



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电磁场理论 与微波技术基础

(第2版)

DIANCICHANG LILUN  
YU WEIBO JISHU JICHU



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电磁场理论与微波技术基础

(第2版)

周希朗 编著

东南大学出版社

·南京·

## 内 容 简 介

本书讲述“电磁场与微波技术”的基本概念、基本分析与计算方法以及基本原理。本书力求内容精练,物理概念清晰,文字易懂,便于自学。

本书分上、下两篇,共14章。上篇8章:矢量分析、静电场、恒定电场、静磁场、时变电磁场、平面电磁波、规则传输系统(Ⅰ)——金属波导以及天线(Ⅰ)——电磁波的辐射和接收的理论基础;下篇6章:传输线理论、规则传输系统(Ⅱ)——集成传输系统、微波谐振腔、微波网络基础、微波无源元件以及天线(Ⅱ)——线天线和面天线。本书每章均精选了适量的例题和习题,例题和习题涵盖核心内容,选题广泛,难易适中。

本书可供工科信息工程、电子科学与技术等专业的本科生、专科生以及高职学生用作教材,也可供高校有关专业的学生和有关科技人员用作参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁场理论与微波技术基础/周希朗编著.—2版.  
—南京:东南大学出版社,2010.2  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5641-2086-3

I. ①电… II. ①周… III. ①电磁场—理论—高等学校—教材②微波技术—高等学校—教材 IV. ①0441.4  
②TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 026798 号

### 电磁场理论与微波技术基础(第2版)

编 著	周希朗		
责任编辑	李 玉	责任印制	张文礼
文字编辑	李 玉 赵利华	封面设计	毕 真
出版发行	东南大学出版社		
社 址	南京四牌楼2号(邮编:210096)		
出 版 人	江 汉		
经 销	江苏省新华书店		
印 刷	扬中市印刷有限公司		
开 本	787mm×1092mm 1/16		
印 张	32.25	字 数	720千字
版 次	2010年2月第2版 2010年2月第1次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5641-2086-3		
印 数	1—3000册		
定 价	54.00元		

(凡东大版图书因印装质量问题,请直接向读者服务部调换。电话:025-83792328)

## 第 2 版前言

本书是为高等学校工科电子类相关专业的本科生学习“电磁场与波”、“微波技术与天线”或“电磁场与微波技术”课程而编写的教学用书,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是在 2004、2005 年出版的《电磁场理论与微波技术基础》的基础上重新编写的,共 14 章,分上、下两篇。上篇包括 8 章,是原教材上册中的“电磁场理论基础”部分,本版将原教材上册中的内容按照先“静态”后“时变”的次序重新改写或编排。其中第 1 章为矢量分析,第 2、3 和 4 章依次为静电场、恒定电场和静磁场,第 5、6 和 7 章则分别是时变电磁场、平面电磁波和规则传输系统(I)——金属波导,第 8 章为天线(I)——电磁波的辐射和接收的理论基础。下篇包括 6 章,是原教材下册中的“微波技术基础”部分。其中第 9 章为传输线理论,第 10、11 和 12 章依次是规则传输系统(II)——集成传输系统、微波谐振腔和微波网络基础,第 13 和 14 章则是微波无源元件和天线(II)——线天线和面天线。

本书的参考教学学时数为 90 学时(上、下篇各 45 学时),若学时数为 72 或 63 等时,则可根据教学需要自由取舍各章加注“\*”号的部分内容。删除部分内容后,基本不会影响本书内容的连贯性。

编者以“重基础,宽口径”的教学方针为指导,适当拓宽本书的内容覆盖面。全书条理清楚,深入浅出,便于教学和自学。修订后的教材比原教材更突出了基本概念和基本理论,加强了集成传输系统及其无源元件等方面的内容,调整了部分章节的例题和习题。

在本书的编写和修订过程中,本校电子信息与电气工程学院、电子工程系和射频与微波技术研究中心的有关领导和同事们曾给予多方面的鼓励与支持,东南大学出版社的李玉老师为本书的出版提供无私的帮助并付出辛勤劳动,书稿承蒙东华大学陈光教授仔细审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。有关的博士生、硕士生和本科生对本书的编写和修订也提供过一定的帮助。对上述在本书的编写和修订工作中曾给予鼓励、支持和帮助的同志们,编者一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限和时间仓促,书中难免存在疏漏与错误,欢迎读者提出批评和指正。

