



高等院校
通信与信息专业规划教材

微波技术 与微波电路

范寿康 卢春兰 李平辉 编著

5



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校通信与信息专业规划教材

微波技术与微波电路

范寿康 卢春兰 李平辉 编著



机械工业出版社

本书为高等院校通信及信息专业通用的专业基础教材, 主要介绍微波技术的基本理论、基本概念及微波元器件、微波电路的工作原理及运用。上述专业的本科生或大专生在学完本教材后, 能对微波技术有比较系统的了解及具有一定的解决工程技术问题的能力。

全书共分为 10 章, 覆盖了微波技术主要方面的基本内容, 它们是传输线理论与技术、微波网络理论基础、微波无源元器件、微波有源电路。在内容的安排上, 主要是介绍微波技术的基础理论知识及分析方法、微波元器件的工作原理及应用、微波电路的组成及分析, 而微波电路的设计仅在部分章节中进行简要介绍, 不作为本书的重点。

本书除作为高等院校专业教材外, 还可供从事微波技术、电子技术及无线电技术等相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微波技术与微波电路/范寿康等编著. —北京: 机械工业出版社, 2003.6

(高等院校通信与信息专业规划教材)

ISBN 7-111-12223-2

I. 微… II. 范… III. ①微波技术—高等学校—教材
②微波电路—高等学校—教材 IV. ①TN015②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 038475 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策 划: 胡毓坚 责任编辑: 刘 青 版式设计: 霍永明

责任校对: 姚培新 责任印制: 闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·20 印张·491 千字

0 001-5 000 册

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委员会主任	乐光新			
编委会副主任	张文军	张思东	杨海平	徐澄圻
编委会委员	王金龙	冯正和	刘增基	李少洪
	邹家禄	吴镇扬	赵尔沅	南利平
	徐惠民	彭启琮	解月珍	
秘书长	胡毓坚			
副秘书长	许晔峰			

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断地改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

为适应 21 世纪高等院校通信与信息专业迅速发展的大好形势，高等院校相应的专业急需大量紧跟当前科学技术发展的有关教材。在“高等院校通信与信息专业规划教材”编委会及机械工业出版社的组织及帮助指导下，本书编者编写了这本《微波技术与微波电路》教材。

正如本书第 1 章所述，微波技术的内容已经包括了微波电路这一部分，但教材之所以取名为《微波技术与微波电路》，是考虑到一些传统的习惯，在一些院校及相关专业中，经常把传输线理论与技术这部分内容划出来，形成一门课程，称之为《微波技术基础》，而将微波网络理论、微波无源元件、微波有源电路的内容分成另一门课程，称为《微波电路》，或者还有其他的划分方法。本书的取名是为了方便使用者对书中内容的取舍，方便各层次、各专业的学生及不同教学学时的需要。

本书定位在通信及信息各专业通用的专业基础教材，其先行课程是《电路、信号及系统》、《电子线路》和《电磁场理论》，希望上述各专业的本科生或大专生在学完本课程后，对微波理论能达到比较系统地了解及具有一定的解决工程技术问题的能力。因此本教材在内容上除具有较大覆盖范围外，还应有一定的深度。范围包含有微波技术的全部基本内容，在深度上重点是学习微波技术的基础理论知识及分析方法、微波元器件的工作原理及应用、微波电路的组成及分析，而微波电路的设计仅在部分章节中讨论，不作为本书的重点。

全书内容由五部分组成，参考学时为 60 至 70 学时。各部分内容及参考学时数（按 70 学时划分）分配如下：

1. 微波概况（第 1 章）
2. 微波传输线（第 2 章、第 3 章、第 4 章）20 学时
3. 微波网络理论基础（第 5 章）10 学时
4. 微波无源元件（第 6 章）20 学时
5. 微波电子线路（第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章）20 学时

本书可供高等学校通信与信息学科各层次有关专业选作教材，也可用作相关学科及有关专业技术人员的参考用书。

本教材由范寿康担任主编，卢春兰、李平辉参加编写。其中范寿康编写第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章；卢春兰编写第 2 章、第 3 章；李平辉编写第 4 章；研究生夏斌提供了部分资料，研究生李先进也提供了帮助，全书由范寿康统稿。本书的编者都是长期从事微波技术教学与科研的教师，教材中一些章节的内容直接引用于编者的教案及近年的科研成果。另外，编者还参考了大量近年来出版的国内外优秀教材，所参考的主要教材及文献均列在本书后的参考文献中，编者对参考文献的作者表示深切的谢意。

