

俞俊生 陈晓东 编著

HAOMIBO YU

YAHOMIBO ZHUNGUANG JISHU

毫米波与亚毫米波 准光技术



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

毫米波与亚毫米波准光技术

俞俊生 陈晓东 编著

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书基于北京邮电大学电磁场与微波技术国际开放实验室(桃园实验室)所研究的毫米波与亚毫米波准光网络项目而成,包括完整的毫米波与亚毫米波分析方法、准光学基础概念及分析方法、高斯波束在准光学中的应用分析方法、三反射紧缩场天线测试系统的基础等理论方面;还包括对准光滤波器的分析设计及其设计方法、准光学仿真软件的介绍、天线近场以及远场测量等实用方面。

图书在版编目(CIP)数据

毫米波与亚毫米波准光技术/俞俊生,陈晓东编著. --北京:北京邮电大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-5635-2141-8

I. ①毫… II. ①俞…②陈… III. ①极高频—微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 009027 号

书 名: 毫米波与亚毫米波准光技术

编 著 者: 俞俊生 陈晓东

责任编辑: 孔 玥

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E - mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 11

字 数: 279 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2141-8

定 价: 22.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

序

毫米波是指波长在 1~10 mm 之间的电磁波，其频率介于 30~300 GHz，亚毫米波是指波长在 0.1~1 mm 之间的电磁波，其频率介于 300~3 000 GHz，其在军事、民用方面有广泛的用途，如通信、目标探测、制导、遥感，不接触式的金属探测等，尤其在空间上有广泛的用途，特别是在 40 GHz 以上，以空间遥感为主的领域，如气象卫星中的大气温度与湿度的垂直分布的测量，我国的风云三号 A 极轨气象卫星就载有 60 GHz 的温度计和 150 GHz 的温度计。在军用方面，美国的新一代高频军事通信卫星（AE-HF）载有 Ka 波段（20~32 GHz）的相控阵通信系统与 Ka 星间链路通信系统。以上两方面的应用相比低端微波与红外，毫米波与亚毫米波有不可比拟的优越性。

另外，毫米波与亚毫米波技术也是电磁计算技术与复杂高精度工艺技术的结晶。由于其波长在毫米级，其制造精度要求极高，以反射面（抛物、椭球或双曲面）为例，在 100 GHz 时，形面精度要小于 0.06 mm，对于直径大于 500 mm 的反射面的加工是一项严峻的挑战，对于口面尺寸只有几个波长（一般在 3 个波长以下）、内部又有复杂齿槽的馈源，其制造难度更大。

做为一个完整的毫米波与亚毫米波系统，应包括信号源、接收前端、混频、能量传输与分配网络、测量等，反射面系统是最重要的前端设备，也是其分析与设计理论最复杂的部分。在此基础上，配备不同的电路部件，即可完成整个毫米波系统的功能。反射面分析一般常分为几何光学法、物理光学法，对于更高精度的要求如旁瓣的要求，可采用物理光学与 UTD 等相结合的方法，但它们需要在反射面口面的每一点进行积分计算，对于大口径的天线（如口面直径/波长大于 100 以上的），需要巨大的计算量。虽然从单纯的计算速度来讲，现在的计算硬件已不成问题，但对于需要多次优化工程设计来说，还需反复修改计算，特别对于多反射面、多通道系统来说，分析计算的时间就更长。

在反射面天线的分析与设计方面，目前虽然有如 TICRA 公司的 GRASP 软件（物理光学与 UTD 的混合法）可进行分析，波纹喇叭也可用通用电磁仿真软件如 HFSS、MWS 进行分析，但真正具有自主知识产权的软件，均分散在各研制单位的研制者中，离商用软件的功能还有很大的距离，俞俊生、陈晓东两位教授研制的 SiMatrix 软件，其最大优点是利用衍射高斯波束法（DBGAs）能对多反射面系统进行快速分析，具有模块化的特点。

我与俞俊生、陈晓东两位教授相识于一次会议上，我单位用于整星无线特性与大口径天线测试（测试静区直径可达 12 m）的双反射面紧缩场正处于验收测试阶段，陈教授实验室的三反射紧缩场引起了我的兴趣，俞教授也正在组建毫米波实验室。从此，我与

两位教授成为了好友，短短三年时间，两位教授的毫米波实验在准光学的系统场方面取得了丰硕成果，同时开发了具有自主知识产权的毫米波多路辐射系统的分析软件，该软件在我单位演示时，获得了我院同行专家的一致好评。在大量国外软件充斥国内各工业部门、高校的环境下，我为该软件的诞生而感到欣慰。

