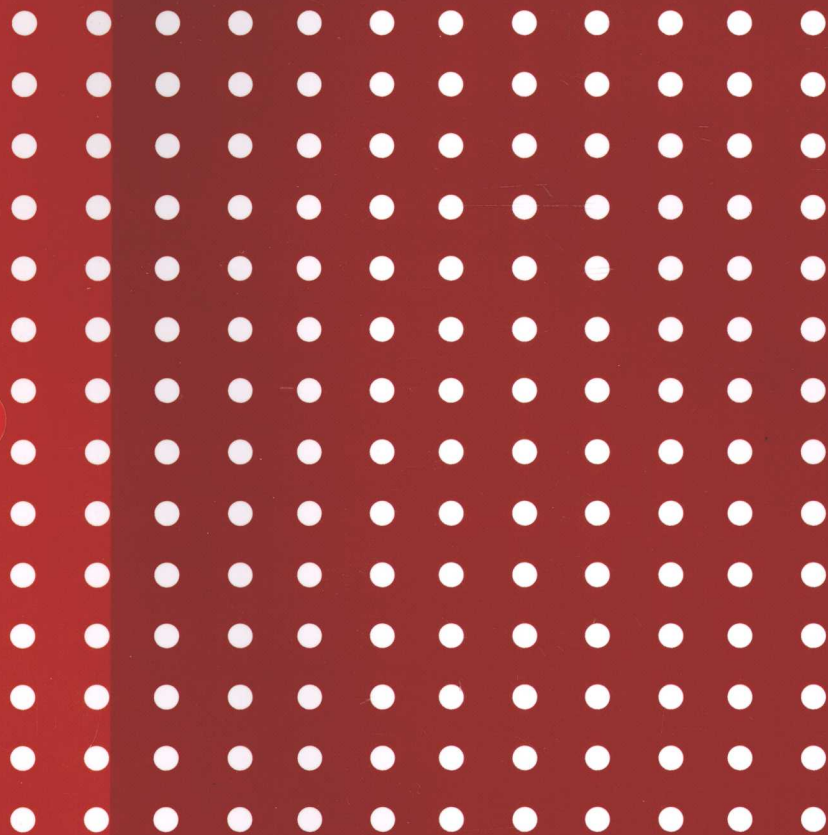


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

# 微波技术基础 (第二版)

杨雪霞 编著



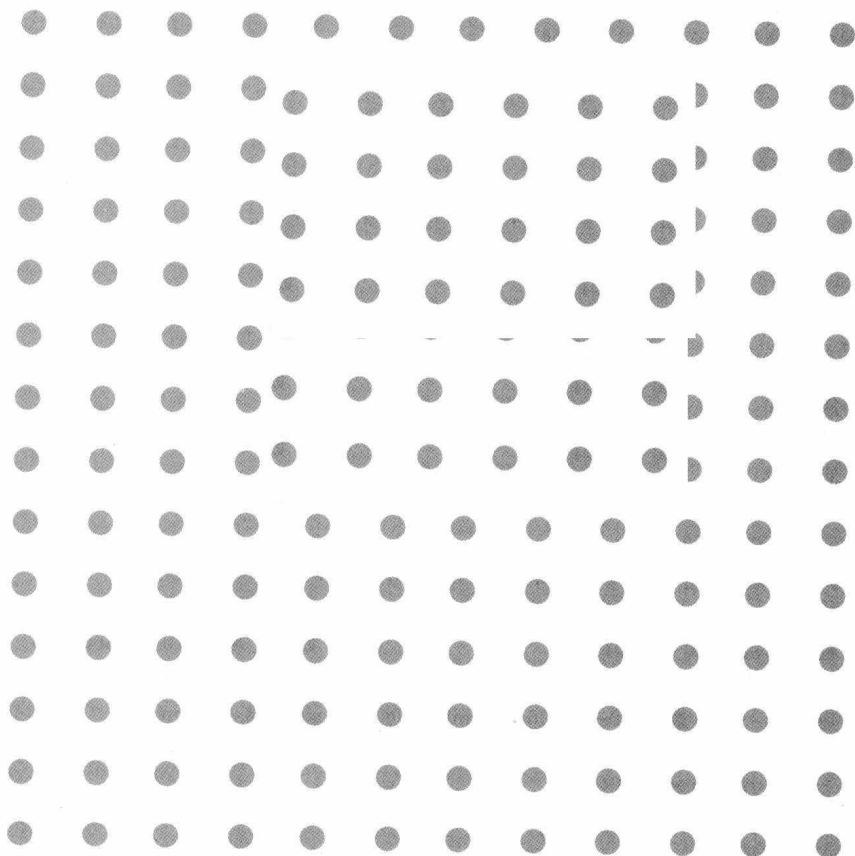
清华大学出版社

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

# 微波技术基础

## (第二版)

杨雪霞 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书第1章至第3章以路和场相结合的方法系统地阐述了微波在各种传输线中的传输规律;在此基础上,第4章分析了各种传输线所形成的常用微波谐振腔的基本原理;第5章是微波技术电路理论的进一步发展,概述微波网络的各种网络参量、微波网络的性质;第6章介绍常用微波无源器件及其应用;第7章简要介绍几个典型的微波系统和微波技术的应用。

本书注重微波技术基本理论的透彻分析以及与实际应用的结合,既可作为高等院校电子工程类无线电技术专业高年级本科生教材,也可作为相近专业的教学参考书,还可供从事微波技术以及相关技术的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础/杨雪霞编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2015

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

ISBN 978-7-302-41327-1

I. ①微… II. ①杨… III. ①微波技术 IV. ①TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第195429号

责任编辑:黄 芝 王冰飞

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:13.75

字 数:335千字

版 次:2009年6月第1版

2015年12月第2版

印 次:2015年12月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

# 第二版前言

随着信息时代的到来,微波与射频(Radio Frequency, RF)技术已渗透到人类生活、工业、科研、军事的各个领域,如蜂窝电话、个人通信系统、无线局域网、超宽带(Ultra Wide-Band, UWB)无线通信、车载防撞雷达、广播和电视直播卫星、卫星通信、导航、定位、雷达、微波遥感以及射频识别(RF IDentification, RFID)、无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)和蓝牙等。射频与微波方面的专业技术人才成为当前社会上的紧缺人才。