本书的责任编委是清华大学冯正和教授，冯教授对本书的编写和出版工作极为重视，他审阅了本书的编写提纲及章节目录，并及时地反馈中肯和确切的意见给编者，使编者受益匪浅。

另外，许晔峰、乐超同志对编者的工作给予了很多帮助及指导，田小良同志在绘图、打印、校对等工作中注入了大量的心血，应鲁曲、王增和、钱祖平、刘代国等同志给予积极的支持与帮助，南京五十五研究所钱兴成同志也给予了帮助，编者在此深表谢意。

由于编者学识水平有限，编写的期限和时间也很紧，因此教材中错误及缺点在所难免，敬请使用者批评指正。

编者的电子邮件地址是 fanshoukang@163.net。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 微波概论	1	2.4.1 传输功率与效率	20
1.1 微波	1	2.4.2 传输线损耗	21
1.2 微波的特点和应用	2	2.5 无耗传输线的三种工作状态	21
1.2.1 波长短易于实现窄波束 定向辐射	3	2.5.1 行波状态	22
1.2.2 频率高、频带宽、信号 容量大	3	2.5.2 驻波状态	22
1.2.3 视距传播能穿透电离层	4	2.5.3 行驻波状态	25
1.2.4 微波的热效应和微波能 的应用	5	2.6 史密斯圆图	27
1.3 微波技术及微波电路的 主要内容	5	2.6.1 阻抗圆图	27
1.3.1 传输系统	5	2.6.2 导纳圆图	33
1.3.2 谐振系统	6	2.7 无耗传输线的阻抗匹配	36
1.3.3 微波网络	7	2.7.1 阻抗匹配的概念	36
1.3.4 微波无源元件	7	2.7.2 $\lambda/4$ 阻抗变换器	37
1.3.5 微波电子线路	7	2.7.3 单支节调配器	37
1.3.6 微波测量	8	2.7.4 双支节调配器	41
1.4 习题	8	2.8 习题	44
第 2 章 均匀传输线理论	9	第 3 章 规则金属波导	48
2.1 微波传输线	9	3.1 分析规则金属波导的纵向场方法	48
2.1.1 导波的分类	9	3.1.1 TE 模	50
2.1.2 传输线的分布参数和 等效电路	10	3.1.2 TM 模	50
2.2 均匀传输线方程及其解	12	3.1.3 纵向场方法分析步骤	51
2.2.1 均匀传输线方程	12	3.1.4 空腔金属波导内不存 在 TEM 模	51
2.2.2 均匀传输线方程的解	13	3.2 波导中电磁波的传输特性	52
2.3 均匀传输线的传输特性和 特性参数	15	3.2.1 波导的截止现象和 截止波长	52
2.3.1 均匀传输线上行波的 传输特性	15	3.2.2 TE 和 TM 波的相速、群速、 波导波长	53
2.3.2 均匀传输线上的三个 重要参量	17	3.3 矩形波导	54
2.4 传输线的传输功率、效率 和损耗	20	3.3.1 矩形波导中的 TE 和 TM 波	55
		3.3.2 矩形波导中电磁波的 传输特性	58
		3.3.3 矩形波导中的主模 TE_{10} 模	59
		3.3.4 波导的衰减	61
		3.3.5 TE_{10} 模的激励方法	62
		3.4 圆形波导	63