有关毫米波与亚毫米波的文献非常多，但大多收集在各种期刊和会议文集中。我国以前也曾有几本有关此方面的书籍出版，但时间较早，且主要是针对分析方法进行论述，本书内容从基本原理一直到设计方法、加工工艺、测量方法均有论述，以反射面分析的衍射高斯波束法为核心，是一本很有特色的系统论述准光学系统的专著，可作为电磁场与微波技术专业的研究生教材，也可供相关技术人员参考学习之用。

中国空间技术研究院 尤睿

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 准光技术的应用	(1)
1.2 技术现状	(3)
1.3 本书主要内容	(5)
参考文献	(7)
第 2 章 高斯波束传播	(8)
2.1 基本高斯波束的传播	(8)
2.1.1 近轴波动方程	(8)
2.1.2 柱坐标下高斯波束的基模	(9)
2.1.3 一维、二维直角坐标系下的高斯基模	(12)
2.2 高斯波束传播的描述	(12)
2.2.1 基模在束腰附近的能量分布	(12)
2.2.2 基模能量分布	(12)
2.2.3 共焦距离：近场与远场	(15)
2.3 高斯波束的高次模	(17)
2.3.1 柱坐标下高斯波束的高次模	(17)
2.3.2 直角坐标系下的高次模	(20)
2.4 高斯波束的测量	(22)
2.5 高斯波束参数的关系	(22)
参考文献	(23)
第 3 章 高斯波束转换	(24)
3.1 射线矩阵与复杂波束参数	(24)
3.2 典型的波束转移矩阵	(25)
3.2.1 自由空间中的波束转移矩阵	(25)
3.2.2 介质连接处的波束转移矩阵	(26)
3.2.3 薄透镜的波束转移矩阵	(27)
3.2.4 椭球面镜的波束转移矩阵	(28)
3.3 透过聚焦器件时高斯波束的转换	(29)
3.3.1 一般准光系统中高斯波束的转换	(29)
3.3.2 薄透镜的传输特性	(30)
3.3.3 高斯望远镜	(33)

3.4 模式匹配	(33)
参考文献	(35)
第 4 章 馈源	(36)
4.1 高斯波束展开	(36)
4.2 波前曲率半径	(38)
4.3 波束半径	(38)
4.4 束腰位置以及复幅度	(41)
4.5 不同馈源的高斯波束展开	(42)
4.5.1 空腔圆形介质波导的 EH_{11} 模式	(42)
4.5.2 波纹喇叭馈源	(43)
4.5.3 圆光滑内壁喇叭馈源	(46)
4.5.4 双模喇叭馈源	(47)
4.5.5 锥角喇叭馈源	(47)
4.5.6 几种馈源的比较	(49)
4.6 馈源的加工工艺	(49)
参考文献	(51)
第 5 章 频率选择表面	(52)
5.1 频率选择表面简介	(53)
5.2 频率选择表面的发展与现状	(54)
5.3 频率选择表面的应用	(55)
5.4 频率选择表面的几何参数	(56)
5.5 频率选择表面的分析方法	(57)
5.6 频率选择表面的设计方法	(58)
5.6.1 频率选择表面的设计思路	(58)
5.6.2 准光系统中频率选择表面的设计考虑	(60)
5.6.3 54 GHz 低通型频率选择表面的设计与仿真	(60)
5.7 频率选择表面的测试	(66)
5.8 频率选择表面性能的影响因素及改进方法	(67)
参考文献	(68)
第 6 章 准光网络反射面设计	(69)
6.1 椭球面反射镜设计	(69)
6.2 抛物面反射镜天线	(74)
参考文献	(75)
第 7 章 衍射高斯波束分析法	(76)
7.1 高斯波束分解	(77)
7.1.1 双窗函数	(77)

