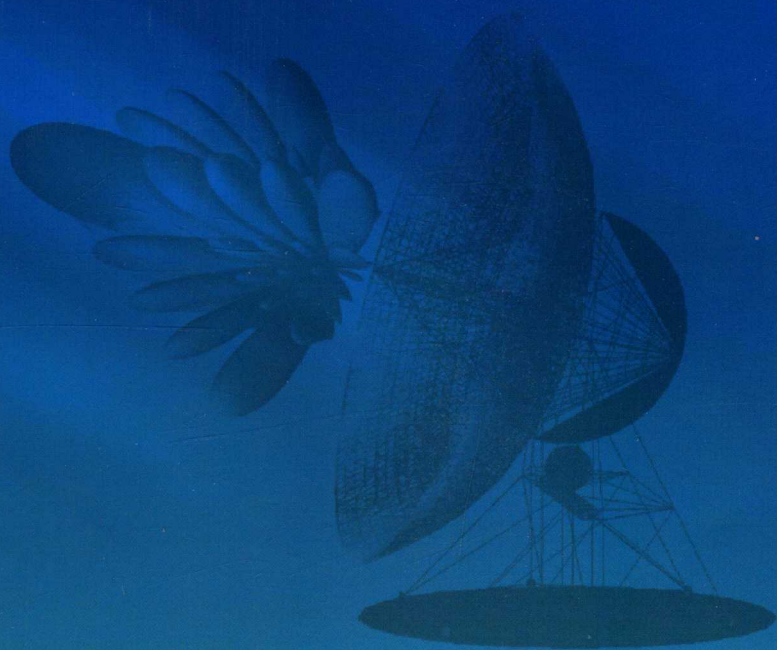


微波天线

多场耦合理论与技术

王从思 王 伟 宋立伟 编著



科学出版社

微波天线多场耦合理论与技术

王从思 王 伟 宋立伟 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

微波天线的机械结构、散热和复杂的工作环境都是实现天线高性能的主要制约因素,且机械结构也是天线电性能稳健可靠的重要保障。随着天线技术的不断发展,微波天线多场耦合理论与技术在天线设计、制造与服务过程中发挥的作用将越来越重要。本书共9章,首先介绍微波天线的作、特点和性能参数,以及场路耦合中涉及的微波电路基础,然后阐述天线主要工作环境的模拟分析方法与天线散热基本技术,着重论述三类微波天线机电多场耦合的基础理论与关键技术,最后展望未来微波天线机电耦合的发展热点。

本书内容综合性和针对性强,可作为天线结构设计与制造工程人员的工具书,也可作为高等学校相关专业的高年级本科生和研究生的教材或参考书。同时,对从事相关科技研究的人员也有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

微波天线多场耦合理论与技术/王从思,王伟,宋立伟编著. —北京:科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-044772-2

I. ①微… II. ①王… ②王… ③宋… III. ①微波天线-耦合-研究 IV. ①TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 121057 号

责任编辑:李 萍 杨向萍 王 苏 / 责任校对:李 影
责任印制:赵 博 / 封面设计:红叶图文

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:304 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微波天线作为高性能电子装备的“眼睛”和“耳朵”，具有典型的机电耦合特征，在通信、雷达、射电天文、广播电视、导航、电子对抗和遥感遥测等领域有着广泛的应用，其电性能的成功实现不仅依赖于各学科领域的设计水平，更取决于多学科的有机融合。

随着深空探测、射电天文、新能源等科学领域的发展，包括反射面天线、阵列天线在内的微波天线正朝着大口径、高频段、高增益、低副瓣、高密度、集成化的方向发展，微波天线机械结构、热、工作环境与电性能之间的耦合程度变得越来越紧密。机电耦合正是表示电子装备中电信因素与机械结构因素之间相互影响、相互制约的关系。可见，微波天线机电耦合不仅涉及数学、物理、力学等基础学科，更涉及电磁、机械结构、传热、材料、控制、制造工艺、测试等工程领域，是一个多学科、多领域联合攻关的科学工程问题。微波天线机电多场耦合理论与技术在天线设计、制造与服役过程中的作用将越来越重要。机电耦合与设计学的结合，可使应用微波天线的复杂电子装备的设计更量化、精密化；机电耦合与材料学的结合，会加强复合材料、功能材料等新材料的应用，使复杂电子装备更精、更轻、更强；机电耦合与制造工艺学的结合，可使复杂电子装备的制造方法与工艺流程更高效、产品质量更优良；机电耦合与电子信息技术的结合，可使复杂电子装备的“耳目”更清晰，“大脑”更智慧，“决策”更英明，“行动”更迅捷精准。