编者  
2009. 11

# 目 录

绪 论	( 1 )
-----	-------

## 上篇 电磁场理论基础

第 1 章 矢量分析	( 9 )
1.1 矢量的表示及其代数运算	( 9 )
1.1.1 矢量的表示及距离向量	( 9 )
1.1.2 矢量的代数运算	( 10 )
1.2 标量场和矢量场	( 12 )
1.3 标量场的梯度	( 13 )
1.3.1 梯度的定义	( 13 )
1.3.2 梯度运算的基本公式	( 15 )
1.4 矢量场的通量、散度与散度定理	( 15 )
1.4.1 通量	( 15 )
1.4.2 散度的定义	( 16 )
1.4.3 散度运算的基本公式	( 16 )
1.4.4 散度定理	( 16 )
1.5 矢量场的环量、旋度与斯托克斯定理	( 17 )
1.5.1 环量	( 17 )
1.5.2 旋度的定义	( 18 )
1.5.3 旋度运算的基本公式	( 18 )
1.5.4 斯托克斯定理与旋度定理	( 18 )
1.6 标量场、矢量场的重要性质和定理	( 19 )
1.6.1 两个重要性质	( 19 )
1.6.2 三个重要定理	( 21 )
*1.7 正交曲线坐标系	( 22 )
1.7.1 正交曲线坐标系的单位矢量和度量因子	( 23 )
1.7.2 正交曲线坐标系中场论的表达式	( 27 )
习 题	( 28 )
第 2 章 静电场	( 30 )
2.1 真空中静电场的基本方程	( 30 )
2.1.1 静电场的源——电荷和电荷密度	( 30 )
2.1.2 真空中静电场的基本方程	( 31 )
2.2 电位及其电位方程	( 35 )

2.2.1	电位	( 35 )
2.2.2	电位方程	( 37 )
2.3	电介质中的静电场	( 37 )
2.3.1	电偶极子的电位和电场强度	( 37 )
2.3.2	电介质中的静电场	( 38 )
2.4	静电场中的导体与带电系统中的电容	( 43 )
2.4.1	静电场中导体的特点	( 43 )
2.4.2	电容	( 44 )
2.5	静电场的边界条件	( 44 )
2.5.1	场矢量 $D$ 和 $E$ 的边界条件	( 45 )
2.5.2	电位 $\phi$ 的边界条件	( 46 )
2.6	静电场边值问题的解法	( 47 )
*2.6.1	分离变量法	( 48 )
2.6.2	镜像法	( 52 )
2.7	静电场的能量、能量密度及电场力	( 59 )
2.7.1	静电场的能量和能量密度	( 59 )
*2.7.2	用虚位移法求电场力	( 61 )
	习 题	( 63 )
<b>第 3 章</b>	<b>恒定电场</b>	( 67 )
3.1	恒定电场的源——恒定电流	( 67 )
3.1.1	恒定电流和电流密度	( 67 )
3.1.2	电荷守恒定律(电流连续性方程)	( 69 )
3.2	恒定电场的形成	( 70 )
3.3	恒定电场的基本方程	( 71 )
3.4	恒定电场的边界条件	( 72 )
*3.5	损耗功率和焦耳定律	( 73 )
*3.6	静电比拟	( 74 )
	习 题	( 76 )
<b>第 4 章</b>	<b>静磁场</b>	( 78 )
4.1	真空中静磁场的基本方程	( 78 )
4.1.1	毕奥—萨伐尔定律与磁通量密度	( 78 )
4.1.2	磁通量与磁通连续性原理	( 80 )
4.1.3	安培环路定律与磁场强度	( 81 )
4.2	静磁场的矢量磁位及其方程	( 82 )
4.2.1	矢量磁位	( 82 )
4.2.2	矢量磁位方程	( 83 )
4.3	磁介质中的静磁场	( 84 )
4.3.1	磁偶极子的矢量磁位和磁通量密度	( 84 )
4.3.2	磁介质中的静磁场	( 85 )

4.4 静磁场的边界条件 .....	( 90 )
4.4.1 场矢量 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 的边界条件 .....	( 90 )
4.4.2 矢量磁位 $\mathbf{A}$ 的边界条件 .....	( 91 )
4.5 电感 .....	( 92 )
4.5.1 自感 .....	( 92 )
4.5.2 互感 .....	( 94 )
4.6 静磁场的能量、能量密度及磁场力 .....	( 95 )
4.6.1 静磁场的能量与能量密度 .....	( 95 )
*4.6.2 用虚位移法求磁场力 .....	( 97 )
习 题 .....	( 99 )
<b>第 5 章 时变电磁场</b> .....	(102)
5.1 电磁感应定律与全电流定律 .....	(102)
5.1.1 电磁感应定律 .....	(102)
5.1.2 全电流定律 .....	(104)
5.2 麦克斯韦方程组 .....	(105)
5.2.1 微分形式的麦克斯韦方程组 .....	(105)
5.2.2 时变场的本构关系 .....	(106)
5.2.3 积分形式的麦克斯韦方程组 .....	(107)
5.3 时变电磁场的边界条件 .....	(107)
5.3.1 一般情况 .....	(107)
5.3.2 特殊情况 .....	(109)
5.4 坡印亭定理和坡印亭矢量 .....	(109)
5.4.1 坡印亭定理 .....	(109)
5.4.2 坡印亭矢量 .....	(110)
5.5 波动方程和电磁位函数 .....	(112)
5.5.1 波动方程 .....	(112)
*5.5.2 电磁位函数的方程及其解 .....	(112)
5.6 时谐(正弦)电磁场的复数表示 .....	(116)
5.6.1 复数形式的麦克斯韦方程组 .....	(117)
5.6.2 复数形式的边界条件 .....	(117)
5.6.3 复矢量 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的矢量亥姆霍兹方程 .....	(117)
5.6.4 复坡印亭矢量和复坡印亭定理 .....	(118)
习 题 .....	(121)
<b>第 6 章 平面电磁波</b> .....	(123)
6.1 理想媒质中的平面波 .....	(123)
6.1.1 平面波的电磁场 .....	(123)
6.1.2 平面波的传播特性参量与传播特性 .....	(125)
6.1.3 沿任意方向传播的平面波 .....	(127)
6.2 导电媒质中的平面波 .....	(129)