7.1.2	高斯波束系数	(79)
7.1.3	轴向分量	(81)
7.1.4	用 FFT 计算二维积分	(81)
7.2	边界衍射波	(83)
7.2.1	前向场分布	(83)
7.2.2	后向场分布	(84)
7.2.3	斜入射时衍射场分布	(85)
7.2.4	高斯波束的反射	(87)
7.2.5	表面外推法	(88)
7.2.6	远场的计算	(89)
7.3	反射镜面	(90)
7.4	衍射高斯波束分析方法小结	(93)
7.5	其他方法简介	(94)
	参考文献	(96)
第 8 章	周期矩量法	(97)
8.1	多层频率选择表面的几何结构	(97)
8.2	互阻抗法	(99)
8.3	平面波在多层介质中的传输与反射	(100)
8.4	脊顶函数展开	(101)
8.5	三角形划分的递归算法	(104)
8.6	影响因素	(105)
8.6.1	栅瓣的影响	(105)
8.6.2	极化的影响	(106)
8.7	建模方法	(106)
8.7.1	缝隙型或口径型阵列的建模	(106)
8.7.2	混合电流系统矩阵的建立	(106)
8.7.3	带厚度的 FSS 的建模	(112)
8.8	FSS Design Tool 软件介绍	(113)
	参考文献	(115)
第 9 章	准光系统仿真软件 SiMatrix 介绍	(116)
9.1	概述	(116)
9.2	SiMatrix 漫游	(117)
9.2.1	界面介绍	(117)
9.2.2	视图窗口	(117)
9.2.3	菜单和工具栏	(118)
9.2.4	工程管理窗口	(119)
9.2.5	输出窗口	(119)
9.2.6	监视窗口	(120)

9.3 坐标系统和单位设计	(121)
9.3.1 坐标系统设计	(121)
9.3.2 工程及单位设计	(121)
9.4 模型设计及操作	(122)
9.4.1 馈源	(122)
9.4.2 椭球面反射镜设计	(123)
9.4.3 双曲面反射镜设计	(125)
9.4.4 抛物面反射镜设计	(126)
9.4.5 双色器的设计	(128)
9.4.6 光路搭建及模型操作	(129)
9.4.7 光路设置	(130)
9.4.8 进行仿真	(132)
9.4.9 结果查看	(133)
9.5 实例	(134)
9.5.1 光路设计	(134)
9.5.2 光路搭建	(135)
参考文献	(140)
第10章 系统测试	(141)
10.1 基本原理	(141)
10.1.1 近场与远场	(141)
10.1.2 平面波理论	(142)
10.1.3 基本原理	(143)
10.1.4 探头补偿原理	(144)
10.2 测试过程	(145)
10.2.1 系统的测试方法	(146)
10.2.2 测试结论及讨论	(149)
10.3 小结	(153)
参考文献	(153)
第11章 紧缩场天线测量系统	(154)
11.1 背景介绍	(154)
11.2 CATR 的类型	(155)
11.3 CATR 的设计	(157)
11.3.1 波带动态跟踪理论	(157)
11.3.2 设计 CATR	(158)
参考文献	(164)
附录 复射线理论	(165)

第 1 章 绪 论

把电磁波的频率或波长按一定的顺序排列起来,就得到电磁波谱。研究电磁波谱的意义不仅在于不同频率的电磁波有着不同的应用场景,例如无线电设备一般小于 30 MHz,RF 调频电台在 88~108 MHz,对讲机工作在 450 MHz 左右,移动通信工作在 900 MHz 以及 1 800 MHz 两个频段。更重要的在于不同频率的电磁波存在着不同的特性。低频情况下可以不考虑电路的寄生电容电感,但到射频微波段就必须引入分布参数的概念,在微波段可以较少地考虑波导的损耗问题,但在毫米波与亚毫米波波段,波导的损耗就相当可观。本书描述的准光技术所涉及的电磁波就处于毫米波与亚毫米波波段,其对应的频率为 30~300 GHz。本书所描述的技术可以延伸到 THz 领域(0.1~10 THz)。

图 1.1 为一张简单的电磁波谱图,毫米波、亚毫米波以及 THz 波处于微波与可见光之间,在现实生活中有着重要的应用场景,例如,在民用领域,诸如射电天文、大气探测、车船防撞、民用通信、频谱学以及生物效应、地形测绘、气象研究领域都有广泛的应用;在国防领域,诸如毫米波雷达及毫米波制导是近年研究的一个热点。

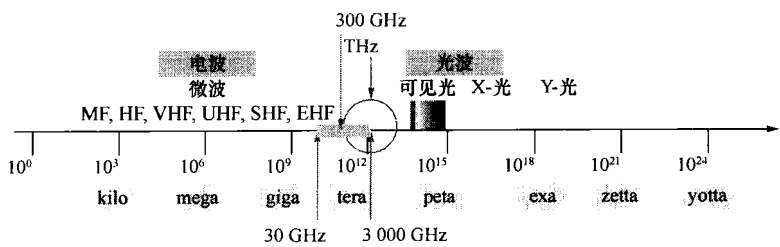


图 1.1 电磁波谱图

1.1 准光技术的应用

太空对于人类来说永远是那么神秘,人类对于太空探索的努力从来没有停止过。利用电磁波对太空进行观测是常用的手段,通过对接收信号的分析来研究分子云与恒星形成等。射电天文是天文学的一个分支,就是通过电磁波技术研究天体。无线电天文学的技术与光学相