不同于一般的微波天线技术著作，本书从耦合的角度介绍天线结构设计、散热设计、制造工艺、服役调试等方面的多场耦合理论与关键技术，希望成为一本集先进性和实用性为一体的天线设计指导性工具书。由于机电耦合涉及的内容非常广泛，因此，本书除了必备基础知识和物理概念，在编写中尽量简化繁复的理论分析与数学推导过程，着重介绍机电多场耦合理论相关的基本原理与基础知识，以说明近十年来微波天线机电耦合的主要进展与研究成果。

本书内容主要包括机电多场耦合涉及的微波技术和微波电路基础知识，反射面天线的变形拟合、精度分析、主副面变形、馈源位置指向误差、场耦合建模、模型求解、补偿技术、馈源位置指向优化、最佳安装角等，裂缝阵列天线的腔体结构分析、辐射缝位置指向误差、馈电网络变形、场耦合建模、模型求解、钎焊工艺、制造工装、振动影响等，以及有源相控阵天线的阵面结构分析、误差综合、辐射单元位置指向误差、T/R 组件性能温变、场耦合建模、机电热耦合优化等方面的多物理场耦合理论与关键技术，另外，专门介绍了微波天线的工作环境条件

及模拟仿真技术。

本书是在作者多年研究微波天线机电耦合的工作基础上整理、补充而成，在微波技术和微波电路基础知识方面，也部分借鉴和参考了国内外经典书籍和相关资料，包括段宝岩院士的《电子装备机电耦合理论、方法及应用》、《天线结构分析、优化与测量》，叶尚辉教授的《天线结构设计》，张光义院士的《相控阵雷达天线》，Levy Roy 教授的 *Structural Engineering of Microwave Antennas for Electrical, Mechanical, and Civil Engineer*，Constantine A. Balanis 教授的 *Antenna Theory, Analysis and Design*，Robert S. Elliott 教授的 *Antenna Theory and Design*，Thomas A. Milligan 博士的 *Modern Antenna Design* 等。正是站在了这些前辈巨人的肩上，我们才得以传承知识，才能不断进步。

衷心感谢导师段宝岩院士，从 2001 年本科毕业设计参加科研项目起，就在段老师的悉心指导下学习、工作，对于恩师与师母的关怀与多方面的帮助，铭记于心，终生感恩。

在长期的研究工作中，得到了叶尚辉、仇原鹰、贾建援、陈建军、张福顺、焦永昌、黄进、保宏、陈光达、曹鸿钧、朱敏波、李鹏、周金柱、李娜等老师与同事的指导与帮助，在此特向他们表示衷心的感谢。作者在南京电子技术研究所从事博士后工作期间，在微波天线实验与工程方面得到了平丽浩首席、张光义院士，以及王秀春、王惠华、曾锐、徐德好、常研、王长武、史峻东、郭先松、钱吉裕等专家与老师的支持与帮助，在此一并表示诚挚的谢意。在本书编写过程中，作者所在实验室的全体博士和硕士研究生在文字录入、图表绘制、数据收集等方面都给予了热情的帮助，在此一并表示感谢。

由于作者的水平和能力有限，编写时间紧，书中难免存在不妥之处，真诚希望广大读者批评指正。

王从思

2015 年 3 月于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微波天线发展概述	1
1.3 天线类型	11
1.4 机电耦合与微波天线	19
1.5 本书内容安排	21
参考文献	21
第 2 章 微波天线工作环境分析	24
2.1 概述	24
2.2 振动、冲击载荷分析	24
2.3 稳态风荷与瞬态风荷分析	28
2.4 太阳照射影响分析	36
2.5 冰荷与积雪载荷分析	38
参考文献	38
第 3 章 天线结构力学与电性能参数	40
3.1 概述	40
3.2 天线结构位移场	40
3.3 电磁计算方法	41
3.4 天线电性能参数	42
3.5 天线辐射单元	50
3.6 天线多场耦合概述	58
参考文献	61
第 4 章 微波技术与微波电路理论基础	63
4.1 概述	63
4.2 微波技术基础	63
4.3 微波传输线	70
4.4 Smith 圆图	71

