见的雷达系统类型如表 1.2 所示。因为雷达系统类别很多,不再一一介绍,具体的内容可参考相关教材。

表 1.2 微波毫米波频段与雷达类型

频段代号	频率范围/GHz	雷达类型
L	1.0~2.0	中远程搜索雷达
S	2.0~4.0	中远程搜索雷达
C	4.0~8.0	中程搜索雷达、跟踪雷达
X~K	8.0~20.0	近程搜索雷达、跟踪雷达、导航雷达、导弹寻的器
K~Ka	20~40.0	跟踪雷达、导弹寻的器
V	50.0~75.0	毫米波雷达、导弹寻的器
W	75.0~110.0	毫米波雷达、导弹寻的器

导航是雷达系统的一种重要应用,目的是引导目标安全航行,主要用于空中交通管制和港口交通管制。航空导航雷达分为一次监视雷达和二次监视雷达,前者依靠目标回波来发现目标并对其定位,后者依靠飞机应答信号来发现目标并对其定位、识别。二次雷达具有发射功率要求低、精度高、体积小、重量轻等优点,因此得到更多应用。典型的单脉冲二次雷达发射频率为 1.03 GHz,接收频率为 1.09 GHz,脉冲重复频率在 50~450 Hz 之间,发射机功率一般大于 2 kW。

船舶导航雷达分为港口监视雷达和船用雷达,前者建在岸上,体积、规模不受限制,所以导航精度、处理速度、目标容量等方面具有更大优势。港口监视雷达一般工作在 X 频段,如我国自行研制的 HSR-1128 型港口监视雷达工作频率为 9.225/8.825 GHz,采用 9.5 m 口径的波导缝隙天线和多模式先进数字信号处理技术,采取频率分集、极化分集、时间分集等抗干扰措施,最大作用距离大于 10 km,测距精度优于 33.7 m,测向精度优于 0.26°^[5]。

1.2.2 通信

微波毫米波频率高,相应的系统带宽较大,非常适用于大容量通信。典型的微波毫米波通信系统有微波中继通信、卫星通信、移动通信等。微波中继通信是利用低空对流层大气中视线范围内微波传播的一种通信方式,主要用于克服地球曲率造成的对电磁波直线传播的阻挡和电磁波传播过程中的衰减,一般采用超高频波段,我国的大庆—秦皇岛微波中继通信工程就采

用 X 频段微波通信。卫星通信系统由通信卫星和地面站组成,通信卫星就是空间的微波中继站,因为微波毫米波能够穿透电离层,所以成为卫星通信系统主要采用的载波(详见 1.3.1 节)。移动通信是最广为人知的微波通信系统,下面具体进行介绍。

蜂窝移动通信系统是 20 世纪 70 年代提出的,至今已经历了三代。第一代(1G)是模拟蜂窝网,其代表是北美的 AMPS (Advanced Mobile Phone System)和欧洲的 TACS (Total Access Communication System);第二代(2G)以数字化为主要特征,其代表是欧洲的时分多址 GSM (Global System for Mobile Communications)和北美的码分多址 IS-95;第三代(3G)主要特征是多媒体业务,其代表是北美的 CDMA2000、欧洲和日本的 WCDMA 和我国的 TD-SCDMA^[6]。

WCDMA 是第三代蜂窝移动通信的主要标准之一,已列入国际电信联盟(ITU)认可的国际移动电话(IMT-2000)标准。WCDMA 的空中接口使用 CDMA 区分不同用户,并用规定的时隙结构传送信息,采用频域双工(FDD)方式。可以将 WCDMA 的网络分为用户设备域或基础域,两个网络实体之间通过标准化接口连接。WCDMA 采用层次蜂窝结构,最高层通过卫星实现全球覆盖,低层则由宏层、微层和微微层构成,不同的蜂窝层支持的数据速率也不同。根据对误比特率(BER)和传输时延的要求可将 WCDMA 支持的业务分为对话式、流式、交互式、后台运行式等 4 类。

WCDMA 上行链路频率为 1900~2025 MHz,下行链路频率为 2110~2200 MHz。移动台根据发射功率可分为 4 级,最大发射功率分别为 33 dBm、27 dBm、24 dBm 和 21 dBm。典型的基站发射功率为 10~40 W,灵敏度则达到 -120 dBm,要求基站在第一和第二相邻信道(具载波分别 5 MHz 和 10 MHz)的邻道泄漏率优于 45 dB 和 50 dB。典型的通信终端发射功率为 -50~21 dBm,灵敏度为 -117 dBm。

目前,蜂窝移动通信系统在全球拥有超过 30 亿的用户,并且这一数字将不断增加,可以说蜂窝移动通信系统是微波技术最典型的应用。

1.2.3 探测

物质分子或原子中的微观运动将形成电磁波发射,微波毫米波频段的辐射测量和观测推动了微波探测应用。微波探测具有全天时、全天候的特点,并且对某些目标有一定的穿透能力,所以得到了飞速的发展。微波毫米波探测与雷达应用的区别在于前者属于无源系统,而后者属于有源系统。典型的微波毫米波探测系统有辐射测量卫星、射电望远镜等,其中前者将在 1.3.2 节详细介绍,这里以射电望远镜为例进行介绍。