“微波技术基础”是工科电子类电子与信息工程专业的专业基础课。本课程的任务是使学生掌握微波理论和技术的基础概念、基本理论和基本分析方法,培养学生的分析问题和解决问题的能力,为今后从事微波研究和工程设计工作,以及电磁场与微波技术研究生专业学习打下良好的基础。

在学习本课程之前,学生应具有高等数学、电子线路和电磁场理论的基础知识。

本书是编者在多年从事教学和科研实践的基础上编写而成的。书中注重微波技术的基本概念和理论的清晰阐述,配以一定的例题以加深理解;同时又强调实际应用的设计和 analysis。平面传输线的应用发展很快,但是其理论分析较为复杂,在这里结合常用微波 CAD 做了补充,从而与实际应用更为紧密。对于学习和应用微波技术的科研人员来说,他们只注重单个器件的研究,缺乏系统概念,本书的最后一章介绍了典型微波系统,同时也可提高学生的学习兴趣。

研究生王华红和周建永绘制了部分插图,盛洁和高艳艳编纂了各章习题和解答,在此对他们表示感谢,同时向本书引用的参考书的作者致以敬意。在此我要特别感谢我国微波测量领域和微带天线领域的知名教授——上海大学徐得名教授、钟顺时教授、徐长龙教授和夏士明副教授。导师们深厚的理论基础、严谨的学术态度、谦虚坦荡的工作作风和甘为铺路石的高尚情怀坚定了我将教师作为职业的信心。

第二版除了修正第一版中的文字错误,还在第3章增加了“基片集成波导”平面传输线。研究生于英杰做了部分文字校正和基片集成波导资料的搜集工作,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有差错和不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

杨雪霞

yang.xx@shu.edu.cn

2015年9月于上海

# 第一版前言

随着信息时代的到来,微波与射频(Radio Frequency, RF)技术已渗透到人类生活、工业、科研、军事的各个领域。如蜂窝电话、个人通信系统、无线局域网、车载防撞雷达、广播和电视直播卫星、全球定位系统(Global Position System, GPS)、射频识别(RF Identification, RFID)、超宽带(Ultra Wide-Band, UWB)无线通信、雷达系统,以及微波遥感系统等。射频与微波方面的专业技术人员成为当前社会上的紧缺人才。

在学习本课程之前,学生应具有高等数学、电子线路和电磁场理论的基础知识。

“微波技术基础”是工科电子类电子与信息工程专业的专业基础课。本课程的任务是使学生学会微波理论和技术的基础概念、基本理论和基本分析方法,培养学生分析问题和解决问题的能力,为今后从事微波研究和工程设计工作以及电磁场与微波技术研究生专业学习打下良好的基础。