参考文献	73
第 5 章 天线散热设计与测试方法	74
5.1 概述	74
5.2 散热设计的关键技术	74
5.3 热测试方法	76
5.4 天线冷板设计方法	77
参考文献	85
第 6 章 反射面天线机电场耦合	87
6.1 研究背景	87
6.2 大口径全可动面天线的发展现状	87
6.3 面天线电磁分析基本方法	93
6.4 反射面天线补偿方法	96
6.5 基于最小二乘的变形反射面拟合方法	101
6.6 变形反射面精度的可靠度分析方法	103
6.7 耦合建模中的坐标转换	106
6.8 反射面天线机电场耦合模型	112
6.9 机电场耦合模型的求解	120
6.10 偏置抛物面天线机电场耦合模型	122
6.11 面天线增益损失计算方法	128
6.12 基于机电耦合的馈源位置和指向优化设计	131
6.13 天线最佳安装角的确定	133
6.14 天线面板调整量的计算	135
参考文献	140
第 7 章 裂缝阵列天线机电场耦合	145
7.1 研究背景	145
7.2 波导裂缝阵列天线的分类	146
7.3 平板裂缝天线的特点及工作原理	149
7.4 平板裂缝天线机电场耦合模型	151
7.5 机电场耦合模型的求解	155
7.6 基于机电耦合的平板裂缝天线钎焊分析	159
7.7 钎焊装夹对天线机电耦合性能的影响	175
7.8 工装、降温速率与钎焊参数的综合影响分析	182
7.9 基于机电耦合的机载随机振动影响分析方法	187
参考文献	191

第 8 章 有源相控阵天线机电热场耦合	193
8.1 研究背景	193
8.2 相控阵天线的分类	194
8.3 有源相控阵天线的特点	194
8.4 有源相控阵天线的关键结构	196
8.5 有源相控阵天线 T/R 组件	201
8.6 T/R 组件性能温变分析	204
8.7 相控阵天线基本电磁分析	206
8.8 随机误差与系统误差的综合分析方法	211
8.9 有源相控阵天线机电热场耦合模型	218
8.10 有源相控阵天线机电热耦合优化设计	223
8.11 星载微带阵列天线机电场耦合	225
参考文献	232
第 9 章 微波天线机电耦合展望	235
9.1 概述	235
9.2 有源相控阵天线的发展方向	235
9.3 星载可展开有源相控阵天线的研究热点	237
9.4 未来微波天线机电耦合的研究重点	238
参考文献	240

第1章 绪 论

1.1 引 言

微波天线是无线电设备中用来发射或接收电磁波的部件,可利用电磁波来传递信息,广泛应用在通信、雷达、射电天文、广播电视、导航、电子对抗和遥感遥测等工程系统中。在电磁波传送能量方面,非信号的能量辐射也需要天线。天线的工作原理实质上就是一种变换器,它把传输线上传播的导行波变换成在无界媒介(通常是自由空间)中传播的电磁波,或者进行相反的变换。

微波天线作为一种具有典型机电耦合特征电子装备,其电性能的成功实现不仅依赖各学科领域的设计水平,更取决于多学科的有机融合^[1,2]。例如,天线反射面是电磁场的边界条件,在自重、风、雪等载荷作用下,反射面变形将影响天线增益、方向图等电性能指标,且随着天线工作频段的升高,这种影响关系更加突出;又如,高密度、小型化的电子装备(如弹载相控阵雷达),其结构位移场、电磁场、温度场之间的场耦合问题严重影响导弹的制导精度;再者,机载、舰载等运动环境中天线的座架及伺服系统会直接影响其指向精度与快速响应能力;此外,工作环境引起的温度变化以及内部结构材料特性不一致引起的温度不均匀等对天线的机械性能与电路性能都有重要影响,最终导致天线电性能的显著恶化^[3-6]。由此可见,微波天线的性能不仅由电磁因素决定,也与机械结构因素、温度分布、工作环境等紧密相关。

在影响微波天线性能指标的诸多因素中,机电耦合已成为一个瓶颈,而其中多场耦合更是机电耦合的重要基础。在本书中,机电耦合是指电子装备中电磁因素与机械结构因素的相互影响、相互制约的关系,多场耦合是指两种或多种学科物理场或性能参数在载体工作过程中交叉作用、互相影响(耦合)的物理现象。而传统意义的机电耦合是指进行机械能量与强电转化的机电装备内的机电作用,主要指电机类强电系统,这里的电与本书的“电”(电磁场)是两个不同概念。在高频段、高增益、高密度、小型化、快响应、高指向精度的天线系统中,机械结构因素与电信之间逐渐呈现出强耦合的特征。

1.2 微波天线发展概述

1.2.1 天线的发展历史

最早的发射天线是 Hertz 在 1887 年为验证麦克斯韦(Maxwell)理论而设计的,

将单圈金属方形环状天线作为接收天线，根据方环端点之间空隙出现的火花来指示收到了信号。Marconi 是第一个采用大型天线实现远洋通信的人，所用的发射天线由 30 根下垂铜线组成，顶部用水平横线连在一起，横线挂在两个支持塔上。这是人类真正付诸实用的第一副天线，之后天线的发展大致分为四个历史时期，如图 1.1 所示。

