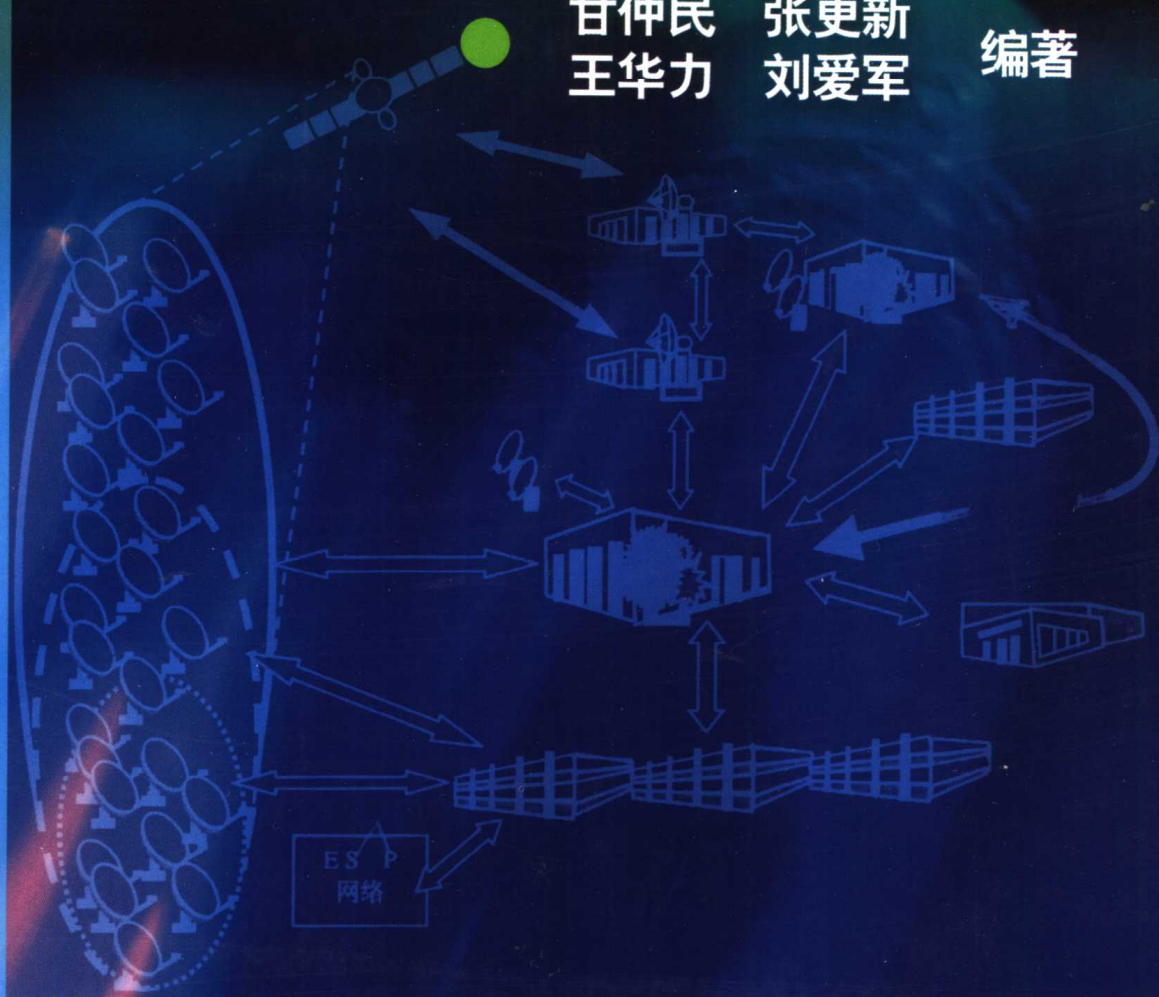




高等学校
电子信息类 专业教材

毫米波通信技术与系统

甘仲民 张更新 编著
王华力 刘爱军



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等学校电子信息类专业教材

毫米波通信技术与系统

甘仲民 张更新 编著
王华力 刘爱军

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于毫米波通信的专业技术书籍,内容包括:毫米波通信系统设备使用的传输线和部(器)件、毫米波天线、毫米波传播与信道特性以及相应的抗衰落技术、宽带数字通信中的编码调制和均衡、无线宽带交换技术、毫米波卫星通信和地面通信系统。书中对有关技术的基本概念、原理、系统构成和通信协议、工程应用及发展等进行了较系统的论述。本书既阐述原理和概念、进行必要的理论分析,又结合系统和工程应用,着力反映该领域的最新发展。