本书是编者在多年从事教学和科研实践的基础上编写而成的。书中注重微波技术的基本概念和理论的清晰阐述,配以一定的例题以加深理解;同时又强调实际应用的设计和 analysis。平面传输线的应用发展很快,但是其理论分析较为复杂,在这里结合常用微波 CAD 做了补充,从而与实际应用更为紧密。对于学习和应用微波技术的科研人员来讲,他们只注重单个器件的研究,缺乏系统概念,本书的最后一章介绍了典型微波系统,同时也可提高学生的学习兴趣。

本书配有电子课件和电子版的习题解答,可在清华大学出版社网站上下载。

本书的编写得到上海大学教材建设基金的资助。研究生王华红和周建永绘制了部分插图,盛洁和高艳艳编纂了各章习题和解答,在此对他们表示感谢,同时向本书引用的参考书的作者致以敬意。在此我要特别感谢我国微波测量领域和微带天线领域的知名教授、上海大学徐得名教授和钟顺时教授以及上海大学的徐长龙教授和夏士明副教授。导师们深厚的理论基础、严谨的学术态度、谦虚坦荡的工作作风和甘为铺路石的高尚情怀坚定了我将教师作为职业的信心。

由于编者水平所限,书中难免有差错和不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

杨雪霞

xxyang@staff.shu.edu.cn

2009年3月于上海

# 目 录

第 0 章 绪论 .....	1
0.1 电磁波谱及微波 .....	1
0.2 微波的特点及其应用 .....	2
0.3 微波技术的发展 .....	3
0.4 微波技术的研究方法和基本内容 .....	4
习题 .....	5
第 1 章 传输线理论 .....	6
1.1 引言 .....	6
1.1.1 传输线的种类 .....	6
1.1.2 分布参数的概念 .....	7
1.2 传输线波动方程及其解 .....	9
1.2.1 传输线波动方程 .....	9
1.2.2 传输线波动方程的解 .....	10
1.2.3 传输线的特性阻抗 .....	12
1.2.4 均匀无耗传输线的边界条件 .....	12
1.3 均匀无耗传输线的特性参量 .....	15
1.3.1 电压、电流的瞬时值 .....	15
1.3.2 相速和波长 .....	15
1.3.3 输入阻抗和输入导纳 .....	16
1.3.4 反射系数 .....	17
1.3.5 驻波比和行波系数 .....	18
1.4 均匀无耗传输线的工作状态 .....	18
1.4.1 行波 .....	19
1.4.2 纯驻波 .....	20
1.4.3 行驻波 .....	22
1.5 阻抗圆图和导纳圆图 .....	30
1.5.1 阻抗圆图 .....	30
1.5.2 导纳圆图 .....	34
1.6 阻抗匹配 .....	36
1.6.1 阻抗匹配的概念 .....	36
1.6.2 $\lambda/4$ 阻抗变换器 .....	37

1.6.3	多节 $\lambda/4$ 阻抗变换器 .....	38
1.6.4	单支节匹配 .....	39
1.6.5	多支节匹配 .....	41
习题	.....	42
<b>第 2 章</b>	<b>规则波导 .....</b>	<b>45</b>
2.1	规则波导传输的一般理论 .....	45
2.1.1	分离变量法 .....	46
2.1.2	纵向场法求波动方程 .....	46
2.1.3	波形 .....	48
2.1.4	传输特性 .....	50
2.2	矩形波导 .....	53
2.2.1	矩形波导中的 TM 波 .....	53
2.2.2	矩形波导中的 TE 波 .....	54
2.2.3	矩形波导中的波形 .....	55
2.2.4	矩形波导的主模—— $TE_{10}$ .....	57
2.2.5	矩形波导中的高次模 .....	63
2.2.6	激励与耦合 .....	65
2.3	圆形波导 .....	67
2.3.1	圆形波导中的 TM 波形 .....	67
2.3.2	圆形波导中的 TE 波形 .....	70
2.3.3	圆形波导中的波形特征 .....	71
2.3.4	$TE_{11}$ 波形 .....	72
2.3.5	$TM_{01}$ 波形 .....	74
2.3.6	$TE_{01}$ 波形 .....	75
2.4	同轴线及其高次模 .....	77
2.4.1	同轴线中的 TEM 波 .....	78
2.4.2	同轴线中的高次波形 .....	79
2.4.3	同轴线尺寸的选择 .....	81
2.5	特殊波导简介 .....	82
2.5.1	脊波导 .....	82
2.5.2	椭圆波导 .....	83
2.5.3	鳍线 .....	83
2.5.4	槽波导 .....	83
2.5.5	H 形金属介质波导 .....	84
2.5.6	过模波导 .....	84
习题	.....	84
<b>第 3 章</b>	<b>平面传输线 .....</b>	<b>87</b>
3.1	带状线 .....	87