6.2.1	导电媒质的分类	(129)
6.2.2	平面波在导电媒质中的传播特性	(131)
6.3	平面波的极化	(135)
6.3.1	线极化	(136)
6.3.2	圆极化	(136)
6.3.3	椭圆极化	(137)
*6.4	平面波的反射与透射	(139)
6.4.1	平面波在两种媒质的平面交界面上的斜入射	(139)
6.4.2	平面波在两种媒质的平面交界面上的垂直入射(正入射)	(144)
*6.5	全反射和全透射	(150)
6.5.1	全反射	(150)
6.5.2	全透射	(153)
	习 题	(154)
<b>第7章</b>	<b>规则传输系统( I )——金属波导</b>	(157)
7.1	柱形传输系统中的导波及其特性	(158)
7.1.1	柱形传输系统中导波的电磁场	(158)
7.1.2	导波的分类及其 TEM 模、TM 模和 TE 模的传输特性	(160)
7.2	矩形波导	(169)
7.2.1	矩形波导中的模式及其场分布	(169)
7.2.2	传输特性	(172)
7.2.3	矩形波导中的主模——TE <sub>10</sub> 模(H <sub>10</sub> 模)	(173)
7.2.4	矩形波导的传输功率、导体衰减与尺寸选择	(178)
*7.2.5	矩形波导中高次模式的场结构	(181)
*7.2.6	脊形波导简介	(183)
7.3	圆形波导	(183)
7.3.1	亥姆霍兹方程在圆柱坐标系中的解	(184)
7.3.2	圆波导中的模式及其传输特性	(185)
7.3.3	圆波导的传输功率、导体衰减和尺寸选择	(187)
7.3.4	圆波导中的常用模式	(188)
*7.3.5	圆波导中高次模式的场结构	(191)
7.4	同轴线	(193)
7.4.1	同轴线中的主模——TEM 模	(193)
7.4.2	同轴线中的高次模式	(194)
7.4.3	同轴线的传输功率、衰减和尺寸选择	(197)
7.5	金属波导的激励与耦合	(198)
	习 题	(200)
<b>第8章</b>	<b>天线( I )——电磁波的辐射和接收的理论基础</b>	(203)
8.1	电磁波辐射的基本概念与电磁对偶性原理	(203)
8.1.1	辐射的基本概念	(203)



8.1.2	时谐场的滞后位 .....	(204)
*8.1.3	电磁对偶性原理 .....	(205)
8.2	基本振子的辐射 .....	(206)
8.2.1	基本电振子的辐射 .....	(206)
*8.2.2	基本磁振子的辐射 .....	(210)
8.3	天线的基本参数 .....	(213)
8.3.1	天线的方向图及其有关参数 .....	(213)
8.3.2	效率 .....	(216)
8.3.3	增益系数 .....	(216)
8.3.4	有效长度 .....	(217)
8.3.5	输入阻抗 .....	(217)
8.3.6	天线的极化 .....	(217)
8.4	对称振子天线 .....	(218)
8.4.1	对称振子的电流分布与远区辐射场 .....	(218)
8.4.2	对称振子的方向图与辐射电阻 .....	(219)
8.4.3	对称振子的有效长度 .....	(222)
8.5	天线阵 .....	(222)
8.5.1	二元阵 .....	(223)
8.5.2	导体对天线的影响 .....	(228)
8.5.3	均匀直线阵 .....	(229)
*8.6	互易定理与接收天线 .....	(232)
8.6.1	互易定理 .....	(232)
8.6.2	接收天线 .....	(233)
习 题	.....	(238)