本书可作为高等工科院校通信工程专业研究生和本科高年级学生的教材或参考书,也可供从事微波通信和卫星通信的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

毫米波通信技术与系统/甘仲民等编著. —北京:电子工业出版社, 2003.7

高等学校电子信息类专业教材

ISBN 7-5053-8877-0

I. 毫… II. 甘… III. ①微波通信—通信技术 ②微波通信—通信系统 IV. TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 055721 号

责任编辑:杜振民

印 刷:北京东光印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:34 字数:806 千字

版 次:2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077

序

无线电频谱是一项巨大的财富资源。一般而言，人类对电磁频谱的探索、开发和利用，是从较低频率向较高频率逐步扩展的。毫无疑问，人类将实现对整个电磁频谱的“占领”，并根据各波段的不同特性，来安排其用途，让丰富而稀有的频谱资源服务于人类社会。今天，随着信息化的进程，人们需要更宽频带、更大容量、更高速率的信息处理、交换和传输，于是，毫米波频谱的开发利用显得日益迫切和重要。

实际上，20 世纪 80 年代前后，国内外曾有一些毫米波的理论技术的著作和教材问世，其中的许多基本原理和方法，仍具有重要的学习和参考价值；此后，这个领域出现了许多新的发展，进一步丰富了其理论与技术。同时，由于需求牵引和技术进步的双重作用，推动着毫米波应用的发展，毫米波通信便是其中一个十分活跃的领域。了解和掌握这些技术及其应用，相信是许多读者所关注的。

甘仲民教授等编著的《毫米波通信技术与系统》一书，包含了毫米波技术的基本原理和具体实现，以及应用毫米波的卫星通信、地面通信系统这两部分内容，可供通信工程和微波技术专业的大学高年级学生和研究生学习之用，也可供相关专业的工程技术人员学习和参考。一方面，通信工程专业的学生，在掌握毫米波技术知识的基础上，将能更好地理解 and 掌握毫米波通信系统的原理和应用；另一方面，微波技术专业的学生，可从各种毫米波通信系统的介绍中进一步了解毫米波技术的实际应用，既可扩大自己的知识面，又可使专业学习“有的放矢”。该书大部分取材于近年来国内外在毫米波技术和毫米波通信方面的新成果和新发展，这与新千年高等教育对知识结构更新的要求是相适应的；而对于从事微波通信的工程技术人员来说，此书有助于知识更新或解决所面临的毫米波通信中的种种问题，总之，相信广大读者会从此新书中取得收获。是为序。

陈太一

中国工程院院士

2003.5

前 言

随着人类社会信息化的进程,电磁频谱应用范围的开拓日益扩大。宽带大容量信息传输和个人通信的需求,加速了毫米波通信技术与工程的发展进程。

按照电磁频谱的划分,毫米波与分米波、厘米波同属微波范畴,它们有着许多共性。然而,毫米波在其产生、辐射、传播、接收、处理和应用系统集成等方面均显示其特有的“个性”。就通信而言,虽然各种用途的毫米波通信技术与系统已经或行将问世,但系统、全面地阐述这方面知识的书籍仍很少见,这显然与毫米波通信日益发展和广泛应用的态势不相协调。

本书是通信工程专业高年级大学生和研究生阶段的专业课程教材。它为学生提供毫米波通信领域技术与系统的新发展、新应用及相关的新知识,也为进入研究及开发应用奠定基础。本书也可作为从事微波通信和卫星通信的工程技术人员参考书。

全书共分为9章。第1章简介了毫米波通信的基本特性、发展历史和现状;第2章和第3章系统地阐述了组成毫米波通信设备的主要器件与部件,包括毫米波传输线,各种有(无)源器件和收发设备,以及常用的毫米波天线及智能天线(如相控阵、自适应多波束天线和数字波束形成技术等);第4章介绍了各种大气因素对毫米波传播的影响,毫米波通信链路的衰落特性、链路计算中要考虑的问题,以及抗雨衰技术等;第5章讨论了宽带通信中采用的各种编码技术和数字调制解调技术、宽带数字均衡技术和分集接收抗衰落技术等;第6章论述了无线异步转移模式(ATM),移动IP及它们二者的结合,以及在卫星通信中应用等;第7章、第8章和第9章分别叙述了毫米波卫星及地面通信系统的组成、特点、关键技术和系统设计中的主要问题。作为实例,较详细地介绍了已建成的和将要建成的若干毫米波卫星通信系统(网络)。