3.1.1	特性阻抗、传播常数和波导波长 .....	88
3.1.2	特性阻抗的数值解 .....	89
3.1.3	损耗和功率容量 .....	91
3.1.4	带状线的设计 .....	92
3.1.5	耦合带状线 .....	93
3.2	微带线 .....	94
3.2.1	微带线的主模 .....	95
3.2.2	特性阻抗、传播常数和波导波长 .....	95
3.2.3	特性阻抗的近似公式 .....	96
3.2.4	特性阻抗的近似静电解 .....	97
3.2.5	损耗 .....	99
3.2.6	微带线的色散 .....	101
3.2.7	微带线的高次模和微带线的设计 .....	102
3.2.8	耦合微带线 .....	103
3.3	其他平面传输线 .....	105
3.3.1	共面波导 .....	106
3.3.2	共面带状线 .....	107
3.3.3	槽线 .....	107
3.3.4	基片集成波导 .....	108
3.4	平面传输线的激励与耦合 .....	110
	习题 .....	111
<b>第 4 章</b>	<b>微波谐振腔 .....</b>	<b>112</b>
4.1	引言 .....	112
4.2	谐振腔的主要特性参数 .....	113
4.2.1	谐振频率 .....	113
4.2.2	品质因数 .....	115
4.2.3	等效电导 .....	116
4.3	矩形谐振腔 .....	117
4.3.1	场分量的表示式 .....	117
4.3.2	矩形谐振腔谐振频率 .....	119
4.3.3	矩形腔的 $TE_{101}$ 模 .....	119
4.4	圆形谐振腔 .....	122
4.4.1	场分量的表示式 .....	123
4.4.2	圆形谐振腔的基本参量 .....	124
4.4.3	圆形谐振腔的波形图 .....	125
4.4.4	圆形谐振腔的 3 种主要工作模式 .....	127
4.5	同轴线谐振腔 .....	129
4.5.1	$\lambda_0/2$ 同轴线谐振腔 .....	130
4.5.2	$\lambda_0/4$ 同轴线谐振腔 .....	131



4.5.3	电容加载同轴线谐振腔 .....	132
4.6	环形谐振腔 .....	134
4.7	微带线谐振腔 .....	135
4.8	介质谐振腔 .....	137
4.9	谐振腔的等效电路 .....	138
4.10	谐振腔的耦合与激励 .....	139
	习题 .....	141
<b>第5章</b>	<b>微波网络</b> .....	<b>144</b>
5.1	引言 .....	144
5.2	微波网络的各种参量矩阵 .....	146
5.2.1	阻抗矩阵 $Z$ .....	146
5.2.2	导纳矩阵 $Y$ .....	147
5.2.3	转移矩阵 $A$ .....	149
5.2.4	散射矩阵 $S$ .....	150
5.2.5	传输参量 $T$ .....	151
5.3	二端口网络各种参量矩阵的关系 .....	151
5.3.1	$Z$ 矩阵和 $Y$ 矩阵的关系 .....	151
5.3.2	$Z$ 、 $Y$ 矩阵与 $A$ 矩阵的关系 .....	152
5.3.3	$S$ 矩阵与 $T$ 矩阵的关系 .....	153
5.3.4	$S$ 矩阵与归一化 $z$ 、 $y$ 矩阵的关系 .....	153
5.4	多端口网络 .....	156
5.5	常用微波网络特性 .....	157
5.5.1	互易网络 .....	157
5.5.2	无耗网络 .....	158
5.5.3	对称网络 .....	159
5.5.4	参考面移动对散射参量的影响 .....	160
5.6	基本电路单元的网络参量 .....	161
5.7	二端口网络的连接 .....	163
5.7.1	网络的串联 .....	163
5.7.2	网络的并联 .....	164
5.7.3	网络的级联 .....	164
5.8	微波网络的外部特性参量 .....	165
5.8.1	电压传输系数 $T$ .....	165
5.8.2	插入衰减 $L$ .....	166
5.8.3	插入相移 $\theta$ .....	166
5.8.4	输入驻波比 $\rho$ .....	166
	习题 .....	167
<b>第6章</b>	<b>基本微波无源元件</b> .....	<b>170</b>
6.1	终端负载 .....	170