## 下篇 微波技术基础

第9章	传输线理论 .....	(243)
9.1	传输线的分布参数及其等效电路 .....	(243)
9.2	一般形式传输线的方程及其解 .....	(244)
9.2.1	一般形式传输线的方程 .....	(244)
9.2.2	均匀传输线方程的解 .....	(246)
9.2.3	传输线的等效电路参量和工作特性参量 .....	(248)
9.3	输入阻抗和反射系数 .....	(252)
9.3.1	输入阻抗 .....	(252)
9.3.2	反射系数 .....	(252)
9.3.3	输入阻抗与反射系数间的关系 .....	(253)
9.4	均匀无耗传输线端接不同负载时的工作状态 .....	(254)
9.4.1	行波工作状态 .....	(254)
9.4.2	纯驻波工作状态 .....	(256)

9.4.3	行驻波工作状态 .....	(258)
9.5	传输线的传输功率与回波损耗 .....	(262)
9.5.1	传输功率 .....	(262)
9.5.2	回波损耗和插入损耗 .....	(263)
9.6	圆图 .....	(265)
9.6.1	阻抗圆图 .....	(265)
9.6.2	导纳圆图 .....	(268)
9.7	传输线的阻抗匹配 .....	(270)
9.7.1	阻抗匹配的概念 .....	(270)
9.7.2	$\lambda/4$ 阻抗变换器 .....	(271)
9.7.3	支节匹配器 .....	(273)
	习题 .....	(275)
<b>第 10 章</b>	<b>规则传输系统(II)——集成传输系统 .....</b>	<b>(281)</b>
10.1	TEM 模和准 TEM 模传输线 .....	(282)
10.1.1	微带传输线 .....	(282)
*10.1.2	共面波导 .....	(300)
*10.1.3	基片集成波导 .....	(301)
*10.2	非 TEM 模传输线 .....	(302)
10.2.1	槽线 .....	(302)
10.2.2	鳍线 .....	(303)
10.3	开放式介质波导 .....	(303)
10.3.1	混合模的特点 .....	(304)
10.3.2	圆形介质波导 .....	(304)
*10.3.3	其他开放式介质波导简介 .....	(311)
*10.4	半开放式介质波导 .....	(311)
10.4.1	H 波导 .....	(311)
10.4.2	G 波导 .....	(312)
10.4.3	无辐射介质(NRD)波导 .....	(312)
	习题 .....	(313)
<b>第 11 章</b>	<b>微波谐振腔 .....</b>	<b>(315)</b>
11.1	金属谐振腔的基本特性及其参量 .....	(315)
11.1.1	基本特性 .....	(315)
11.1.2	基本参量 .....	(316)
11.2	金属波导型谐振腔 .....	(320)
11.2.1	矩形谐振腔 .....	(320)
11.2.2	圆柱形谐振腔 .....	(325)
11.2.3	同轴形谐振腔 .....	(331)
11.2.4	应用实例——波长计 .....	(335)
*11.2.5	金属谐振腔的微扰 .....	(336)

*11.3	微带谐振腔 .....	(339)
*11.4	谐振腔的等效电路、耦合与激励 .....	(341)
11.4.1	孤立谐振腔的等效电路 .....	(341)
11.4.2	谐振腔的激励与耦合 .....	(343)
习 题	.....	(344)
<b>第 12 章</b>	<b>微波网络基础</b> .....	(347)
12.1	等效原理 .....	(348)
12.1.1	色散传输系统等效为均匀传输线 .....	(348)
12.1.2	阻抗、电压和电流的归一化 .....	(350)
12.1.3	不均匀性区域等效为网络 .....	(351)
12.2	阻抗、导纳和转移矩阵 .....	(354)
12.2.1	阻抗和导纳矩阵 .....	(354)
12.2.2	转移矩阵 .....	(356)
12.3	散射矩阵 .....	(360)
12.3.1	散射参量的定义 .....	(360)
12.3.2	$[S]$ 同 $[z]$ , $[y]$ 及 $[a]$ (或 $[Z]$ , $[Y]$ 及 $[A]$ )间的转换关系 .....	(363)
12.3.3	散射矩阵的性质 .....	(365)
12.3.4	参考面移动对网络散射参量的影响 .....	(368)
12.3.5	散射参量的测量 .....	(369)
12.4	基本电路单元的网络参量 .....	(370)
*12.5	二端口网络的工作特性参量 .....	(374)
12.5.1	电压传输系数 .....	(374)
12.5.2	相移 .....	(374)
12.5.3	插入衰减和功率(工作)衰减 .....	(376)
12.5.4	输入驻波系数 .....	(377)
习 题	.....	(378)
<b>第 13 章</b>	<b>微波无源元件</b> .....	(383)
13.1	一端口互易元件 .....	(383)
13.1.1	匹配负载 .....	(383)
13.1.2	短路活塞 .....	(384)
13.2	二端口互易元件 .....	(385)
13.2.1	连接元件 .....	(385)
13.2.2	衰减元件(衰减器) .....	(387)
13.2.3	相移元件(移相器) .....	(388)
13.2.4	用矩形波导不均匀性实现的元件 .....	(389)
*13.2.5	微波集成电路中的集中电路元件和用不均匀性实现的元件 .....	(390)
13.2.6	阻抗匹配和变换元件 .....	(393)
*13.2.7	模式变换元件(转换接头) .....	(396)
*13.2.8	微波滤波器 .....	(398)