1931 年,贝尔实验室的央斯基(Jansky)用他设计的“旋转木马”天线接收到来自宇宙的波长为 14.6 m 的电磁波,从而开创了射电天文学。研究表明,天体以及星际物质不停地辐射电磁波,通过探测这些电磁波可以像使用光学望远镜一样实现天文观测。微波毫米波是射电天文观测的重要频段,至今已经开发了覆盖微波毫米波全频段的射电望远镜及其阵列,并取得了许多重要的观测结果。

美国国立天文台的 100 m 口径绿岸(Green Bank)望远镜是典型的单天线射电望远镜,于 1991 年 5 月开始建设,2000 年 8 月 22 日正式启用。绿岸望远镜采用独特的偏轴方式,一方面避免了馈源系统对辐射的遮挡,增大了有效接收面积,另一方面有利于设计牢固的支撑结构,提高了望远镜的寿命。绿岸望远镜还采用了先进的主动反射面技术,主动反射面可以利用激

光测距仪测量天线表面的形变,并通过发动机自动调整。这一技术可以使巨大的天线保持 0.3 mm 的型面误差。绿岸望远镜的观测频段为 100 MHz~115 GHz,其主要的科学成就包括观测脉冲星、研究恒星形成等^[7]。

为了提高观测分辨率,天文学家又提出了综合孔径射电望远镜的概念,美国 1980 年建成的甚大阵(VLA)综合孔径射电望远镜就是其中的代表作。VLA 由 27 台 25 m 口径可移动抛物面天线组成,天线排列成 Y 字形,总接收面积达到 53 000 m²。按天线间距 VLA 有 3 种阵型,每 4 个月换一次阵型以满足不同的观测需要。VLA 的观测频段为 74 MHz~50 GHz,具有复杂的馈源和接收机设备。VLA 最有价值的成果之一是于 1994 年发现了微类星体。

1.2.4 电子对抗

电子对抗是敌对双方争夺电磁频谱控制权的行动,电子攻击、电子防护和电子支援是电子对抗的核心内容,微波毫米波是进行电子对抗的主要频段。电子攻击是最为典型的对抗活动,根据对目标产生的攻击效能,可以将电子攻击分为干扰、软杀伤和硬杀伤。下面以电子干扰为例介绍微波毫米波技术在电子对抗领域的应用。

电子干扰就是通过向对方接收机发射电磁波,从而达到破坏其通信、导航、探测等链路的目的。干扰发射机是实施电子干扰的关键设备,一般是大功率微波毫米波发射机,干扰信号形式则根据对方的信号和系统特性来确定。利用传统的微波功率源技术都可以开发干扰发射机,微波功率模块(MPM: Microwave Power Module)则是一种新型的技术途径。美国于 1991 年开始实施 MPM 研制项目,由休斯、雷声、诺斯罗普等 5 家公司负责。MPM 主要由微波组件、小型行波管(Mini-TWT)、微型电源组成,其中微波组件为 Mini-TWT 提供驱动功率和幅相特性补偿,Mini-TWT 提供大功率微波毫米波输出,微型电源为微波组件和 Mini-TWT 供电。MPM 工作在厘米波到毫米波波段,可以提供大于 50 dB 的增益,输出功率在 50 W 以上,效率高于 30%。目前在美国,MPM 在干扰机上已经形成了产业装备^[8]。

电子对抗已经成为现代化战争的突出特点,在近期的几次局部战争中,敌对双方都进行了激烈的电子对抗。其内在原因是以微波毫米波技术为载体的信息技术成为战争的主导因素之一,这从另一个角度也印证了微波毫米波技术的应用。

除了上述应用之外,微波毫米波技术在广播电视、医疗诊断、测量、科学实验、功率传输等领域也得到广泛应用,各种微波毫米波系统已经使人类处于一个相当复杂的电磁环境中。

1.3 空间微波毫米波系统

人类进入空间时代已经 50 多年了,发射的空间飞行器已经数不胜数,这些空间系统广泛地应用微波毫米波技术,相当一部分空间系统甚至可以称为空间微波毫米波系统。值得指出的是,本节讨论的空间系统是按照其有效载荷分类的,所谓有效载荷,就是直接实现卫星在轨运行要完成的特定任务的仪器、设备和分系统。有效载荷往往是微波毫米波技术应用的主体。

1.3.1 通信卫星

通信卫星是应用最广泛的卫星,按照所支持的业务可分为固定业务通信卫星、移动业务通信卫星、直播卫星、跟踪与数据中继卫星等;根据服务对象又可分为军用通信卫星和民用通信