6.1.1	匹配负载	170
6.1.2	短路活塞	171
6.2	电抗元件	172
6.2.1	膜片	172
6.2.2	谐振窗	173
6.2.3	销钉	174
6.2.4	螺钉	175
6.3	分支元件	175
6.3.1	T形接头	175
6.3.2	双T形接头	176
6.3.3	微带功分器	177
6.4	定向耦合器	178
6.5	滤波器	180
6.6	隔离器	182
6.7	衰减器	182
6.8	移相器	183
6.9	阻抗变换器	183
<b>第7章</b>	<b>微波系统及微波技术应用简介</b>	<b>185</b>
7.1	天线的系统特征	185
7.1.1	天线的辐射场	185
7.1.2	天线的方向性	186
7.1.3	天线的效率 $\eta$ 和增益 $G$	187
7.1.4	天线的有效面积	188
7.1.5	天线的带宽	188
7.2	无线传输系统	188
7.2.1	Friis 传输公式	189
7.2.2	无线通信系统	189
7.2.3	微波输能系统	190
7.3	雷达系统与导航	192
7.3.1	雷达基本工作原理	193
7.3.2	脉冲雷达	194
7.3.3	多普勒雷达	195
7.4	微波技术的其他应用	195
7.4.1	微波检测技术的工业应用	196
7.4.2	微波能的应用	197
7.4.3	微波技术的医学应用	197
7.4.4	微波技术的科研应用	198
<b>附录 A</b>	<b>物理常数</b>	<b>200</b>
<b>附录 B</b>	<b>用于构成十进制倍数和分数单位的词头</b>	<b>201</b>

---

附录 C 常用矢量公式 .....	202
附录 D 矢量微分运算 .....	203
附录 E 坐标变换 .....	204
附录 F 标准矩形波导主要参数 .....	205
附录 G 常用硬同轴线特性参量 .....	206
附录 H 常用同轴射频电缆特性参量 .....	207
参考文献 .....	208

# 第 0 章 绪 论

微波技术广泛应用于通信、雷达、导航、遥感、全球定位系统(GPS)和电子对抗等领域,其基本理论相对成熟。本章主要介绍微波的范围、特点,以及微波技术的应用、发展历史及其研究方法。

## 0.1 电磁波谱及微波

电磁波谱是一种宝贵的资源。微波是波长很短的电磁波,其范围在 1m~0.1mm 之间,波长比超短波还要短,所以叫作“微波”;微波频率很高,其范围在 300MHz~3000GHz 之间,故又称超高频电磁波。微波处于超短波与红外光之间,如图 0-1 所示。