本书具有较为完整的结构体系,全面深入地介绍了本领域系统的专业知识。当然,作为课程,讲授内容是可以灵活安排的。如果在学习本书之前,学生已掌握了通信和微波技术基础的知识,对微波有(无)源器件与电路较为熟悉,第2、3章的教学可以从简处理,只须侧重于毫米波工作条件下的特点即可;又如学生对通信中的编码与调制、ATM、IP等较为熟悉,则第4、5章的内容可适当压缩,而突出其在卫星和移动环境下的应用;至于第8章中的几个典型的卫星通信系统示例,也可根据不同需要择其一、二即可。总之,本书虽篇幅较大,但具有很大的灵活选择的余地,以适合各高校不同层次、不同基础学生的需要。对于已有一定基础和工作实践经验的工程技术人员,书中所阐述的基本概念、基本原理,也可用来解决自己所面临的技术问题。

书中每章安排了思考题和习题,其中有的还要求学生通过计算机编程解题。

本书编写工作由甘仲民教授负责组织和统稿,并编写了第1、2、7、8、9章;张更新教授编写了第5、6章;王华力副教授编写了第3章;刘爱军副教授编写了第4章。由于书中内容涉及的知识新而广,作者水平有限,对于书中错误之处,恳请广大读者和专家批评指正。

本书在编写过程中,得到了陈太一院士的鼓励支持和杜振民编审的精心校阅与帮助,在此深表谢意。

作 者

2003年3月于南京

关于作者

甘仲民 任教于南京通信工程学院，教授，博士生导师，中国电子学会会士。从事微波与卫星通信教学与科研 30 余年。参与了国内多项卫星通信系统总体论证，并主持一些关键技术的研发工作；发表学术论文多篇，主要著作有《卫星通信系统》、《微波及其应用》、《数字化战场信息传输系统》等。

张更新 南京通信工程学院教授。1994 年在南京通信工程学院获博士学位，现为英国玛丽皇后学院高级访问学者。从事卫星通信的教学与科研工作，曾负责两项有关卫星移动通信的 863 课题研究及参与“金卫工程”的卫星通信应用研发。在国内外发表学术论文多篇，主要论（译）著有《移动卫星通信系统》、《卫星通信》等。

王华力 南京通信工程学院副教授。1997 年在南京理工大学获博士学位。1997 年至 1999 年为南京通信工程学院卫星通信重点实验室博士后。现任中国通信学会《通信学报》编委、中国电子学会高级会员、IEEE Member。主要从事通信信号处理、自适应天线技术等方面的教学与科研工作，在国内外发表学术论文五十余篇，论著有《战场感知技术》等。

刘爱军 南京通信工程学院副教授。1997 年在南京通信工程学院获博士学位。主要从事卫星通信系统、调制与解调技术、抗干扰通信技术等方面的教学和科研工作，参加过多项国防重点项目的研制工作，获部级科技进步二等奖二次，三等奖二次。发表论文三十余篇，参与撰写、翻译著作和编写教材有《数字化战场信息传输系统》、《卫星通信》等 5 部。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 电磁频谱	(1)
1.1.1 毫米波频率在无线电频谱中的位置	(1)
1.1.2 部分毫米波频段和厘米波频段的具体划分	(1)
1.1.3 毫米波的特点	(3)
1.2 毫米波通信的发展简况	(6)
1.2.1 毫米波波导通信系统	(7)
1.2.2 毫米波无线电地面通信系统	(7)
1.2.3 毫米波卫星通信	(8)
1.3 毫米波通信与其他通信方式的关系	(9)
1.4 毫米波通信系统的基本组成	(9)
参考文献	(10)
第 2 章 毫米波通信设备中的部件和器件	(13)
2.1 毫米波传输线及常用的无源器件	(13)
2.1.1 毫米波传输线	(13)
2.1.2 常用的毫米波无源器件	(31)
2.2 接收设备	(60)
2.2.1 接收设备的基本功能和要求	(60)
2.2.2 低噪声放大器(LNA)	(61)
2.2.3 下变频器	(64)
2.3 发射设备	(68)
2.3.1 发射设备的基本功能、体制和要求	(69)
2.3.2 上变频器	(70)
2.3.3 功率放大器	(71)
2.4 毫米波振荡源	(79)
2.4.1 概述	(79)
2.4.2 介质谐振器稳频的毫米波振荡器(DRO)	(79)
2.4.3 锁相毫米波振荡源	(80)
2.4.4 高稳定参考源	(82)
2.5 调制器	(83)
2.5.1 概述	(83)
2.5.2 移相键控(PSK)	(84)
2.5.3 多进制正交振幅调制(M-QAM)	(88)
2.6 开关和移相器	(90)
2.6.1 开关	(90)