似,但是无线电望远镜因为观察的波长较长,所以更为巨大,而相对于微波来说频率更高,所以器件上难以制造。这个领域的研究源于发现多数的天体不仅辐射出可见光,也发射出无线电波。射电天文学为天文知识带来了相当的进展,特别是好几种天体的新发现,包括脉冲星、类星体和活动星系。这几种天体的表现可算得上是宇宙中最激烈、能量最高的物理活动。

图 1.2(a)为深空探测,图 1.2(b)为波多黎各岛阿雷西博天文台(美国最重要的射电天文、行星探测和地球超高层气流物理学的研究中心)直径达 306 m 的单面射电天文望远镜^[1]。

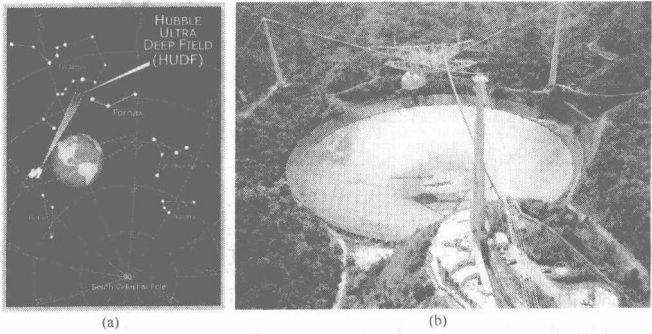


图 1.2 射电天文

地球大气层一般分为对流层、平流层、中间层等。大气层的成分主要有氮气,占 78.1%;氧气占 20.9%;氩气占 0.93%;还有少量的二氧化碳、稀有气体(氦气、氖气、氦气、氦气、氦气、氦气)和水蒸气。这些气体在毫米波与亚毫米波以及 THz 频段内有着大量的谐振频率,它们会对不同频率的电磁波产生吸收峰,可以利用这种特性对大气层的成分进行探测研究,以观测大气成分的变化。另外,利用水分子对特定频率电磁波的吸收作用,可以研究气象,例如,在气象卫星上安装毫米波与亚毫米波辐射计,利用反射信号或透射信号来观测云层的厚度与分布。

图 1.3 为大气窗口图,从图中可以看到不同频率的电磁波对不同分子有不同的吸收特性。在星载电磁波辐射计中,可以同时复用多种频率的信号达到同时对不同分子成分进行观测的效果。

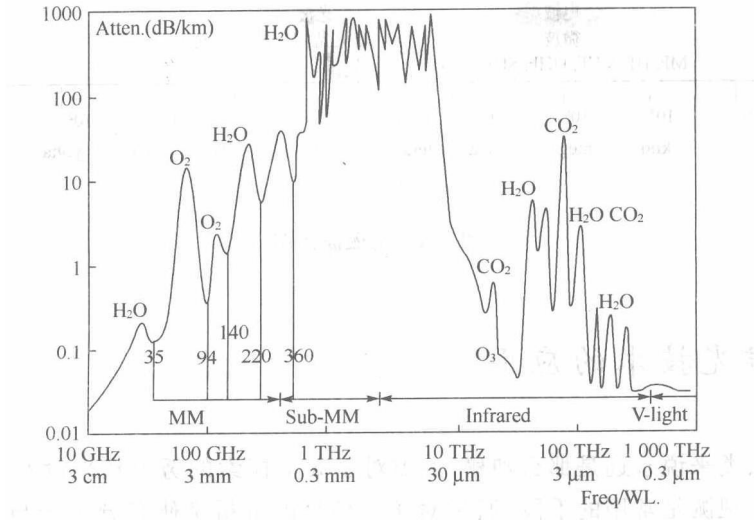


图 1.3 大气窗口图

云层中的分子对不同频率的电磁波有不同的吸收效果,可以利用这一点进行大气探测,氧分子的吸收峰在 60 120 GHz 附近,水分子则在 23 GHz、183 GHz 附近,亚毫米波有 1 个在 320 GHz 附近,4 个大

气窗口在 35 GHz、94 GHz、140 GHz、220 GHz。
毫米波在其他方面也有着广泛的应用,如在城市交通中的汽车防碰撞雷达,如图 1.4 所示,可以有效地减少交通事故的发生。毫米波成像技术、毫米波遥感技术也有着重要的应用价值以及应用前景。