(1) 线天线时期。在无线电获得应用的最初时期，真空管振荡器尚未发明，人们认为波长越长，传播中的衰减越小。因此，为了实现远距离通信，所利用的波长都在 1000m 以上。在这一波段中，水平天线显然是不合适的，因为大地中的镜像电流和天线电流方向相反，天线辐射很小。此外，它产生的水平极化波沿地面传播时衰减很大。后来，业余无线电爱好者发现短波能传播很远的距离。这时，天线尺寸可以与波长相比拟，从而促进了天线的顺利发展。这一时期除了抗衰减的塔式广播天线，还出现了各种水平天线和天线阵，典型的有偶极天线（又称为对称天线）、环形天线、长导线天线、同相水平天线、八木天线（又称为八木-宇田天线）、菱形天线和鱼骨形天线等。在这一时期，天线的理论工作也得到了发展^[7]。

(2) 面天线时期。由于没有相应的振荡源，直到 20 世纪 30 年代，随着微波电子管的出现才陆续研制出各种面天线。这时已有类似于声学方法的喇叭天线、类似于光学方法的抛物反射面天线和透镜天线等。在第二次世界大战期间出现的雷达大大促进了微波技术的发展。为了迅速捕捉目标，研制出了波束扫描天线，利用金属波导和介质波导研制出波导缝隙天线和介质棒天线，以及由它们组成的天线阵。在面天线基本理论方面，建立了几何光学法、物理光学法和口径场法等理论。在面天线有较大发展的同时，线天线理论和技术也有所发展，如阵列天线的综合方法等^[8,9]。

(3) 从第二次世界大战结束到 20 世纪 50 年代末期。微波中继通信、对流层散射通信、射电天文和电视广播等工程技术的天线设备有了很大发展。这时出现了分析天线公差统计理论，发展了天线阵列的综合理论等。1957 年，美国研制了第一部靶场精密跟踪雷达 AN/FPS-16。随后，各种单脉冲天线、频率扫描天线也付诸应用。随后，宽频带天线有所突破，产生了非频变天线理论，出现了等角螺旋天线、对数周期天线等宽频带或超宽频带天线。

(4) 20 世纪 50 年代以后。这时天线的发展空前迅速，一方面是大型地面站天线的修建和技术的改进，包括卡塞格伦天线的出现，正副反射面的修正，波纹喇叭等高效率天线馈源和波束波导技术的应用等；另一方面，相控阵天线由于新型移相器和计算机的出现，重新受到重视并得到广泛发展^[10,11]。后来，由于无线电频道和卫星通信的发展，面天线的频率复用、正交极化及多波束天线受到重视；无线电技术向毫米波、亚毫米波及光波方向发展，出现了介质波导、表面波和漏波天线等新型毫米波天线；在阵列天线方面，由线阵发展到圆阵，由平面阵发展

到共形阵,合成孔径天线技术进入实用阶段;电子对抗的需要促进了超低副瓣天线的发展;由于高速大容量计算机的发展,矩量法和几何绕射理论开始在天线中得到应用;随着电路集成化的发展,微带天线在飞行器上获得快速发展。这一时期,天线结构和工艺也取得了很大的进展,如制成了口径为 100m、可全向转动的高精度保型射电望远镜天线,还研制了单元数接近 2 万个的大型相控阵和高度超过 500m 的天线塔。在天线测量技术方面,出现了微波暗室、近场测量技术及利用天体射电源测量技术,并创立了用计算机控制的自动化测量系统等。

1.2.2 四类典型天线的发展历程

包括陆基反射面天线、星载可展开反射面天线、星载可展开有源相控阵、有源相控阵天线等四类微波天线的发展历程可用图 1.2~图 1.5 来概要说明^[12-18]。

1.2.3 天线波段划分

无线电波按波长可划分为超长波、长波、中波、短波、米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波,其中,分米至亚毫米的波统称为微波(microwave)。它属于无线电波中波长最短(频率最高)的波段,通常指频率为 300MHz(波长为 1m)~3000GHz(波长为 0.1mm)的电磁波,如图 1.6 所示。微波与普通的无线电波、可见光和不可见光、X 射线、 γ 射线一样,本质上都是随时间和空间变化的呈波动状态的电磁波。但它们的表现各不相同,如可见光能被人眼感觉而其他波段则不能被人眼感觉;X 射线和 γ 射线具有穿透导体的能力而其他波段则不具有这种能力;无线电波可以穿透浓厚的云雾而光波则不能。这是因为它们的频率不同,即波长不同。