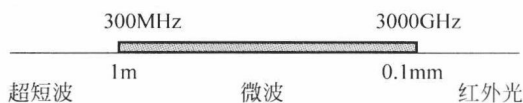


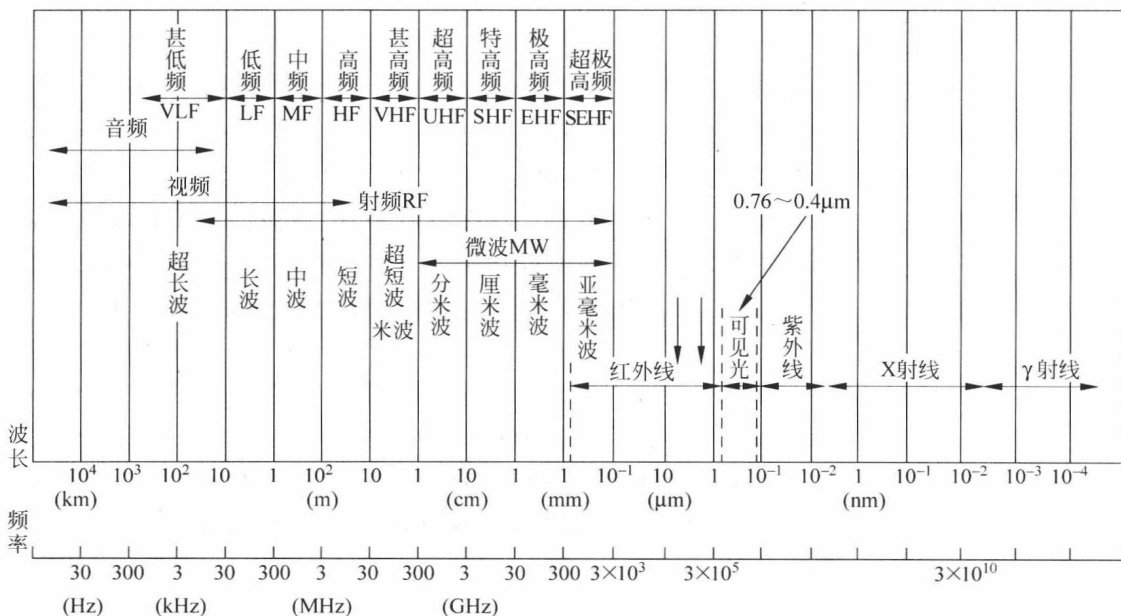
图 0-1 微波范围

电磁波的波长、频率和传播速度有以下关系：

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (0-1)$$

若电磁波在真空中传播,则速度为  $v=c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,也是光速。

图 0-2 是宇宙电磁波谱,微波虽然在电磁波谱中仅是很小的一个波段,但是占有很重要



注：甚低频(Very Low Frequency, VLF)、低频(Low Frequency, LF)、中频(Medium Frequency, MF)、高频(High Frequency, HF)、甚高频(Very High Frequency, VHF)、射频(Radio Frequency, RF)、微波(Microwave, MW)

图 0-2 宇宙电磁波谱

的地位。微波划分为 4 个波段,即超高频(Ultra High Frequency, UHF)、特高频(Super High Frequency, SHF)、极高频(Extremely High Frequency, EHF)和超极高频(Super Extremely High Frequency, SEHF)。

在实际应用中,又将微波进一步划分,并以字母命名,常用于工程设计中,亦见之于科技文献中。表 0-1 列出了约 300MHz—300GHz 范围内较常见的波段命名。

表 0-1 微波波段划分

符号	频率/GHz	波 长	符号	频率/GHz	波 长
UHF	0.3~1.0	1.00m~0.3m	Ka	27~40	11.0mm~7.5mm
L	1~2	0.3m~0.15m	U	40.0~60.0	7.5mm~5.0mm
S	2~4	15cm~7.5cm	E	60.0~90.0	5.0mm~3.3mm
C	4~8	7.5cm~3.75cm	F	90.0~140.0	3.3mm~2.1mm
X	8~12	3.75cm~2.5cm	G	140.0~220.0	2.1mm~1.4mm
Ku	12~18	2.5cm~1.7cm	R	220.0~325.0	1.4mm~0.9mm
K	18~27	1.7cm~1.1cm			

## 0.2 微波的特点及其应用

### 1. 高频特性

微波相对于其“左邻”的超短波、短波和中波等,具有极高的振荡频率(参见图 0-2),根据电磁振荡周期  $T$  与频率  $f$  的关系式

$$T = \frac{1}{f} \quad (0-2)$$

微波的振荡周期在  $10^{-9} \sim 10^{-13}$  s(秒)量级,与普通电真空器件中电子渡越时间(为  $10^{-9}$  s 量级)是可比拟的。于是在低频时被忽略了的电磁波与电子间的相互作用、极间电容和引线电感等的影响就不能再忽视了。普通电子管已不能用作微波振荡器、放大器或检波器了,代之而来的则是建立在新的原理基础上的电子器件——微波电子管、微波固态器件和量子器件,这些器件还利用渡越时间与交变场频率的确切关系来产生振荡。随着频率的升高,高频电流的趋肤效应、传输系统的辐射效应及电路的延时效应(相位滞后)等都明显地表现出来。

由于微波的频率很高,因此在一定相对带宽下,其实际可用频带很宽。例如,1%的相对带宽,若中心频率  $f_0 = 600$  MHz,则频宽为 6 MHz;若中心频率  $f_0 = 60$  GHz,则频宽为 600 MHz,这是低频电波无力可及的。微波频带宽,意味着信息容量大、传输速率高,从而使微波通信得到了广泛应用和发展,如微波中继通信、移动通信、不同用途的雷达等。