3.4.1 圆波导中的 TE 和 TM 波	63	5.3.2 二端口微波网络参量的相互转换	104
3.4.2 圆波导中电磁波的传输特性	67	5.3.3 二端口微波网络参量的性质	107
3.4.3 圆波导中的三种常用波型	68	5.3.4 基本电路单元的参量矩阵	109
3.5 同轴线的高次模及单模传输条件	69	5.3.5 二端口微波网络的组合方式	113
3.5.1 同轴线中的高次模	69	5.3.6 参考面移动对二端口微波网络参量的影响	114
3.5.2 单模传输条件	71	5.3.7 二端口微波网络参量的测定方法	116
3.6 习题	72	5.3.8 二端口微波网络的工作特性参量	117
第 4 章 带状线与微带线	74	5.4 多端口微波网络	119
4.1 平面型微波传输线	74	5.4.1 多端口微波网络的网络参量	120
4.2 带状线	76	5.4.2 多端口微波网络参量的性质	120
4.2.1 带状线的主模—TEM 模	77	5.4.3 多端口微波网络参量间的互换关系	124
4.2.2 带状线的特性阻抗分析	77	5.4.4 参考面移动对散射参量的影响	125
4.2.3 带状线的损耗与衰减	78	5.5 本章内容提要	126
4.2.4 带状线主模的截止频率	79	5.6 习题	127
4.3 微带线	79	第 6 章 微波元件	131
4.3.1 微带线传输的主模——准 TEM 模	81	6.1 微波电抗元件	131
4.3.2 微带线的相速与微带波长	82	6.1.1 矩形波导中的电抗元件	131
4.3.3 微带线的特性阻抗	83	6.1.2 微带线中的电抗元件	134
4.3.4 微带线的损耗与衰减	84	6.2 微波连接元件和终端元件	136
4.3.5 微带线的尺寸选择	85	6.2.1 连接元件	136
4.4 耦合带状线和耦合微带线	85	6.2.2 终端元件	138
4.4.1 奇偶模参量法	86	6.3 微波谐振器	139
4.4.2 耦合带状线	88	6.3.1 微波谐振器的基本参数	139
4.4.3 耦合微带线	89	6.3.2 单模传输线谐振器的等效电路	140
4.5 共面波导	92	6.3.3 同轴线谐振器	146
4.5.1 共面波导的基本结构及特点	92	6.3.4 微带传输线谐振器	147
4.5.2 共面波导实际分析中的限定条件及实际使用要点	92	6.3.5 多模谐振腔	147
4.6 习题	94	6.3.6 谐振器的激励与耦合	150
第 5 章 微波网络基础	95	6.4 微波滤波器	151
5.1 波导传输线与平行双线传输线的等效	95	6.4.1 微波滤波器分类及主要技术指标	151
5.2 微波元件等效为微波网络	97		
5.2.1 网络参考面的选择	97		
5.2.2 不均匀区等效为微波网络	98		
5.2.3 微波网络的特性	100		
5.3 二端口微波网络	100		
5.3.1 二端口微波网络的网络参量	100		

6.4.2 低通原型滤波器及频率 变换	152	振荡器	227
6.4.3 微波低通滤波器	155	7.3.1 转移电子器件—— 体效应管	227
6.4.4 仅含有一种电路元件的低通原型 ——变型低通原型	158	7.3.2 微波二极管负阻振荡器 电路	233
6.4.5 微波带通滤波器	162	7.4 PIN 管及微波控制电路	235
6.5 阻抗变换器	165	7.4.1 PIN 二极管的基本特性	235
6.5.1 单节 $\lambda/4$ 阻抗变换器	166	7.4.2 PIN 管微波开关电路	239
6.5.2 多节阶梯阻抗变换器	167	7.4.3 PIN 管电调衰减器	243
6.5.3 渐变线阻抗变换器	168	7.4.4 PIN 管移相器	246
6.5.4 阻抗变换器的微波结构	169	7.5 习题	251
6.6 定向耦合器	169	第 8 章 微波晶体管放大器	254
6.6.1 定向耦合器的技术指标	170	8.1 微波双极晶体管和微波场 效应晶体管	254
6.6.2 定向耦合器的网络分析	171	8.1.1 微波双极晶体管	254
6.6.3 波导型定向耦合器	173	8.1.2 微波场效应晶体管	256
6.6.4 平行耦合线定向耦合器	174	8.2 异质结双极晶体管和高电子 迁移率晶体管	259
6.6.5 分支定向耦合器	177	8.2.1 异质结概念	259
6.6.6 双 T 和魔 T	178	8.2.2 异质结双极晶体管	260
6.7 衰减器和移相器	180	8.2.3 高电子迁移率晶体管	260
6.7.1 衰减器	180	8.3 微波晶体管的 S 参数	261
6.7.2 移相器	184	8.4 微波晶体管放大器的功率增益	263
6.8 微波铁氧体元件	184	8.4.1 晶体管两端接任意负载及信号源 阻抗时的输入、输出阻抗	263
6.8.1 正负圆极化波	185	8.4.2 微波晶体管放大器的输入、 输出功率	263
6.8.2 圆极化波作用下铁氧体的 重要特性	185	8.4.3 三种功率增益	264
6.8.3 微波铁氧体元件	186	8.5 微波晶体管放大器的稳定性	267
6.9 习题	189	8.5.1 图解法判定放大器的 稳定性	267
第 7 章 微波二极管及其电路	196	8.5.2 绝对稳定的判别准则	269
7.1 金属-半导体结二极管及微波 混频器	196	8.6 微波晶体管放大器的噪声系数	271
7.1.1 金属-半导体二极管	196	8.6.1 有源两端口网络噪声系数 的一般表达式	271
7.1.2 微波混频器的工作原理	200	8.6.2 等噪声系数圆	273
7.1.3 微波混频器的变频损耗	203	8.7 小信号微波晶体管放大器的 设计	274
7.1.4 混频器的噪声系数	207	8.7.1 微波晶体管放大器设计 概述	274
7.1.5 微波混频器电路	209	8.7.2 高增益放大器的设计举例	275
7.1.6 毫米波混频器	218	8.7.3 微波晶体管放大器电路的 计算机辅助设计	277
7.2 微波变容二极管及微波上 变频器	220		
7.2.1 微波变容二极管	220		
7.2.2 非线性电容中的能量关系 及其应用	222		
7.2.3 变容管上变频器	226		
7.3 微波体效应二极管及负阻			