13.3	三端口互易元件	(409)
13.3.1	无耗三端口网络的基本性质	(409)
13.3.2	波导T形接头	(410)
13.3.3	两路功率分配器	(411)
13.4	四端口互易元件	(413)
13.4.1	无耗互易四端口网络的基本性质	(413)
13.4.2	波导双T和魔T	(414)
*13.4.3	定向耦合器	(416)
*13.5	微波非互易元件——微波铁氧体器件	(424)
13.5.1	相对张量磁导率和铁磁谐振	(425)
13.5.2	法拉第旋转效应	(427)
13.5.3	几种常用的铁氧体器件	(428)
	习 题	(432)
<b>第14章</b>	<b>天线(Ⅱ)——线天线和面天线</b>	<b>(437)</b>
*14.1	线天线	(437)
14.1.1	对称振子的输入阻抗、馈电方法及折合振子	(437)
14.1.2	直立振子天线	(442)
14.1.3	水平对称振子天线	(445)
14.1.4	螺旋天线	(447)
14.1.5	引向天线	(450)
14.1.6	非频变天线	(455)
*14.2	面天线	(458)
14.2.1	基本面元和基本缝隙的辐射	(458)
14.2.2	平面口径的辐射	(461)
14.2.3	喇叭天线	(468)
14.2.4	旋转抛物面天线	(473)
14.2.5	双反射面天线	(479)
14.2.6	隙缝天线	(483)
14.2.7	微带天线	(485)
	习 题	(489)
<b>附录A</b>	<b>常用正交曲线坐标系中的场论恒等式</b>	<b>(492)</b>
<b>附录B</b>	<b>常用材料的参数和物理常数</b>	<b>(494)</b>
<b>附录C</b>	<b>标准矩形波导参数和型号对照</b>	<b>(496)</b>
<b>附录D</b>	<b>同轴线参数表</b>	<b>(497)</b>
<b>附录E</b>	<b>各种电路单元的归一化网络参量</b>	<b>(499)</b>
<b>附录F</b>	<b>阻抗圆图</b>	<b>(500)</b>
	<b>参考文献</b>	<b>(501)</b>

# 绪 论

自从英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell)于1873年根据法拉第(M. Faraday)等前人的研究成果创造性地提出电磁场完整方程组以来,电磁场和微波技术(包括天线技术)走过了一百多年持续发展的路程,形成了一套完整的理论体系、众多应用领域和一系列新的边缘科学领域。特别是近几十年来,雷达、通信(包括卫星通信)、导航、遥感遥测、射电天文等的迅速发展,特别是移动通信、计算机、网络技术、射频识别(RFID)、全球定位系统(GPS)、超宽带(UWB)无线通信、电磁兼容、智能天线、人工电磁材料、电子对抗以及高功率微波能武器等领域的飞速发展和崛起,向射频/微波技术提出了许多崭新的研究课题,也使电磁场与微波技术的理论和技术不断得到丰富、完善和发展,新的理论和技术层出不穷。因此,电磁场与微波技术是现代高科技中应用最广,发展最快的一个热点研究领域。

在当今信息的世界,微波波谱已成为一种非常宝贵的资源,电磁场与微波技术无论在国防建设、科学研究、工农业生产还是在日常生活中应用广泛。因此,了解、熟悉或掌握同电磁场与微波技术(包括天线技术)有关的知识很有必要。

下面先介绍微波波段的划分及其特点,然后简单阐述微波的应用以及天线的功能和分类,最后提供一个有代表性的应用实例——卫星通信系统。

## §.1 微波波段的划分及其特点

### §.1.1 微波波段的划分

微波同普通的无线电波(超长波、长波、中波、短波、超短波)、可见光和不可见光、 $x$ 射线、 $\gamma$ 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。微波是电磁波谱中介于普通无线电波与红外线之间的波段,属于无线电波中波长最短(频率最高)的波段。通常指频率为300 MHz(波长为1 m)至3 000 GHz(波长为0.1 mm)范围内的电磁波,并将其划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波四个分波段。在通信和雷达工程中,常将这四个分波段划分得更细,且使用拉丁字母来代表各个“细分波段”的记号,如用“C”代表5 cm波段,用“X”代表3 cm波段等。表1给出了微波在电磁波谱中的位置,表2则提供了常用波段的划分情况。