2.6.2 移相器	(94)
思考题及习题	(98)
参考文献	(100)
第3章 毫米波天线	(104)
3.1 概述	(104)
3.2 天线基础	(105)
3.2.1 电磁场基本原理	(105)
3.2.2 天线的辐射场	(106)
3.2.3 天线的电性能参数	(108)
3.3 喇叭、反射面和透镜天线	(117)
3.3.1 口径面天线基本原理	(117)
3.3.2 喇叭天线	(118)
3.3.3 反射面天线	(124)
3.3.4 赋形波束天线、多波束天线与多频段共用天线	(133)
3.3.5 透镜天线	(140)
3.4 微带印制电路天线	(144)
3.4.1 微带天线的基本类型	(145)
3.4.2 微带天线的辐射特性	(146)
3.4.3 新型结构的微带天线	(149)
3.5 相控阵天线	(153)
3.5.1 相控阵天线的基本原理	(154)
3.5.2 相控阵天线的馈电方式	(162)
3.5.3 相控阵天线的互耦问题	(164)
3.5.4 相控阵天线技术的新发展	(166)
3.6 自适应天线	(173)
3.6.1 自适应天线的基本原理	(173)
3.6.2 自适应波束形成算法	(176)
思考题与习题	(180)
参考文献	(182)
第4章 毫米波的传播特性	(184)
4.1 大气传播因素	(184)
4.1.1 气体和水蒸气的吸收	(184)
4.1.2 由于降雨引起的衰减	(187)
4.1.3 雪和雹的影响	(196)
4.1.4 其他环境和大气效应	(197)
4.1.5 降雨对极化的影响	(199)
4.1.6 降雨对系统噪声温度的影响	(202)
4.2 在其他媒体中的传播因素	(203)
4.2.1 由于尘、烟引起的衰减	(203)
4.2.2 地面和障碍物的影响	(204)

4.3 毫米波通信链路的信道特性	(205)
4.3.1 LMDS 系统的信道模型	(205)
4.3.2 陆地移动卫星通信信道模型	(208)
4.4 毫米波通信链路考虑	(213)
4.4.1 地面通信链路	(213)
4.4.2 卫星通信链路	(214)
4.5 抗雨衰技术	(215)
思考题习题	(218)
参考文献	(219)
第 5 章 宽带数字通信技术中的编码、调制和均衡	(220)
5.1 编码技术	(220)
5.1.1 差错控制编码的基本概念	(220)
5.1.2 自动重发请求方式	(221)
5.1.3 线性分组码	(222)
5.1.4 循环码	(225)
5.1.5 卷积码	(228)
5.1.6 交织编码	(233)
5.1.7 级联码	(235)
5.1.8 Turbo 码	(236)
5.2 数字调制解调技术	(241)
5.2.1 数字调制解调的基本概念	(241)
5.2.2 滤波和脉冲成形技术	(244)
5.2.3 PSK 调制	(246)
5.2.4 多载波调制	(250)
5.2.5 正交振幅调制	(252)
5.2.6 编码调制	(256)
5.3 均衡和分集技术	(262)
5.3.1 分集接收抗衰落技术	(262)
5.3.2 均衡技术	(264)
思考题和练习题	(269)
参考文献	(270)
第 6 章 无线宽带信息交换技术	(273)
6.1 宽带通信网的业务特性	(273)
6.2 目前采用的主要传输交换方式及特点	(274)
6.2.1 电路交换	(275)
6.2.2 报文交换	(275)
6.2.3 分组交换	(276)
6.2.4 帧中继	(276)
6.2.5 ATM	(277)
6.2.6 IP	(277)

6.2.7 采用 ATM、STM 和 IP 三种技术的通信网比较	(280)
6.3 当前无线宽带网的主要技术特点及空中接口	(283)
6.4 无线 ATM 技术	(284)
6.4.1 ATM 技术的一些基本概念	(284)
6.4.2 从 ATM 到无线 ATM	(292)
6.4.3 无线 ATM 的协议结构	(294)
6.4.4 无线电接入层协议	(295)
6.4.5 移动 ATM	(297)
6.4.6 无线 ATM 在地面无线宽带网络中的应用现状	(300)
6.4.7 无线 ATM 在卫星通信网中的应用	(301)
6.5 移动 IP 技术	(307)
6.5.1 IP 技术的基本概念	(308)
6.5.2 移动 IP 的产生背景	(324)
6.5.3 移动 IP 的基本原理	(325)
6.5.4 代理发现	(328)
6.5.5 注册	(328)
6.5.6 隧道技术	(329)
6.5.7 路由选择	(330)
6.5.8 网络安全	(330)
6.5.9 移动 IPv6	(332)
6.6 IP 和 ATM 技术的结合	(336)
6.6.1 IP 与 ATM 技术结合的方式	(336)
6.6.2 多协议标记交换(MPLS)	(336)
6.7 卫星 IP 网络	(338)
6.7.1 卫星 IP 网络面临的主要问题及对 TCP 的影响	(338)
6.7.2 卫星 TCP/IP 传输的基本改进	(341)
思考题和练习题	(344)
参考文献	(345)
第 7 章 毫米波卫星通信系统	(348)
7.1 概述	(348)
7.2 系统构成及特点	(348)
7.2.1 系统的基本组成	(348)
7.2.2 毫米波卫星通信系统的基本特点	(349)
7.2.3 技术问题	(350)
7.3 星上处理及星间链路技术	(351)
7.3.1 星上处理	(351)
7.3.2 星间链路(ISL)技术	(361)
7.4 系统设计的考虑	(366)
7.4.1 轨道和频段的选择	(367)
7.4.2 通信体制	(371)