8.8 微波晶体管功率放大器的 线性化	281	9.3 MMIC 实际应用举例	292
8.8.1 微波晶体管功率放大器 的非线性	281	9.3.1 全固态中功率宽带放大器	292
8.8.2 微波晶体管功率放大器 的线性化	282	9.3.2 X 波段的收-发组件模块	292
8.8.3 前馈电路中所选用的部分 元、器件	285	9.4 习题	293
8.9 习题	285	第 10 章 微波电真空器件	294
第 9 章 单片微波集成电路	287	10.1 速调管放大器	294
9.1 单片微波集成电路的元件 和材料	287	10.1.1 双腔速调管放大器	294
9.1.1 基片	287	10.1.2 多腔速调管放大器	299
9.1.2 无源元件	288	10.1.3 速调管放大器的工作特性	300
9.1.3 有源器件	289	10.2 行波管放大器	302
9.2 MMIC 的设计	290	10.2.1 行波管放大器的结构	302
		10.2.2 行波管放大器的工作原理	303
		10.2.3 行波管放大器的主要特性	304
		10.3 习题	306
		参考文献	307

第1章 微波概论

1.1 微波

微波是电磁波谱中介于普通无线电波（长波、中波、短波、超短波）与红外线之间的波段。它是属于无线电波中波长最短，即频率最高的波段。

微波和普通无线电波、可见的和不可见的光波、 χ 射线、 γ 射线一样，本质上都是随时间和空间变化呈波动状态的电磁场即电磁波。尽管它们的表现各不相同，例如，可见光可以被肉眼所感觉而其他波段则不能； χ 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等等，但它们都是电磁波。之所以出现这么多不同表现，归根结底是因为它们的频率不同波长不同。

微波波段区别于其他波段的主要特点是其波长可同常用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过程可忽略不计，因此可以用路的方法进行研究。光波、 χ 射线、 γ 射线的波长则远小于常用元件的尺寸，甚至可以同分子或原子的尺寸相比拟，因此根本不可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。

由于微波的波长可以同电路或元件相比拟，因此电磁波在电路内甚至元件内的传播时间（相位滞后）就不再是微不足道的，我们在普通无线电电子技术中的集总参数的概念和方法就不那么有效了。在频率较低的电路中，我们往往可以区分出电路的某一部分是电容（即电场集中的地方），另一部分是电感（磁场集中的地方）或电阻（损耗集中的地方），而连接它们的导线则既没有电容、电感，也没有电阻，这就构成集总参数电路。但是到了微波波段，元件中的电场与磁场已构成了一个整体——交变电磁场或电磁波，使用的元件成为传输线、波导、谐振腔等，因此，集总参数电路的方法就失效了，代之而起的就是本书中将要着重研讨的分布参数电路的方法和场的方法。在微波领域中以麦克斯韦方程为基础的宏观电磁理论得到了最充分最成功的运用。当进一步过渡到亚毫米波、红外线以至可见光或频率更高的电磁波谱时，由于波长逐渐同分子或原子的尺寸相比拟，宏观电磁理论又不那么有效，不那么完善，这时就必须运用量子理论的方法。当然，以上的划分不是绝对的，例如，在研究普通无线电波的辐射和传播问题时必须舍弃路的方法而采用场的方法；在研究原子或分子精细能级结构的微波发射与吸收时必须舍弃宏观的方法而采用量子的方法。但是，在研究光学的某些问题如反射、折射、衍射等时宏观的方法也是行之有效的。