在军用方面,毫米波技术受到关注的原因主要在于,红外和光系统不便穿透烟尘、云雾等恶劣环境和夜间工作,而微波频谱非常拥挤。图 1.5 为军用设备在毫米波段的优先选用频谱分布。

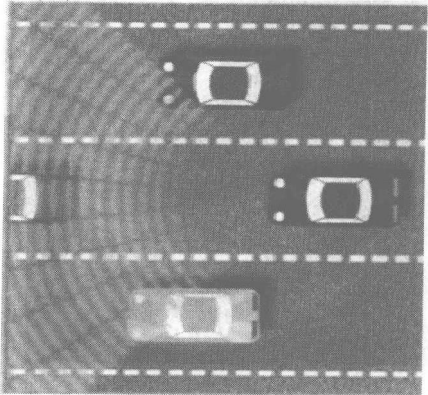


图 1.4 汽车防碰撞雷达的应用

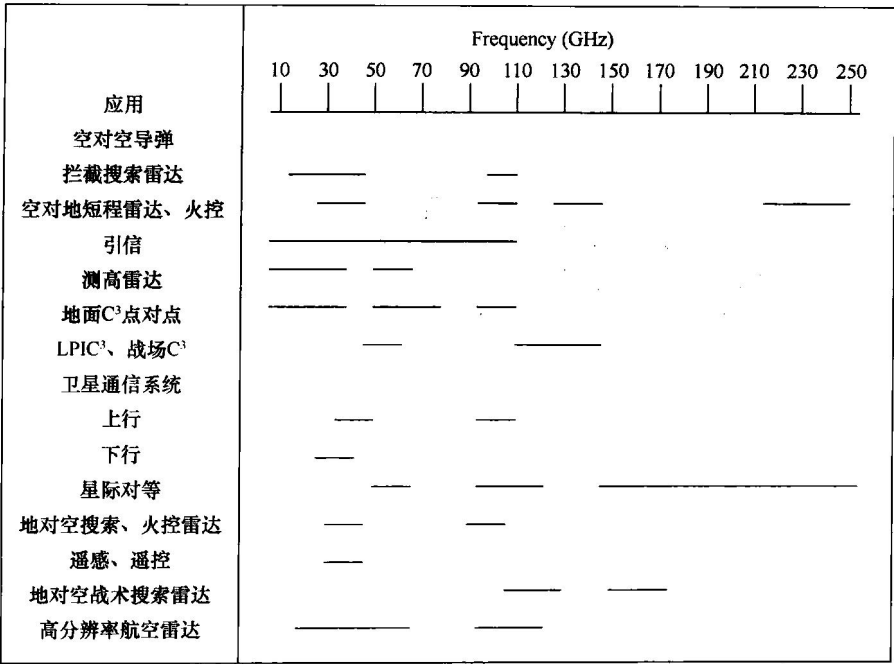


图 1.5 毫米波系统优先选用频谱分布^[2]

1.2 技术现状

在射电天文方面,毫米波技术在航天器上的最新应用实例是欧洲航天局于 2009 年发射的普朗克(Planck)深空探测器,其示意图如图 1.6 所示。它用来探测宇宙背景热噪声的梯度变化,其接收系统是一个 1.5 m 偏置天线的准光系统,拥有 25~900 GHz 的 9 个频率通道。普朗克号探测器停留在地球 100 万英里之外的太空中,寻找 140 亿年前宇宙大爆炸时余留的放射物的痕迹^[3]。还有正在建设的巨型毫米波天线阵列(ALMA),如图 1.7

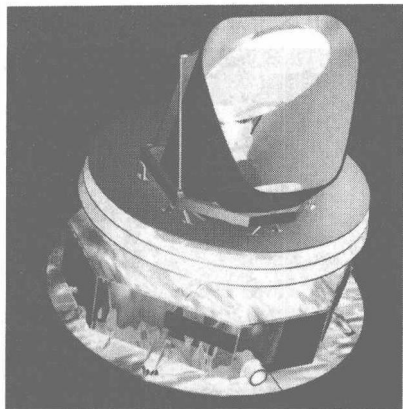
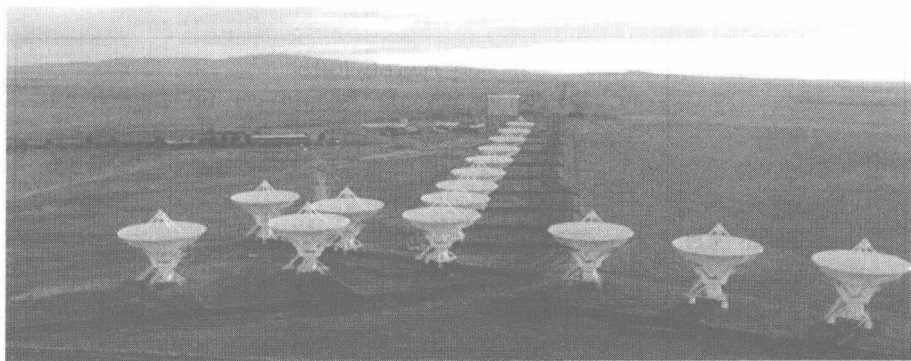