### 2. 穿透电离层能力较强

频率低于 HF 的无线电波会被高空的电离层吸收或反射,而微波则能够穿透电离层,太阳能卫星就是利用微波的这一特点通过微波波束将太阳能定向引到地面的。再加上频带较

宽,微波已广泛应用在卫星通信、微波遥感、雷达和射电天文,亦用于星际飞行器与地球之间的通信。

### 3. 似光性

微波波长比地球上宏观物体(如建筑物、飞机、舰船、导弹、卫星等)的几何尺寸小得多,故它具有光波的某些性质。例如,以直线传播,有反射、折射、绕射、干涉等现象,从而使某些几何光学原理仍然适用,如惠更斯原理、镜像原理、多普勒效应等。透镜聚焦可获得定向窄波束辐射或发射,加之与障碍物相比,波长越短,反射越强,从而可获得高方向性天线,保密性强,在雷达系统中得到广泛应用。

### 4. 量子特性

根据量子理论,电磁辐射能量是不连续的,由一个个“光量子”组成,量子能量为

$$\epsilon = hf \quad (0-3)$$

式中, $h=4.136 \times 10^{-15}$  电子伏特·秒(eV·s),是普朗克常数; $f$ 是频率。低频时,这个能量很小,可以忽略。对于微波来说,能量达到 $10^{-7} \sim 10^{-3}$  eV,这与某些物质的能级跃迁能量是可比拟的。一般顺磁物质在此作用下所产生的许多能级间的能量差介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$  eV之间,因而电子在这些能级间跃迁所释放出的量子是属于微波范围的,因此,微波可用来分析分子和原子的精细结构,形成“微波波谱学”。同样地,在超低温时(接近0K),物体吸收一个微波量子也会产生显著反应,固体量子放大器就是在此基础上发展起来的,并形成“量子电子学”学科。另外,微波还用于微波加热、医疗诊断等。

实际上,以上微波特性是内在关联的,雷达就是利用了微波的前述3个特性的最典型代表。由于微波电路集成度的提高、小型化的需求,其封装技术成为电路的有机组成部分,电磁兼容(ElectroMagnetic Compatibility, EMC)问题凸现,发展成为一门学科,从而使得基于电磁场理论的微波技术大有用武之地。

## 0.3 微波技术的发展

经典电磁场理论是微波技术的理论基础,1885—1887年间 Oliver Heaviside 发表了一系列论文,他简化了 Maxwell 理论中复杂的数学表达,使其更加适用于应用科学,并引入矢量概念,从而奠定了导波和传输线理论。

波导是微波技术发展的一个里程碑。1897年,数学物理学家 Lord Rayleigh 从数学上证明了波可以在圆波导和矩形波导中传播,并且可能存在无限的 TE 和 TM 模,而且存在截止频率。直至1936年,有两位科学家分别同时公开发表了其实验结果和应用,一个是 MIT(美国麻省理工学院)的 W. L. Barrow,他完成了空管传输电磁波的实验;另一个是 AT&T(美国电话电报公司)的 George C. Southworth,他们把波导用作宽带传输线,并且申请了专利(实际上他的工作在1932年就完成了,但为了商业目的直到1936年才发表)。这些工作奠定了规则波导的理论基础。

在 20 世纪 40 年代第二次世界大战期间,雷达的出现和发展使得微波理论和技术得到了进一步完善。当时,MIT 专门建立了辐射实验室,在研究雷达理论和应用的基础上发展了微波网络理论。这一时期的雷达基本上都是用矩形波导和同轴线作为传输线的。波导的优点是容易处理雷达系统所需要的高功率;但是其带宽窄、笨重、价格高;而同轴线的优点是带宽较宽,应用也比较方便。

在 20 世纪 50 年代,平面传输线得到广泛关注,首先是 R. Barrett 发明了带状线,接着出现了微带线、共面波导和鳍线等。这些平面传输线体积小、造价低、易于与二极管、三极管等有源器件集成。随着制作工艺的提高,已被广泛用于微波技术所涉及的各个领域,频段不断提高。在 20 世纪 60 年代末生产出第一片 MMIC(单片微波集成电路),MMIC 将传输线、有源器件和其他元件集成在一片半导体基片(介质)上。目前研究重点向单片集成和毫米波段方向发展。微波器件的发展与材料、加工工艺紧密相关。

## 0.4 微波技术的研究方法和基本内容

一般的高频电子线路,频率通常为几兆赫兹,模拟电子线路的频率为 kHz 数量级。波长比元件的尺度大很多,波在传播过程中相位( $\beta=2\pi/\lambda$ )的改变很小,达到可以忽略的程度,可以认为整个电路在稳态情况下,电压和电流只与时间有关,而与空间位置无关,因此用集总元件参数来分析电路。