微波波段区别于其他波段的主要特点是其波长可与常用电路或元件的尺寸相比拟。而普通无线电波的波长大于或远大于电路或元件的尺寸,电路或元件内部的电波传输过程可忽略不计,因此可以用路的方法进行研究。光波、X 射线、 γ 射线的波长则远小于常用元件的尺寸,甚至可与分子或原子的尺寸相比拟,因此不能用电磁的方法或普通电子学的方法来产生或研究它们。它们是同分子、原子或核的行为相联系的。

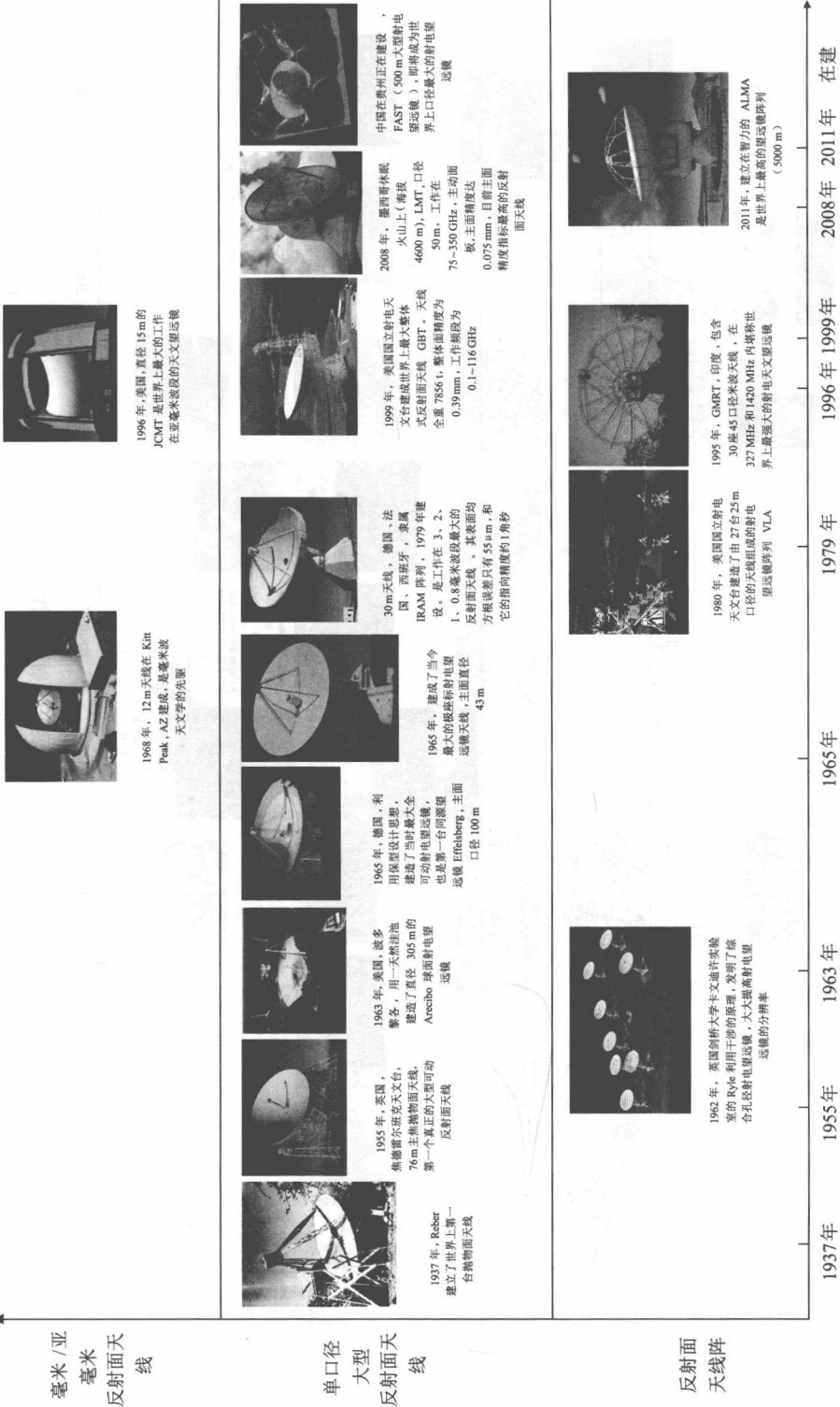


图1.2 陆基反射面天线发展历程