微波的主要特点是其波长可同普通电路或元件的尺寸相比拟,即为分米、厘米、毫米量级,其他波段的波都不具有这个特点。普通无线电波的波长大于或远大于电路或元件的尺寸,电路或元件内部的波的传播过程可忽略不计,故可用路的方法进行研究。光波、 $x$ 射线、 $\gamma$ 射线的波长则远小于电路或元件的尺寸,甚至可与分子或原子的尺寸相比拟,因此难以用电磁的或普通电子学的方法去研究它们。由于微波具有诸多不同于普通无线电波和光波的特点,因此人们通常将微波波段从电磁波谱中划分出来进行单独研究。

表1 电磁波谱

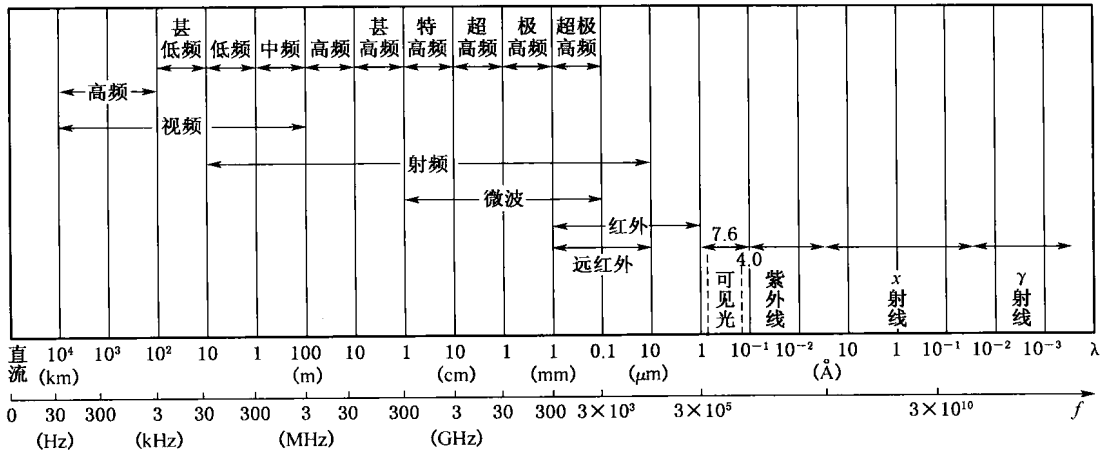


表2 常用微波波段的划分

波段符号	频率(GHz)	波段符号	频率(GHz)
UHF	0.3~1.12	Ka	26.5~40.0
L	1.2~1.7	Q	33.0~50.0
LS	1.7~2.6	U	40.0~60.0
S	2.6~3.95	M	50.0~75.0
C	3.95~5.85	E	60.0~90.0
XC	5.85~8.2	F	90.0~140.0
X	8.2~12.4	G	140.0~220.0
Ku	12.4~18.0	R	220.0~325.0
K	18.0~26.5		

### §.1.2 微波的特点

#### (1) 似光性

由于微波的波长很短,其波长范围与地球上一般物体的尺寸相比处于同一数量级或更小,当微波照射到波长远小于物体(如飞机、舰船、导弹、建筑物等)上时,将产生强烈的反射,这一点同光波很相似。即微波能像光线一样传播,且遵循波动的基本规律。如多普勒(Doppler)效应、惠更斯(Huygens)原理等。雷达等系统就基于这一特性对飞机、舰船或车辆等目标进行精确定位、跟踪、管制以及导引等。

#### (2) 四种基本效应

##### ① 渡越时间效应

所谓渡越时间,是指真空管里的电子从阴极渡越到阳极或晶体管里的载流子渡越基区的时间,这个时间十分短暂,一般为  $10^{-9}$  s,与频率为几 MHz 的振荡周期相比可忽略不计。在微波波段,低频的真空管或晶体管根本无法在微波频率上工作。因此微波波段要采用原理和结构上全新的器件,在这些器件中则有效地利用了电子的渡越时间效应。

## ② 辐射效应

当一根导线的长度与加在其上的高频电流的波长相比拟时,它将显著地向空间辐射能量,如同一根天线一样。这种辐射效应也称为天线效应。

## ③ 趋肤效应

众所周知,交流电有趋肤效应,电流流动趋向于导体表面的薄层。趋肤效应在较低频段并不显著,但在微波波段却影响很大,趋肤深度几乎趋于零(如在 5 GHz 时铜的趋肤深度约为 1%毫米),导线呈现的电阻很大。这就是采用金属波导且将其内壁表面镀银或镀金的原因。

## ④ 热效应

有耗物质中的分子受到微波辐射后会相互摩擦而引起物质的温度升高,这就是微波的热效应。因此,水、含水或含脂肪的物质对微波有吸收作用,利用物质吸收微波所产生的热效应可对其进行加热。因为各种物质对微波的吸收能力不同,所以微波对各种物质的加热具有选择性。