总之，微波波段的范围是由所应用的独特的元件、技术和研究方法所决定的。精确地划分出微波波段的范围没有什么实际意义。只能说波长从几米的量级到十分之几毫米的量级属于微波波段，通常把波长1m到1mm（即频率300MHz至300GHz）之间的波段称为微波，波长从1mm到0.01mm的亚毫米波段是微波与红外的过渡波段，有时把其中波长较长的部

分归入微波领域。微波在电磁波谱中的位置见图 1-1。

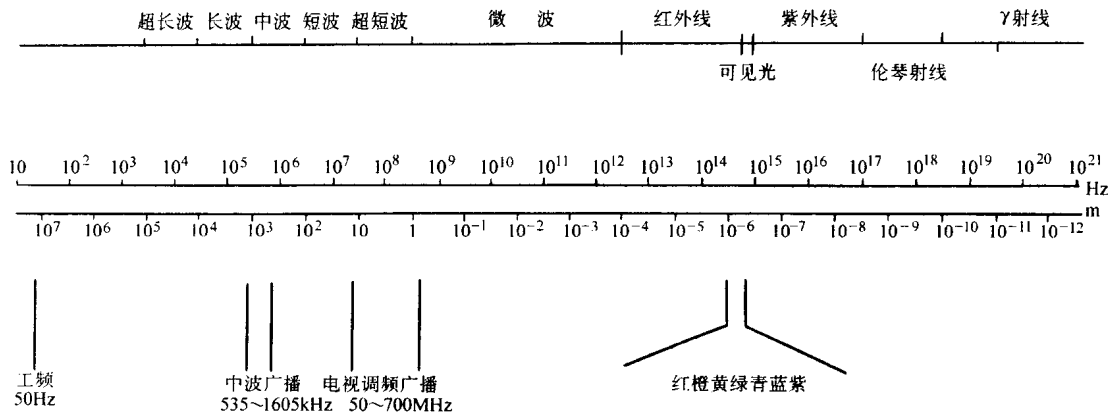


图 1-1 电磁波谱

在微波波段内部又可划分为分米波、厘米波和毫米波。见表 1-1。

表 1-1 微波波段

波长范围 /m	频率范围 /Hz	波段名称			
		按波长	按频率	代 号	
10-1	30M~300M	米 波	甚高频	VHF	普通无线电波 与微波的过渡
1~0.1	300M~3000M	分米波	特高频	UHF	微 波 (超高频)
0.1~0.01	3G~30G	厘米波	超高频	SHF	
0.01~0.001	30G~300G	毫米波	极高频	EHF	
0.001~0.00001	300G~30000G	亚毫米波			微波与红外的过渡

有时用一些特定的字母来代表微波中的某一波段。这些代号起源于初期雷达研究的保密需要，后来沿用至今。它们没有严格的和统一的定义。比较通行的代号如表 1-2 所示。

表 1-2 雷达波段代号

波段代号	P	L	S	C	X	K _u	K	Q	V
波段	米波	22cm	10cm	5cm	3cm	2cm	1.25cm	8mm	4mm

1.2 微波的特点和应用

自 20 世纪初无线电技术开始发展以来，使用的波段不断地扩展。从最初使用的长波和中波一直扩展到超长波，另一方面尤为迅速地向短波方向扩展，经过短波、超短波，在 20 世纪 40~50 年代扩展到分米波和厘米波，在 20 世纪 60~70 年代又扩展到毫米波和亚毫米波。现在，在无线电波和光波之间已不存在空白。