7.4.3	星上有效载荷的考虑	(375)
7.4.4	链路计算和卫星资源的最佳利用	(376)
7.4.5	关于卫星通信系统(网络)总体设计的进一步讨论	(379)
7.5	网络控制与管理	(380)
7.5.1	网络控制与管理功能	(380)
7.5.2	网络管理的基本架构	(381)
7.5.3	网管系统的实现	(383)
7.7	毫米波卫星通信系统的应用	(384)
7.7.1	毫米波宽带卫星通信网络	(385)
7.7.2	利用数字视频广播(DVB)提供卫星因特网服务	(391)
7.7.3	利用毫米波的个人卫星通信系统	(394)
	思考题及习题	(395)
	参考文献	(396)
第 8 章	典型的毫米波卫星通信系统	(399)
8.1	先进的通信技术卫星(ACTS)系统	(402)
8.1.1	系统用途及组成	(402)
8.1.2	空间段	(402)
8.1.3	地面段	(411)
8.1.4	ACTS 的新技术	(415)
8.1.5	千兆比特卫星网络(GSN)	(416)
8.2	军事战略与战术中继卫星(Milstar II)	(426)
8.2.1	系统用途及组成	(426)
8.2.2	空间分系统	(427)
8.2.3	地面应用系统	(439)
8.2.4	主要特色	(445)
8.3	Astrolink 网络	(445)
8.3.1	概述	(445)
8.3.2	网络组成	(446)
8.3.3	网络通信体制与结构	(450)
8.3.4	Astrolink 应用: 因特网连接和多媒体服务	(453)
8.4	Spaceway/Galaxy 系统	(453)
8.4.1	概述	(453)
8.4.2	网络组成	(454)
8.4.3	服务体系结构	(457)
8.4.4	通信技术与网络管理	(460)
8.4.5	主要特点	(461)
8.5	Teledesic 网络	(462)
8.6	Cyberstar 网络	(464)
8.6.1	概述	(464)
8.6.2	网络组成及应用	(464)

思考题及习题 (467)

参考文献 (468)

第 9 章 地面毫米波通信系统..... (470)

9.1 大、中容量短程毫米波通信系统 (470)

9.1.1 具体频段的划分 (470)

9.1.2 技术体制 (470)

9.1.3 设备组成及特点 (472)

9.1.4 系统设计考虑 (474)

9.1.5 实用设备举例 (477)

9.2 本地多点分配业务(LMDS) (478)

9.2.1 接入网及无线接入技术 (478)

9.2.2 本地多点分配业务(LMDS)的工作原理 (480)

9.2.3 本地多点分配业务(LMDS)组成和用途 (482)

9.2.4 射频设计问题 (484)

9.2.5 网络设计考虑 (488)

9.3 高高度、远程运行网络(HALO) (490)

9.3.1 HALO 网络的概念和原理 (490)

9.3.2 HALO 网络的系统架构和技术 (491)

9.3.3 HALO 网络系统参考模型 (493)

9.3.4 HALO 网络业务 (494)

9.3.5 用户单元(用户终端) (495)

9.4 宽带无线局域网 (496)

9.4.1 无线局域网(WLAN)的概念和原理 (496)

9.4.2 毫米波在 WLAN 中的应用 (500)

9.4.3 光纤-毫米波结合的传输系统 (505)

思考题及习题 (510)

参考文献 (511)

附录 英文缩写词..... (514)

第 1 章 绪 论

1.1 电磁频谱

1.1.1 毫米波频率在无线电频谱中的位置

电磁场理论告诉我们，随时间变化的电磁扰动，是以有限速度传播的，我们称它为电磁波动，或电磁波。按照傅里叶变换理论，任何电磁波的时间波形，均可分解为许多简谐(正弦或余弦振荡)时间函数的线性叠加。将简谐电磁波按照频率的高低排列起来，便得到完整的无线电频谱的图表。其中一部分如图 1-1 所示。