### (3) 雨、雪等对微波会产生吸收和反射

雨、雪、云、雾对微波都有程度不同的吸收和反射。利用这一特点,可用厘米波或毫米波雷达来观测雨、雪、云、雾的存在和流动。气象雷达就是利用这一特性来预报邻近地区的天气变化情况。

### (4) 微波可穿透电离层

我们知道,地球被一层厚厚的大气所包围,由于受太阳的辐射,距离地球表面约 60~400 km 范围内的高空大气被电离,形成一个电离层。一般频率较低的无线电波不能穿透电离层,它们将被电离层反射回来。由于微波的频率很高,它能穿透电离层而不被电离层所反射。于是人们利用这个特点,使卫星通信成为现实。

### (5) 微波的信息容量大

在微波波段中包含着 10 000 个长、中、短和超短波波段。这表明在一个不太宽的相对频带中可传送较多的信息量,因而微波容纳的信息量很大。基于这一特点,模拟特别是数字微波通信得到了巨大的发展。

### (6) 微波的散射特性

当微波入射到物体上时,会在除入射方向以外的方向上出现散射,散射是入射波和该物体相互作用的结果,所以散射波携带了大量的物体的信息。基于微波的散射特性,人们可以通过提取不同物体的散射特性信息,对物体进行识别。微波遥感和微波成像就基于这一特性。

## §.2 微波的应用

微波技术是在第二次世界大战期间由于军事雷达的需要而发展起来的,目前已应用于前述的军事和民用等各个领域。这里仅扼要介绍几种常见的微波应用。

雷达(Radar,即无线检测和测距)是微波最广泛应用的领域之一。雷达的工作频率一般在 3~100 GHz 范围内,根据作用的不同可分为警戒雷达、炮瞄雷达、空中管制雷达、导航雷达、测速雷达、汽车避撞雷达、成像雷达以及辐射计(即无源雷达)等,利用功能各不相同雷

达可以实现对被测目标的测距、测向、测速、成像以及识别等。早期的雷达,只被用来侦察敌情,搜索敌机或战舰。随着空间技术发展的需要,现代的雷达不仅能够确定快速飞行体的坐标,而且能够跟踪卫星,侦察洲际导弹、宇宙火箭以及航天飞机等。频率越高,雷达的设备和天线越轻巧,因而越适合于移动装置。目前对工作频率高、小型化雷达的研究十分活跃,这些小型雷达可以装在人造卫星或宇宙飞船上,其优点是:侦察面积大、鉴别能力高、提供侦测结果快等。

通信特别是移动通信也是微波广泛应用的领域。为了有足够的信息容量,现代通信系统几乎无例外地工作在微波波段,例如无线通信(包括移动通信)、中继通信、卫星通信、射频识别、有线传输通信(包括电力载波通信)和散射通信等。以数字移动通信为例,早期的蜂窝移动通信的频段主要是 900 MHz(如 GSM900(890~960 MHz))等,同时也使用 1 800 MHz 频段(如 GSM1800(1 710~1 880MHz)频段)等。随着移动通信业务的不断扩展,移动通信的工作频段已从最初的第二代(2G)数字移动通信的 GSM850(824~894 MHz)、GSM900 等频段逐渐扩展到 DCS(1 710~1 880)MHz、PCS(1 850~1 990)MHz 以及 UMTS(1 920~2 170)MHz 频段等,以至近些年扩展到第三代 3G 数字移动通信的 WCDMA (1 885~2 200)MHz、CDMA2000 等以及 UWB(3.1~10.6 GHz)系统频段。

微波加热是微波的另一重要应用。尽管第二次世界大战结束后就有人提出利用微波对材料进行加热的设想,但直到 20 世纪 70 年代初才打开微波加热的局面。首先从加工食品方面取得成功,尔后微波炉的出现又大大推动了微波加热的应用范围。与普通加热相比,微波加热具有加热均匀、速度快、透热深度大、热效率高以及可进行选择性加热和容易实现自动控制等优点。微波加热正日益广泛地应用于食品、化学、木材加工、橡胶、塑料、造纸、制药、印刷等工业中。在农业方面,可用微波烘干谷物、灭虫、处理蚕卵、除草等。

微波在生物医学方面的应用已呈现出具有广泛的应用潜力。医学上,利用微波的热效应和非热效应,对生物体作局部的微波照射,可以提高局部组织的新陈代谢,并诱导产生一系列的物理化学变化而达到镇痛治疗、抗炎脱敏、促进生长等作用,从而可治疗一些疾病。同时,人们已利用微波来治疗肿瘤。由于肿瘤与正常组织的损耗角正切不同,因此肿瘤与正常组织得到微波场的选择性加热,当控制肿瘤部位的温度处于 43~47℃ 范围内时,癌细胞即可被杀伤,来达到治疗的目的。此外,利用微波还可诊断一些疾病。应指出,微波的热效应作用于人体后,对人体的伤害尚未来得及自我修复之前再次受到辐射时,其伤害程度就会发生累积,从而会成为永久性病态,也可能会危及生命。因此,大功率的微波辐射对人体是有害的,应采取适当的措施来加以防护或避免长时间高剂量的微波辐射或无线通信网络以及其他无线电设备的环境中。