微波波段研究的进展是由实际需要推动的，而微波的实际应用则是同微波的特点密切相关的。微波具有如下主要特点：

1.2.1 波长短易于实现窄波束定向辐射

早在无线电发展的初期，人们在实践中就认识到可以利用无线电波的反射测定目标物的位置，这就是雷达的原理。为了精确定位，则必须让无线电波定向发射，也就是聚成一个窄束，不这样就无法判断反射波究竟是从那个方向反射回来的。理论和实践表明，为了使电磁波定向发射，必须使用尺寸远大于波长的天线。例如常用的抛物面天线，它所发射电磁波的主波束角约等于

$$\theta = \frac{140^\circ}{D/\lambda}$$

其中， D 为抛物面直径， λ 为波长。为了得到波束角为 5° 的波束，就必须使直径为波长 28 倍的抛物面，即使选用短波段的最短波长（10m），也要使用一个直径达 280m 的抛物面天线，这样大的天线建设在地面上已十分困难，更不用说装在船舶或飞机上了。而如果选用微波波段，例如 3 厘米波段，则一个直径 84cm 的抛物面天线就可获得同样窄的波束，这样的天线装在小型歼击机上也是不困难的。因此，只有掌握了微波波段，才能使雷达的实现成为可能。

事实上，在微波发展历史的初期（20 世纪 40 年代），微波技术几乎是与雷达一起发展起来的。现在，雷达的种类和用途已是多种多样，如远程或超远程警戒雷达、炮火控制和瞄准雷达，火箭或航天器的制导及轨道警戒雷达、导航雷达、气象雷达、汽车防撞雷达等等。它们所使用的几乎无例外地是微波波段。

微波易于实现定向辐射的特点还有助于点对点通信及定向广播。现代多路通信、卫星通信、卫星电视广播等都使用微波波段。

1.2.2 频率高、频带宽、信号容量大

任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带，纯粹的单频正弦波并不携带任何信息。为传递某种信息必须的频带宽度叫做信道。例如，人耳所能听到的声音频带范围大约是在 20~20 000Hz，但为了能听懂对方的语言，大约只需传递 300~3 400Hz 这一段频率的信号就够了，也就是说，一个语言信道至少要有 3 000Hz 的频带，普通电话就是这样设计的。因此电话可以听懂但不悦耳，也就是不够逼真。为了相当逼真地传送语言和音乐，则需要占 6~15kHz 的频带，这就是广播所要求的频带。为了传送电视图像，则需要更宽的频带，对于我国的电视制式，一路黑白的或彩色的电视加上伴音要占据 8MHz 的频带。

为了避免相互干扰，一个地区或一条线路上各个信道所占的频带必须错开，因此在一定频段内所能容纳的信道是有限的。即使采用数字通信，线路的信息容量仍然取决于线路的频带宽度。

根据目前的技术水平，一条通信线路（即一套发射机、接收机和传输媒介）一般只有不超过百分之几的相对带宽（即频带宽度与中心频率之比）。所以，为了把许多路电视、电话或电报同时一条线路上传送，就必须使信道中心频率比所要传递的信息的总带宽高几十倍乃至百倍。因此，为了有足够的信息容量，现代多路通信系统包括卫星通信系统几乎无例外地工作在微波波段。

对于无线电波，每个波段的频带宽度见表 1-3。

表 1-3 各波段的频带宽度

波 段	波 长 范 围	频 率 范 围	频 带 宽 度	波 段	波 长 范 围	频 率 范 围	频 带 宽 度
长 波	10 000~1 000m	30~300kHz	270kHz	分米波	1~0.1m	300~3 000MHz	2 700MHz
中 波	1 000~100m	300~3 000kHz	2.7MHz	厘米波	10~1cm	3~30GHz	27GHz
短 波	100~10m	3~30MHz	27MHz	毫米波	10~1mm	30~300GHz	270GHz
米 波	10~1m	30~300MHz	270MHz	亚毫米波	1~0.1mm	300~3 000GHz	2 700GHz

1.2.3 视距传播能穿透电离层

各波段的无线电波传播特性是不一样的，长波可以沿着地球的弯曲表面传播到很远，这种传播方式叫地波。从中波过渡到短波，地波的衰减逐渐增大，传播距离逐渐减小。但短波可以借助 60~300km 高空的电离层折射返回地面，这种传播方式叫天波。短波通信就是利用了天波，它可实现远距离通信，但不够稳定，因为电离层的密度和高度随季节，昼夜以及太阳的活动而变化。

到了超短波和微波波段，地波的衰减更大，已无法利用。同时，这个波段的电磁波一般不能被电离层折射返回地面，它能穿过电离层，因此也不能采用天波的传播方式。超短波和微波只能在视距内沿直线传播，并能穿过电离层达到外层空间（视距传播）。这种传播称为空间波。