图 1.6 普朗克号探测器示意图

所示,这项工程位于智利北部高海拔沙漠中。工程建成后将为天文学的发展作出重要贡献。这种毫米和亚毫米射电望远镜是一种由 64 个直径 12 m 的碟形卫星天线组成的干涉计,每个天线的波长覆盖范围为 $0.35\sim 10\text{ mm}$,精确度数量级比哈勃太空望远镜还要高,同时它也可以做为一个图像处理工具。科学家使用这一装置探索的目标是寒冷的宇宙,其中各种物质的温度为 $3\sim 100\text{ K}$,随着温度上升,这些物质的谱线也在毫米波区间内逐渐上升。这种分布特性将使人们对分子气体与尘埃的研究成为可能,正是这些物质聚集成块,构成了恒星、行星系统和银河系。

图 1.7 巨型毫米波天线阵列^[4]

在大气探测方面,自 1998 年首次发射的 NOAA 系列卫星 NOAA-K,L,M,微波辐射计是主要载荷;2002 年发射的 ESA 极轨气象卫星 MetOp,5 个通道 ($89\sim 190\text{ GHz}$),探测垂直湿度廓线和降雨量;2006 年发射的日本地球观测卫星 ADEOS-II,主要用于测量海洋表面温度、表面风速以及土壤湿度等;2003 年发射的美国空军 Coriolis 卫星,采用极化微波辐射遥测技术来测量海洋表面风速矢量;2008 年发射的 ESA SMOS 卫星主要测量海洋表面盐度和陆地土壤湿度。

20 世纪 90 年代初,我国开始进行深空探测的立项论证,2004 年开始嫦娥一号工程的立项。北京时间 2007 年 10 月 24 日 18 时 05 分(UTC+8 时)左右,嫦娥一号探测器从西昌卫星发射中心由长征三号甲运载火箭成功发射。如图 1.8 所示为嫦娥一号卫星发射轨迹图和拍摄的月球表面照片。在气象卫星及大气探测方面,国内研制的风云三号卫星上的微波成像仪载荷采用的是馈源喇叭阵列的形式。国内有关准光学多通道辐射计前端系统的理论研究和实验验证正在开展之中。风云四号气象卫星微波辐射计也将采用准光技术。如图 1.9 所示的中国科学院紫金山天文台是我国著名的天文台之一,始建于 1934 年,位于南京市东南郊风景优美的紫金山上^[6]。

依据国务院发布的《2006 年中国的航天》白皮书^[7],我国将计划启动并实施高分辨率对地观测系统工程;研制、发射新型低轨道和静止轨道气象卫星、海洋卫星、地球资源卫星、环境与灾害监测预报小卫星;开展立体测图卫星等新型遥感卫星关键技术研究。初步形成全天候、全

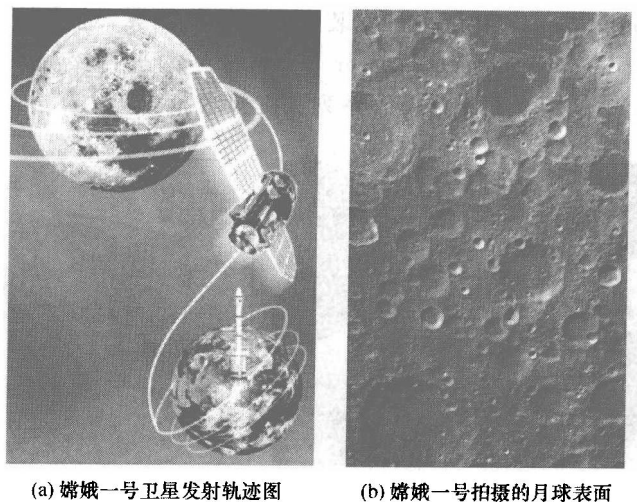
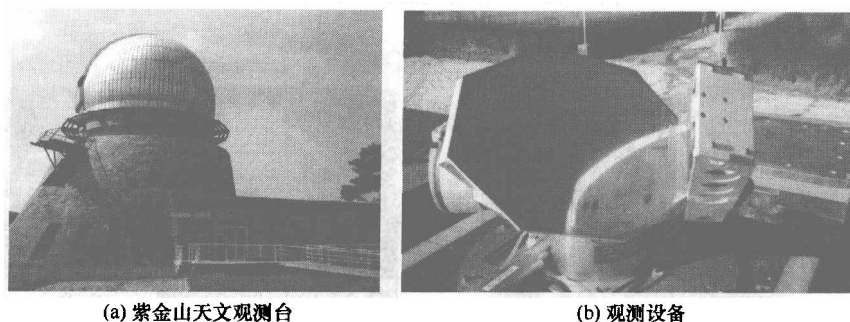
图 1.8 嫦娥一号卫星发射轨迹图及其发回的月球表面图像^[5]