对于微波波段的电磁波来说,波长很短,微波器件的尺度和波长在同一数量级,微波器件是分布式元件,即电压或电流的相位随着元件的物理长度有显著变化,它们既是时间的函数也是空间位置的函数。实际上,这时电压和电流的物理意义不是十分明确,而用电场和磁场来描述更为精确。因此,从根本上讲微波的基本理论是以经典的电磁理论,即以 Maxwell 方程组为核心的场与波的理论。

原理上,通过求解偏微分方程,可以得到微波器件和系统在任意时间、任意位置的电场强度和磁场强度,但是只有在简单边界条件下方能奏效,对复杂边界条件,直接求解相当烦琐,常需借助各种数值方法。实际情况是,许多微波工程问题并不需要知道系统中某点每一时刻的电、磁场具体值,这超出了具体应用中所需要的信息。应用中一般关心的仅是某器件的对外特性,即终端特性,如功率、阻抗、电压、电流等,用等效电路法求解即可满足要求。这种等效电路法就是把本质上属于场的问题,在一定条件下转化为电路问题,从而使问题比较容易地得到解决。因此,“场”与“路”的方法并非截然分开,而是有内在联系的。

微波技术是研究微波信号的产生、放大、传输、发射、接收和测量的学科,本书主要研究微波传输方面的基本理论,它是微波技术的基础。同时简要介绍常用微波器件和微波网络理论。

除了本章“绪论”外,本书共分 7 章。第 1 章,传输线理论,从路的观点出发研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法,分析各种匹配技术;第 2 章,规则波导,研究几种规则横截面的空心金属管的主要波形和传输特性;第 3 章,平面传输线,讨论当前在平面电路中

常用的传输线；第 4 章，微波谐振腔，研究几种常用微波谐振腔的基本原理；第 5 章，微波网络，是微波技术电路理论的进一步发展，介绍微波网络的各种网络参量、微波网络的性质；第 6 章，常用微波无源器件；第 7 章，几个典型的微波系统。

## 习 题

- 0-1 什么叫微波？微波的频率和波长范围如何？
- 0-2 简述微波的特点和应用。



# 第 1 章 传输线理论

传输线理论是微波技术的基础。本章用分布参数电路理论导出传输线方程；由传输线方程分析传输线的传输参量及其物理意义；重点分析无耗传输线的传输特性和工作状态；建立匹配的概念，掌握无耗传输线的常用匹配方法；学会用圆图解决传输线的有关问题。

## 1.1 引言

### 1.1.1 传输线的种类

电磁波在空气等介质中以光速传播，在很多应用中，要求电磁波按照规定的线路传播，这就需要特殊的器件来引导电磁波的传播，这种器件就是传输线。广义上讲，传输线就是能够引导电磁波沿着一定方向传输的导体、介质或由它们所组成的导波系统。

传输线种类很多，按照所传输（或者说所导引）的电磁波的波形特征，可分为 TEM 波传输线、TE 波和 TM 波传输线，以及表面波传输线 3 类。

(1) TEM 波传输线。TEM 波就是电场和磁场都只有一个分量，且相互正交，并且均与波的传播方向正交的电磁波。TEM 波传输线有平行双导线、同轴线、带状线、微带线、槽线、共面波导等，它们属于双导体传输系统，如图 1-1(a)所示。

(2) TE 波和 TM 波传输线。TE 波是指在波的传播方向上没有电场分量，而只有横向分量的电磁波；TM 波是指在波的传播方向上没有磁场分量，而只有横向分量的电磁波。TE 波和 TM 波传输线有矩形波导、圆波导、椭圆波导、脊波导等，它们由空心金属管组成，属于单导体传输系统，如图 1-1(b)所示。

(3) 表面波传输线。表面波是指电磁波聚集在传输线内部及其表面附近，沿轴向传播，一般传播的是混合型波，即是 TE 波和 TM 波的叠加。表面波传输线有介质棒、光纤等介质波导，如图 1-1(c)所示。

对传输线性能的基本要求是：

- (1) 满足一定工作频带，一般是越宽越好；
- (2) 功率容量大，满足一定要求；
- (3) 工作稳定性高；
- (4) 损耗小；
- (5) 尺寸小、成本低。

不同传输线类型，这些性能的高低不同。不同应用场合，对这些性能的要求也不一样。在实际应用中要根据具体问题选择相应的传输线，一般从损耗小、屏蔽好、尺寸小、工艺易于实现等方面来考虑。由此，在频率较低的分米波段，用双导线或同轴线；在厘米波段采用空