微波的视距传播特性有它有利的一面，也有不利的一面。其有利方面是可以把作用范围限制在我们所需要的区域内，以避免干扰。同时由于微波可以穿透电离层而不像频率较低的电磁波那样被电离层折返或吸收，因此，地球和宇宙之间的通信、卫星通信等必须使用微波。

微波视距传播特性的不利一面是明显的，即在地球上它不能直接传播到很远的地方，因为地球表面是弯曲的球面，一个高 100m 的发射天线其作用半径只有约 40km。当然，天线越高作用半径越大，但架设很高的天线是困难的。

为了解决微波传播距离有限这个困难，通常采用以下几种方法：

(1) 中继通信（接力通信）：在相距很远的发射台与接收台之间设立若干中继站（接力站），站与站之间的距离不超过视距。这样，微波信号就可以像接力棒一样一站一站地传递过去。我国古代的烽火台和驿站传书就是应用中继通信的例子。

(2) 散射通信：在距地面上几十千米以内的大气层叫做对流层，可以利用它对微波的散射作用进行距壁通信。打个比方，在早晨当太阳还没升起的时候，我们虽然无法直接看到太阳，但当我们看到天空被染成鱼肚白色或云染成红色时，我们知道太阳即将从地平线下升起，这个信息就是通过大气或云对阳光的散射作用传递给我们的。

(3) 卫星通信和卫星广播：如前所述，微波天线架设得越高通信距离越大，广播的服务半径也越大。如果把中继站或发射台及其天线放到人造卫星上去，那么，这个中继站或发射台的作用距离就可以大大增加。这就是目前在国际或国内通信及电视转播和广播中占重要地位的卫星中继通信或卫星电视广播。目前广泛使用的是在赤道上空距地面约 36 000km 的同步轨道上的卫星。在这个轨道上卫星公转周期恰好等于地球的自转周期，从地面上看，卫星是固定不动的，这种卫星称为同步卫星。三颗这样的同步卫星就可覆盖全球的大部分面积（南北极除外）。

此外，还可以把中继站或发射台放在高空气球上以实现远距离通信或广播。

1.2.4 微波的热效应和微波能的应用

高频率感应加热和介质加热早已应用在许多工业部门。在微波波段，材料的介质损耗增大，特别是含水份的材料对微波能的吸收非常有效，从而使微波成为很好的加热手段。微波加热具有效率高、透热深度大、加热迅速等一系列优点。因此，微波加热和微波烘干正日益广泛地应用于粮食、茶叶、卷烟、木材、纸张、皮革、蚕丝、纺织、食品等工农业生产领域中。微波理疗也日益广泛地被利用。

微波代替原来所用的煤、煤气或蒸气进行加热或烘烤可以节约能源，提高产品质量，改善劳动条件，便于实现生产过程的自动化。此外，家庭烹饪用微波炉也已得到了广泛的应用。

微波在未来能源的探索 and 开发中也起着重要作用。例如，在受控热核聚变研究中利用毫米波电子回旋共振效应加热等离子体，在空间太阳能发电站的设计中用微波作为将能量送回地面的手段等。

1.3 微波技术及微波电路的主要内容

微波技术是无线电技术的一个组成部分。如前所述，由于微波波段电磁波的波长和常用设备或元件的尺寸差不多，甚至更小，从而使微波波段中所用的元件、器件及其分析方法和低频时大不相同。因此，微波技术成为无线电技术的一个独立分支，它主要包括以下内容。

1.3.1 传输系统

在低频设备中任意形态的导线都可以传输电磁能，只有在远距离传输时才需要考虑传输线的形状。在低频时最常用的是平行双线式传输线，如电力传输线或电话的架空明线就属于这种类型，见图 1-2a。