在图中，如果自低至高，将每一频率间隔编上序号，很容易发现表中具有下面的规律：

$$0.3(10^N)\text{Hz} < \text{第 } N \text{ 频段} \leq 3(10^N)\text{Hz}$$

其中， $N=11$ ，它的下边界频率是 $0.3(10^{11})\text{Hz} = 3 \times 10^{10}\text{Hz}(30\text{GHz})$ ；上边界频率是 $3(10^{11})\text{Hz} = 3 \times 10^{11}\text{Hz}(300\text{GHz})$ 。该频段通常称为极高频(Extremely High Frequency，缩写为 EHF)频段，其对应波长为 $(1\text{cm} \sim 1\text{mm})$ ，通常称为毫米波。

要指出，毫米波属于微波范围。微波是指波长从 1m 到 1mm (即频率从 300MHz 到 300GHz)这个范围内的电磁波。为了便于管理和开发，人们进一步将它划分为分米波(波长 $1\text{m} \sim 0.1\text{m}$ ，在频率域为 $300\text{MHz} \sim 3000\text{MHz}$ ，称为特高频，UHF)、厘米波(波长 $10\text{cm} \sim 1\text{cm}$ ，频率为 $3\text{GHz} \sim 30\text{GHz}$ ，称为超高频，SHF)和毫米波(极高频，EHF)几个波段。由表可见，毫米波位于微波频段的高端，其上限与亚毫米波毗邻而靠近光波。

还要指出，关于毫米波频率范围的划分问题，国际上并没有严格的、一致的规范。例如 1976 年美国电气电子工程师协会(IEEE)定义 $(40 \sim 300)\text{GHz}$ 为毫米波频段，这与图 1-1 的划分有所不同。不过，这并不妨碍人们对它的研究与利用。在毫米波的实际应用中，也会涉及到某些厘米波频率，对于这种频谱界限的“模糊度”，读者是能够理解的。

1.1.2 部分毫米波频段和厘米波频段的具体划分

人们在开发利用厘米波(超高频)和毫米波(极高频)波(频)段的过程中，为了方便而将其进一步细分，并用拉丁字母加以标记。表 1-1 是常见的部分厘米波和毫米波波(频)段的具体划分。

表 1-1 部分厘米波和毫米波波段的具体划分(IEEE 标准)

波(频)段名称	频率范围(GHz)
Ku	12~18
K	18~26.5
Ka	26.5~40
Q	36~46
V	46~56
W	56~100

图1-1 无线电频谱表

图 1-1 无线电频谱表

这里仍须指出,上述频段的划分在国际上也非严格统一的。如美国国防部 1970 年给出的军用划分是: K 波段(20GHz~40GHz), L 波段(40GHz~60GHz), M 波段(60GHz~100GHz), N 波段(100GHz~200GHz), O 波段(200GHz~300GHz)。而 ITU 的世界无线电大会(WARC)分配给空间无线电通信的频段中, Ku 波段为(10.7 GHz~13.5 GHz, 14.0~14.5 GHz。简称 11/14、12/14GHz); Ka 波段为(17.7GHz~20.2GHz; 27.5GHz~30.0GHz。简称 20/30GHz); V 波段为(40.5GHz~42.5GHz, 42.5GHz~43.5GHz, 47.2GHz~50.2GHz。简称 40GHz)。如此等等,不一而足。

1.1.3 毫米波的特点^{[1][2]}

概括起来,在无线电领域中,毫米波有三个基本特点:波长极短(频率极高);带宽很宽;在空间传播与大气环境关系密切。由此而构成其突出的优点和缺点。从通信领域的应用来看:

(1) 波长极短。毫米波与光波在频谱表上相距甚近,因而具有类似于光波的特性。此特性带来的优点是更有利于射频设备的小(微)型化和获得强的方向性。在后面有关的章节中我们将看到,许多微波元器件和电路的尺寸与工作波长是有密切关系的。基本规律是:波长越短,则其尺寸越小。例如,工作于 C 波段(3.22GHz~4.90GHz)的国产矩形金属波导 WJB-40 的横截面尺寸为(58.20×29.10)mm²,而工作于 Ka 波段(26.4GHz~40.4GHz)的 WJB-320 的横截面尺寸为(7.112×3.556)mm²,后者横截面积仅为前者的 1/67;又如工作于 3.1GHz 的三阶波导带通滤波器的尺寸(长×宽×高)为(17.88×7.2×3.4)cm³,而工作于 39.35GHz 的装在波导内的三阶鳍线带通滤波器的尺寸为(2.48×0.711×0.3556)cm³,后者体积仅为前者的 1/696.7。