### §.3 天线的功能与分类

凡通过辐射和接收电磁波来完成其功能的无线电设备如通信、广播、雷达和导航等,都备有天线。在这些设备中,天线作为电磁波的“出口”与“入口”,能够朝所需要的方向辐射电磁波或只接收来自某些方向的电磁波。以如图 1 所示的无线通信系统为例,经过发射机所产生的已调制的高频电

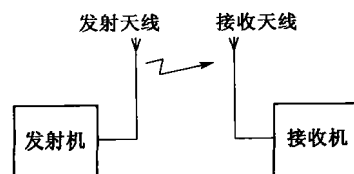


图 1 无线通信系统示意图



流能量(或导波能量)经馈线传输到发射天线,通过天线将其转换为同频率的电磁波能量,并向某些方向辐射出去。电磁波到达接收天线后被天线所接收,将电磁波能量又转换回调制的高频电流能量,并经馈线输送至接收机的输入端。因此,天线是任何无线电设备中用以辐射或接收电磁波的必不可少的重要组成部分之一。天线的选择与设计是否合理,往往对整个无线电系统执行其功能的质量有很大的影响。

随着无线电技术特别是现代移动通信技术的飞速发展,对天线提出了许多更高、更新的要求,天线的功能也不断有了新的突破。除了完成高频能量转换外,天线系统还能对传递的信息进行一定的加工和处理,例如单脉冲天线、自适应天线、多波束天线以及智能天线等。

天线的种类繁多。按用途的不同,可将天线分为通信天线、广播电视天线、雷达天线等;按工作波长的不同,可将天线分为长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线、微波天线以及毫米波天线等;按极化特性的不同,可将天线分为线极化天线、圆极化天线、椭圆极化天线以及双、多极化天线等;按频带宽窄的不同,可将天线分为窄带天线、宽带天线以及非频变天线等;按工作原理不同,可将天线分为线天线和面天线。当然,天线还有一些其他的分类方法。

研究天线的问题,就是研究天线所产生的空间电磁场分布以及由其分布所决定的天线的特性。求解天线问题的实质,就是求解满足特定边界条件的麦克斯韦方程组的解。严格求解天线问题是非常复杂和困难的,因此,对具体天线问题往往将条件理想化,采取近似处理的方法来获得所需的结果。目前,随着计算机仿真软件不断涌现,人们往往依靠电磁仿真软件进行辅助分析、设计,从而可以更准确地处理天线问题。

## §.4 应用实例

作为微波技术与天线的-一个应用实例,图 2 示出了一个实际卫星通信系统。在此系统

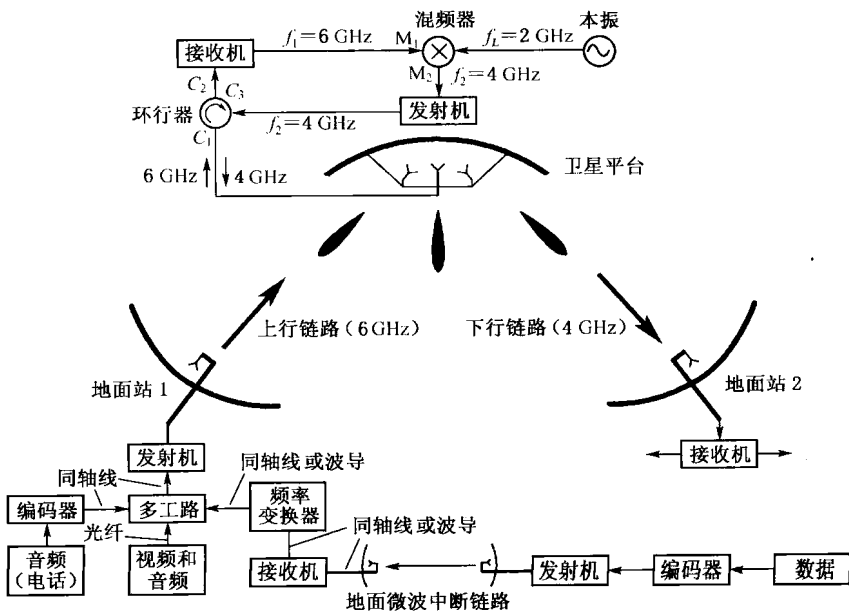


图 2 卫星通信系统