图 1.9 中国科学院紫金山天文台

天时、多谱段、不同分辨率、稳定运行的对地观测体系,实现对陆地、大气、海洋的立体观测和动态监测;统筹发展卫星遥感地面系统和业务应用系统,整合并完善现有遥感卫星地面系统,在卫星遥感主要应用领域取得突破性进展。虽然现阶段我国的毫米波技术整体上与国外发达国家有很大的差距,但是,随着国家投入的不断增加和国际合作渠道的拓宽,可以预见在不远的将来将有长足的发展。

1.3 本书主要内容

毫米波与亚毫米波低端与微波相连,而高端与红外、光波相连,必然会涉及微波与光波两个领域的理论与技术。一个系统的开发往往要求各个部件都有相应的加工与制造技术。准光技术是一个充满挑战性的领域,未来的准光技术必然会向 THz 频段发展,THz 技术难度将会更大,要求更高。我们在这里讨论的内容主要是准光系统,做为发射端,它的主要作用是将多路信号进行合成,而做为接收端,它能将接收到的信号分成不同频率段的信号。现在的很多辐射计和探测器都安装在各种飞行器上,称为机载系统(Air-borne)。图 1.10 是一种典型的侧

翼探测系统(Limb-Sounding),它将辐射计安装在飞行器的侧翼,对对流层上层和平流层下层的大气(UTLS, Upper Troposphere & Lower Stratosphere)进行探测^[8],而如何设计和加工制造以及调试图 1.11 中的准光系统涉及一系列关键技术。