如所周知,光波可以通过尺寸甚小的透镜、抛物面反射镜的聚集作用,形成很强的定向照射;毫米波也具有类似光波的特性,利用几何光学原理,构成各种天线,毫米波也可形成很强的定向辐射。就常用的反射面天线而言,其尺寸与工作波长极为密切。例如,工作于 44GHz 的 3 米天线,可获得 60dBi 的增益,其半功率波束宽度约为 0.16°;而工作于 8GHz 时为获得相同的天线增益和半功率波束宽度,天线口径需增加到 16.8 米。强的方向性意味着可将信号能量集中到需要发送的方向上,发射功率一定时,可获得高的等效全向有效辐射功率(EIRP),从而提高通信的有效性,并有利于系统间和系统内的电磁兼容性(EMC),这对于对地静止卫星通信系统尤为重要。由于对地静止同步轨道是惟一的,随着卫星数量的增多,特别是 C 波段和 Ku 波段卫星的广泛应用,相邻卫星系统间的干扰问题日益突出。为此,国际规定,卫星在发射前要进行频率协调和干扰估算。为了避免相互干扰,同频段卫星间要留有足够的间隔。可以想到,所使用的频段越低,要求的间隔越大。如图 1-2 所示,在所用网络 R 中,卫星和地球站天线的主波束越宽,旁瓣越高,则受干扰网络 R' 的干扰越严重;反之,R 网络对 R' 网络的干扰亦然。此情况下方向性强的天线将有利于轨道和频谱资源的有效利用。就是说,工作于毫米波的卫星可允许的间隔较小。例如,对地静止轨道上 30/20GHz (上/下行频率)卫星可按 1° 的间隔来配置,与 4/6GHz 系统相比,该频段卫星的数目可增加 2 倍。另外,也为在拥挤的静止轨道的某一区间中,插入更多新(毫米波)卫星提供了可能性。表 1-2 给出了不同频段某些参数的比较。

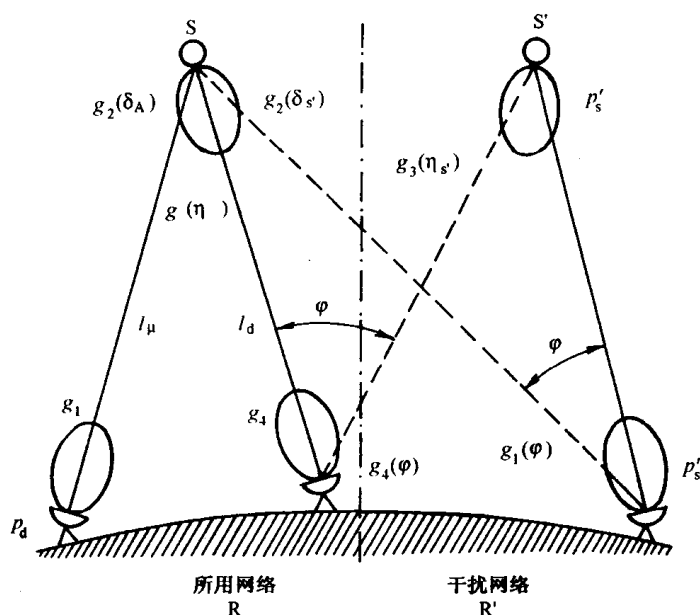


图 1-2 同频段卫星网络干扰示意图

表 1-2 不同频段某些参数的比较

参 数	频 段(GHz)		
	6/4	14/12	30/20
可用带宽(GHz)	0.8	0.8	3.5
在对地静止轨道上的最小间隔(度)	2~3	2	1
在 65° 弧度上可容纳的卫星数	22~23	33	66
覆盖美国一个州的点波束天线直径(m)	9	3	1.5

在军事通信中，通信天线方向性强对提高通信系统的抗干扰、抗截获能力也是十分有效的。

波长短在其应用中带来的“负面效应”是：为保证性能，设备加工精度要求极高(例如面天线的精度要求为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$)，元器件的寄生参数要减小到最低程度，这就造成了毫米波元器件和设备的价格昂贵；而小的尺寸又限制了元器件的功率容量。

(2) 穿越电离层的透射特性。地球的外围，有对流层、同温层、电离层和外层大气等，图 1-3 画出了它们在白昼的配置图。就无线电波的传播来说，位于大气上层的电离层的作用是举足轻重的。它对波长较长的电磁波产生强烈的折射和吸收。电离的程度越强，波长越长，这种作用越大。到了微波(包括毫米波)频段，其作用则可以忽略不计。于是，我们得出了图 1-4 所画的不同无线电波长的传播途径。它表明，包括毫米波在内的微波具有穿越电离层的透射特性。