当频率提高以致波长短到可以与同导线之间的距离相比时，双线传输线上就会有相当大的电磁能量辐射出去，形成辐射损耗。为了减少辐射损耗，可以减小两线之间的距离。

例如作为电视天线的扁带线，两线距离约为 10mm，它可以应用在几十至几百兆赫，见图 1-2b。

现代微波集成电路中广泛应

用的微带线也可认为是一种双线传输线，它的导线做成扁带状，实际上是一层金属薄膜，两

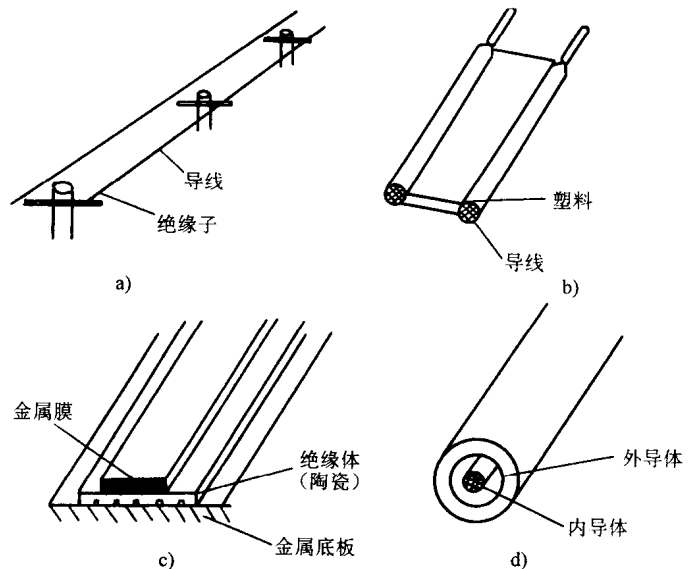


图 1-2 双导体传输线

导线之间的距离只有毫米量级，如图 1-2c。它被成功地利用到厘米波或毫米波段的长波段，但它耐受功率有限，只能用在小功率设备中。严格地说，微带线已不是普通传输线。

为了彻底避免辐射损耗，人们把传输线的两个导体做成同轴形，外边的叫外导体，里边的叫内导体，如图 1-2d。这样就构成一种封闭的传输线，它把电磁场限制在内外导体之间，从而避免了辐射损耗。同轴线在微波波段应用很广，一直可以用到毫米波段，又可以传输相当大的功率。

同轴线的内导体较细，所以损耗主要在内导体上；同时，内导体表面电场最强，该处的场强限制了它的功率容量。此外，内导体不可能悬空放置在外导体中，必须用某种方式把它支撑起来，这也带来许多麻烦，主要是增加了损耗，降低了功率容量。频率越高，上述这些缺点越显著。

以上几种传输系统的共同特点是由两个导体构成。这类双导体传输系统称为传输线。

为了克服同轴线的缺点，能不能把内导体抽掉，用一根中空的金属管传输电磁能呢？按照低频电路的观点这是不可想象的，人们早就习惯地认为必须有两根导线形成回路才能使电流流通。但实践和理论都证明，只要金属管的横截面尺寸与工作波长相比足够大，单根中空金属管是可以传输电磁能的，这种传输系统称为波导管或波导。波导的横截面可以是矩形、圆形或其他形状的。

后面我们将会看到，矩形波导宽边尺寸必须大于半波长。因此，如果在短波或中波波段应用波导，其尺寸要达到数十米至数百米，这显然是不切实际的。因此，只有在微波波段才有实际应用的可能。

除了由金属管构成的波导外，还可以用单根介质棒、敷介质的单根金属棒等构成不同形式的表面波波导。

1.3.2 谐振系统

在无线电技术中广泛应用由电感线圈和电容组成的谐振回路，如图 1-3a 所示，回路的谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当频率提高时，要求电感 L 和电容 C 减小。当频率提高到一定程度时，电容只剩下两片，电感只剩下一圈，如图 1-3b 所示。

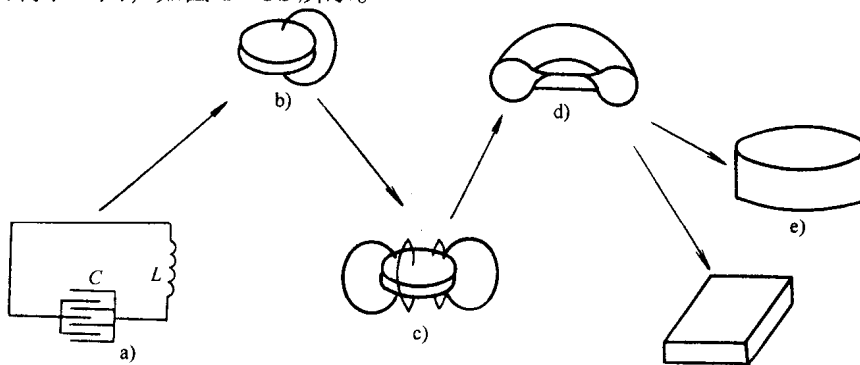


图 1-3 从谐振回路到谐振腔