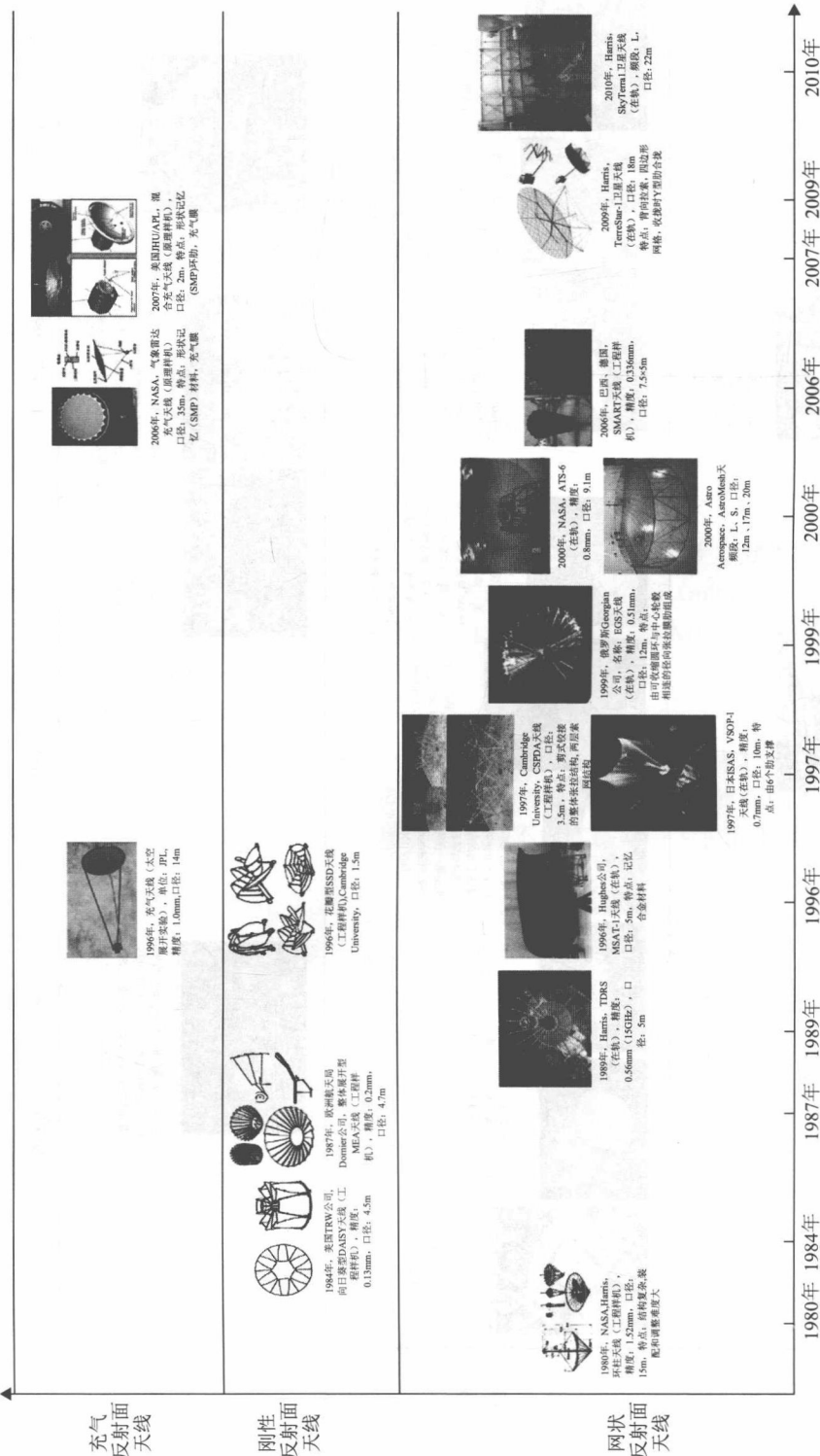


图1.3 星载可展开反射面天线发展历程

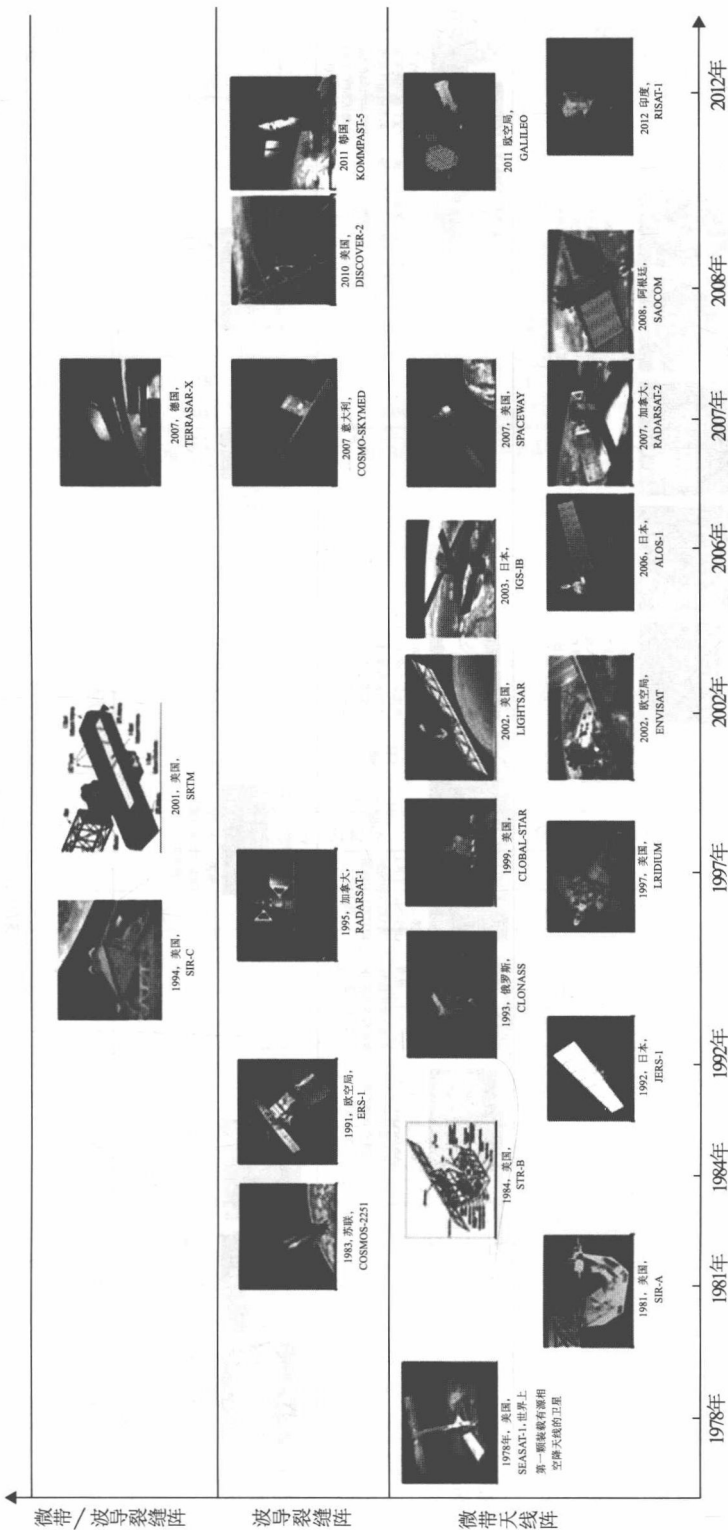


图 1.4 星载可展开有源相控阵天线发展历程

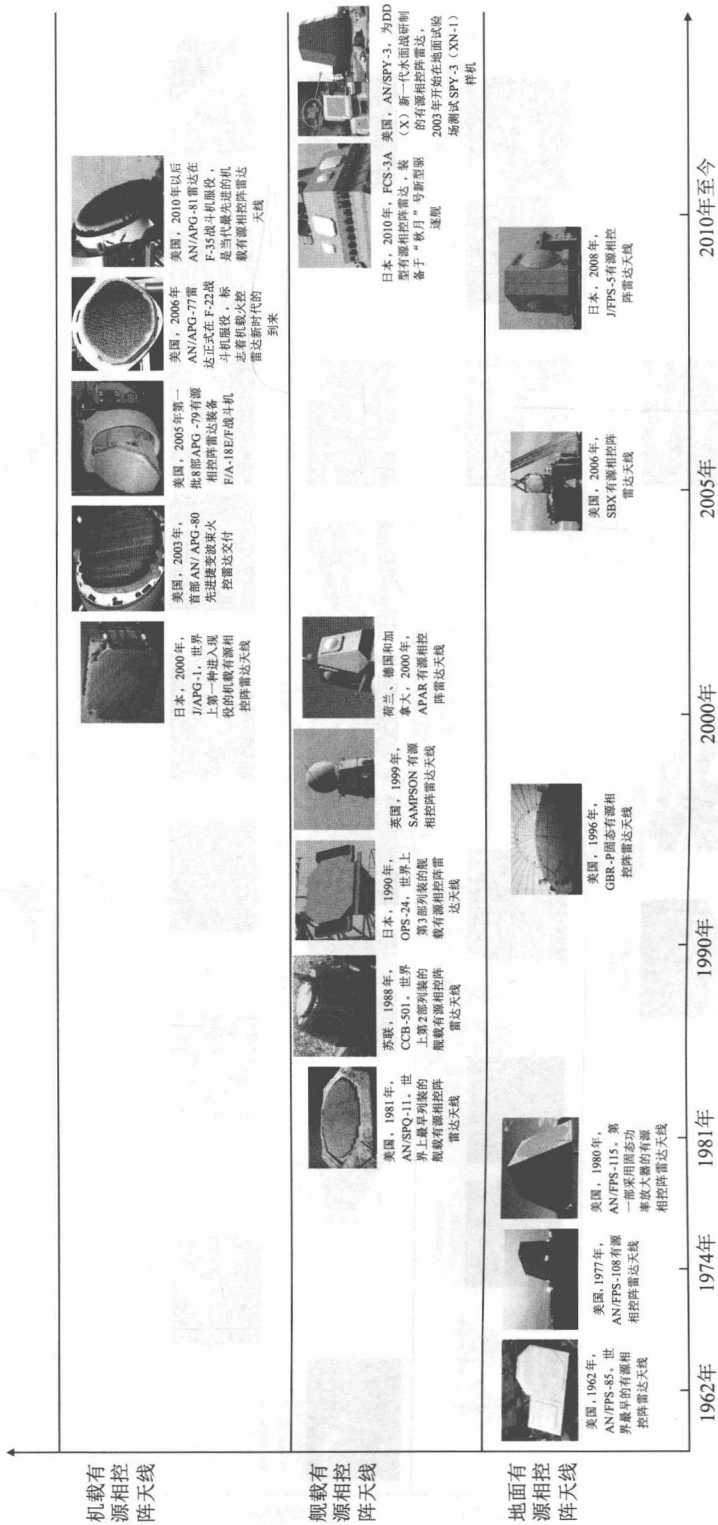


图1.5 有源相控阵天线发展历程

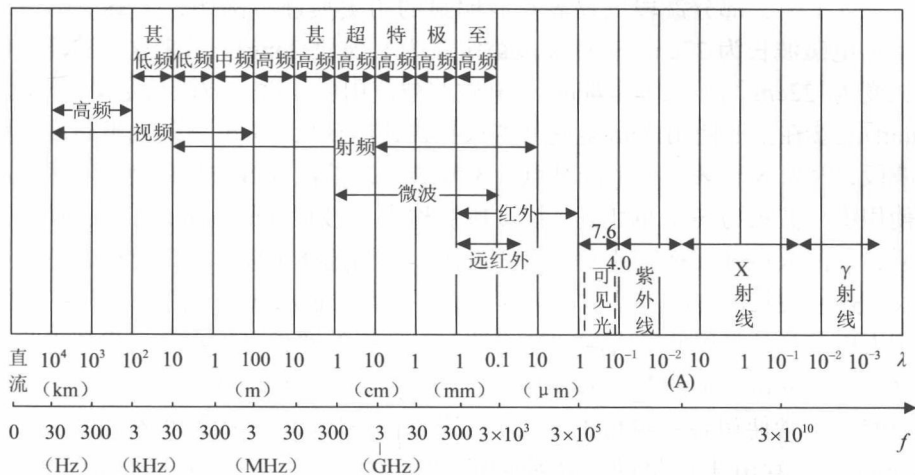


图 1.6 电磁波谱

1) 传统波段名称

通信与雷达中天线波段(频段)的传统方法划分如表 1.1 所示。

表 1.1 传统的天线波段划分

名称	符号	频率范围	波长范围	标称波长
甚低频	VLF	3~30kHz	1000~100km	超长波
低频	LF	30~300kHz	10~1km	长波
中频	MF	0.3~3MHz	1km~100m	中波
高频	HF	3~30MHz	100~10m	短波
甚高频	VHF	30~300MHz	10~1m	米波
微波波段	UHF	0.3~1GHz	1~0.1m	分米波
	L	1~2GHz	30~15cm	22cm
	S	2~4GHz	15~7.5cm	10cm
	C	4~8GHz	7.5~3.75cm	5cm
	X	8~12GHz	3.75~2.5cm	3cm
	Ku	12~18GHz	2.5~1.67cm	2cm
	K	18~27GHz	1.67~1.11cm	1.25cm
	Ka	27~40GHz	1.11~0.75cm	0.8cm
	Q	33~50GHz	0.9~0.6cm	—
	U	40~60GHz	0.75~0.5cm	0.6cm
	V	60~80GHz	0.5~0.375cm	0.4cm
	W	80~100GHz	0.375~0.3cm	0.3cm
/		100~300GHz	0.3~0.1cm	—