实际上在微波和光波频段，对流层、同温层的影响也是不容忽视的。虽然大气和降雨等对毫米波传播影响很大，但毫米波仍具有不同程度的穿透能力，特别是在某些“大气窗口”，对毫米波的传播十分有利。

(3) 频带宽。按(30~300)GHz 这一范围计算，整个毫米波带宽高达 270 GHz，是短波频带的 10 000 倍，是厘米波总带宽的 10 倍……。实际上，考虑到大气的影响，通常选用大气吸收峰以外的“窗口”，其可供利用带宽如表 1-3 所示。

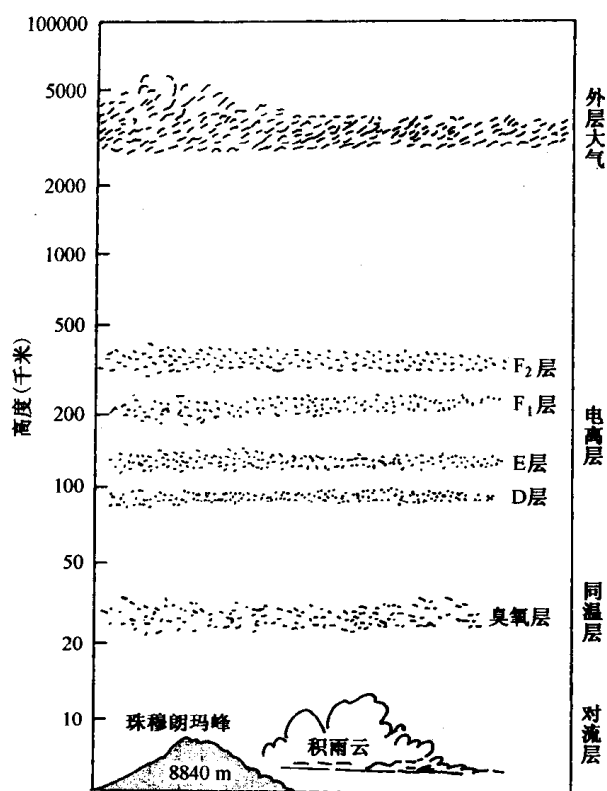


图 1-3 对流层、同温层和电离层的配置(白天)

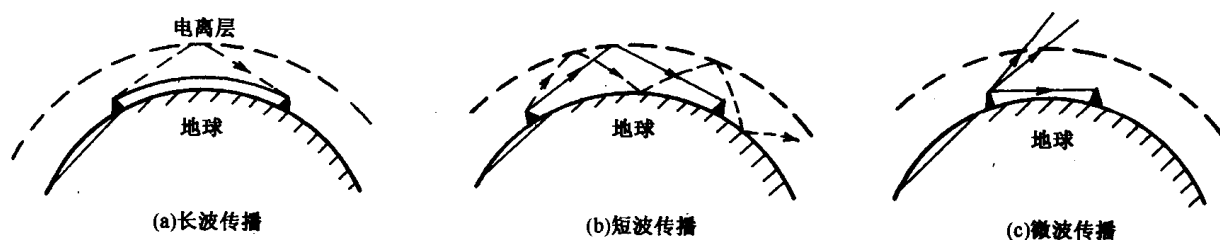


图 1-4 不同波长的传播途径

表 1-3 若干毫米波大气窗口的可用带宽

波长(mm)	8.6	3.2	2.1	1.4
频率(GHz)	35	94	140	220
带宽(GHz)	16	23	26	70

可见，常用的毫米波频谱资源仍然是十分丰富的，可用于“信息高速公路”，满足信息化时代中人们对高速数据、宽带图像业务等大容量信息传输与处理的需要。例如，利用 35 GHz 附近的“大气窗口”，可传送 3 000 路符合 MPEG-2 标准的彩色广播电视信号，或 250 000 路双向 ADPCM 数字电话。如再加上利用空分、正交极化技术等频率复用技术，则其同时支持的通信容量还要大得多。

在军事通信中，丰富的频带资源提供了抗干扰、抗截获的另一有效途径。采用带宽、超宽带扩频技术，可获得极高的处理增益。例如，对于 4.8 kb/s 的低速数据或话音，利用 2 GHz 的射频带宽对其扩频(FH)，则处理增益高达 56 dB，若加上采用调零天线技术，对干扰可产生 30 dB 的调零深度(即干扰抑制制度)，系统的干扰容限为 86 dB，这是令干扰者“望而却步”