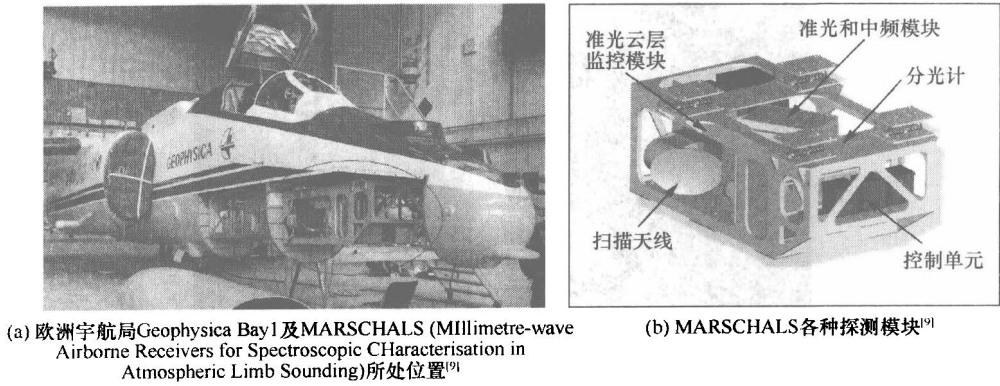


图 1.10 一种典型的侧翼探测系统

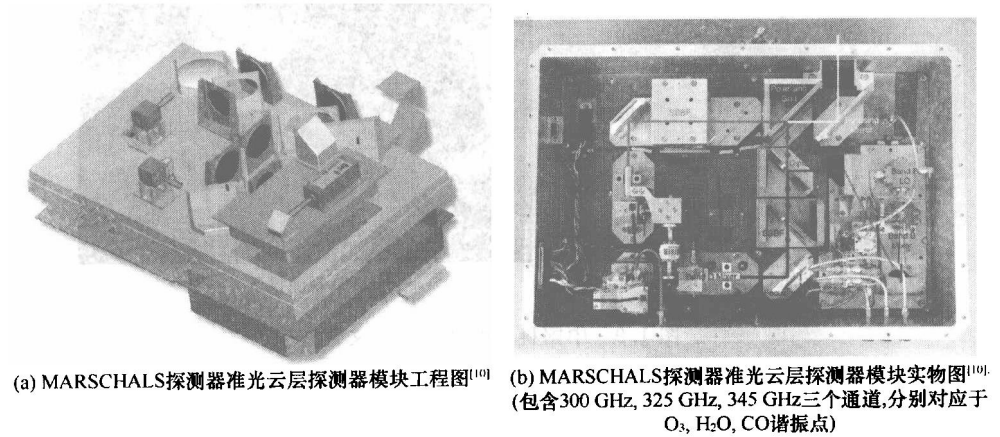


图 1.11 MARSCHALS 探测器准光云层探测器

第 2 章为高斯波束传播的基本理论。高斯波束是准光技术中一个比较基础的理论。第 3 章为高斯波束转换理论。主要讨论准光器件对高斯波束的影响与作用。第 4 章介绍准光网络系统中馈源的一些基本知识。第 5 章为频率选择表面的基本知识。第 6 章介绍如何设计合格的反射系统。第 7 章介绍分析准光网络系统的方法 DGBA(Diffractive Gaussian Beam Analysis)。第 8 章介绍分析频率选择表面的方法 PMM(Periodic Method of Moments)。第 9 章为分析与设计准光网络系统的软件介绍以及实例分析。第 10 章为准光网络系统的测试方法。第 11 章为新型紧缩场天线测量系统 CATR 的设计方法。在上述章节的编写中,刘小明、苏汉生、魏清刚、麦源付出了巨大的劳动。

准光技术涉及的领域十分广泛,虽然我们在这里所提到的只是很少的一部分,但编著者衷心希望它能成为立志投身该领域青年学子的一块铺路石。

参 考 文 献

- [1] <http://www.arenibo-observatory.org>.
- [2] 薛良金. 毫米波工程基础. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [3] http://www.esa.int/esaMI/Operations/SEM044XQEF_0.html.
- [4] <http://www.nrao.edu/telescopes/>.
- [5] <http://www.cnsa.gov.cn>.
- [6] <http://www.pmo.ac.cn>.
- [7] 《2006 年中国的航天》白皮书.
- [8] Byron Alderman, David N. Matheson, Brian N. Ellison, et al. Milimetre-wave Technology at the Rutherford Appleton Laboratory. Proceeding of the China-UK/Europe Workshop on Millimeter waves and Terahertz Technologies, 2008; 3-10.
- [9] <http://www.mmt.rl.ac.uk>.

第2章 高斯波束传播

电磁波频谱是丰富的,对于不同的频段,电磁波的特性有很大的差别。对于频率相对低的电磁波,我们通常用波的形式去表示它,如移动通信中的电磁波(900 MHz,1 800 MHz,波长大约 10~30 cm),相对于我们的环境而言,该波段电磁波的波长与我们周围的物体大多可比拟,因此我们不得不考虑它的衍射现象。但对于一般情况下的光,如图 2.1 所示,我们可以用射线去表示它,因为这个时候它的波长已经和系统相比相差得太远了,没有必要再过多地考虑它的衍射特性了。

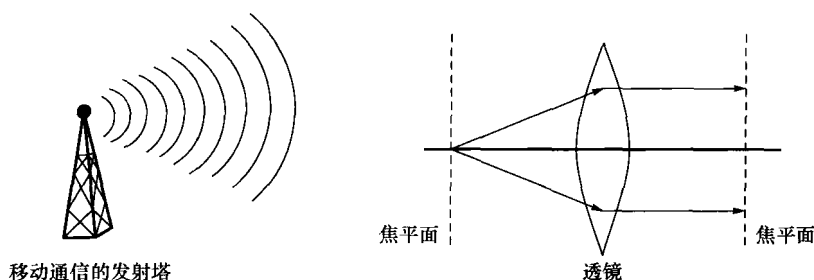


图 2.1 不同应用环境下的电磁波表示方式

我们所研究的对象所处的频段是 30~3 000 GHz 甚至更高的频率,它比移动通信用的频率高很多,比光波的频率又小很多,一般称为毫米波、亚毫米波波段。对该频段比较流行的研究方法是利用准光技术。准光技术是基于对电磁波的高斯波束描述,换句话说,我们可以利用高斯波束来描述该频段的电磁波传输特性,就像我们利用光线来描述光波段的电磁波传播特性一样。因此,讨论高斯波束基本可以成为研究准光技术的开始。

2.1 基本高斯波束的传播^[1,2]

2.1.1 近轴波动方程

平面波的振幅与空间所处的位置是没有关系的;球面波的振幅与其离源点的距离成反比。