



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

微波技术

(第二版)

顾继慧 编著



科学出版社

014058957

TN015-43
11-2

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

微波技术

(第二版)

顾继慧 编著



科学出版社

北京



北航

C1746246

TN015-43

11-2

778820410

内 容 简 介

本书以场、路及物理诠释相结合的方法系统阐述微波技术理论及其应用,包括导波理论及其在各种微波传输线中的应用,传输线理论及其在长线和微波网络中的应用,并从理论分析和物理解释两方面剖析各种微波谐振器、微波元件和微波无源器件的结构机理、工作原理和分析设计方法。

本书系高等学校工科电子工程专业教材之一,可作为微波技术、电子信息及通信等相关专业的本科生教材,也可供从事微波技术工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术/顾继慧编著. —2版. —北京:科学出版社, 2014. 6
(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材)
ISBN 978-7-03-041237-9

I. ①微… II. ①顾… III. ①微波技术-高等学校-教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 126990 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:韩 杨
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 6 月第 二 版 印张: 21 1/2

2014 年 6 月第五次印刷 字数: 530 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

1982年雷达专业大学毕业后,我决定留在美丽而宁静的母校南京理工大学工作。在30多年的教学生涯中,我亲眼目睹一批批充满活力和自信的年轻学子走出象牙塔、走向社会,成为祖国繁荣富强之良才,心里既感到由衷的喜悦,又总觉得作为教师的我,给学生们的奉献依然不够。基于这一缘由,1995年我萌发了撰写《微波技术》教材的想法,从此便在撰写教材这条路上一发不可收,主教材先后经历了1999年校内初版使用,2001年与科学出版社签约改版公开发行,2006年列入国家“十一五”规划教材再次改版发行和2012年列入国家“十二五”规划教材重新编著,即现在发行的“第二版”。过程虽然艰辛,但我从未动摇过自己的信念:将工作实践中逐步积累的对微波技术抽象知识的理解诠释给大家。我喜欢校园氛围,钟爱教学事业,享受与大家一起步入微波世界的过程,每当看到学子们心领神会的表情时我总觉得自己是最富有和最幸福的人,同时也感到课堂对我来说是一座永无止境的艺术殿堂,我愿在这座殿堂中一直陪伴大家成长。

此次教材的改版,除了在编写风格上保留原有的经仿真确认过的图表曲线和传输线沿线特性变化规律、圆图及其在阻抗匹配中的应用、参考面移动对 $[S]$ 的影响以及十字孔定向耦合器原理诠释等部分段落外,又进一步提炼和浓缩了对导波理论和等效电路的阐述,将抽象的导波理论按获取导波场解的思路分解为时空、纵横和变量三步分离,并从物理角度诠释出与理论推导结果相同的公式,以增强读者对导波理论的感性认识和应用基础;对微波传输线的分布参数特性及其 Γ 网络级联等效模型给予了频率从量变到质变的自然演化和模型构造的机理诠释;对唯有圆波导中 TE_{01} 模具有衰减常数随频率升高而减小的宝贵特质给予了理论证明和物理诠释;对截止模的波阻抗特性及应用机理给予了物理诠释;对散射参量的引入形式及微波段唯有功率可测的原因给予了诠释;在一般性证明任意三端口网络不可能同时兼有互易、无耗和全匹配特性后,以奇、偶模思想和方法对互易、全匹配、正向无耗且输出端相互隔离的Wilkinson功分器给予了从结构确定到参量选择的详细分析和设计,使读者从中领悟到巧妙的Wilkinson功分器结构的精髓所在;对小孔耦合理论给予了物理诠释和应用举例。此外,对“电壁和磁壁”、“磁流的引入”等概念分别以附录的形式逐一给予了阐述。另外,将自己科研工作中2007年申请已制成样机并经几家企业试用验证过的一件专利浓缩进教材,作为对魔T的应用举例之一。全书内容归为两大部分:“导波理论及其应用”和“传输线理论及其应用”。具体章节安排和说明见绪论0.3节“本书内容及体系”。

借此机会,我想表达多年来心中的谢意:感恩当年的教研室主任邬友卫先生所给予的启蒙鼓励和帮助,我永远怀念这位已故恩师!诚挚感谢曾使用或参阅过本书初版及修订版的广大高校师生、科技人员和微波爱好者,正是因为有他们,才有本书的今天;永远珍惜来自全国各地、不同行业朋友们的电子邮件;衷心感谢东南大学杨铨让教授和南京理工大学温俊鼎教授对本书第一版曾作的审阅和指教,感谢中国科技大学徐善驾教授和北京航空航天大学王宝发教授对本书第一版曾作的书面评价,感谢东南大学章文勋教授所提供的宝贵建议,感谢西安电子科技大学梁昌洪教授所给予的鼓励;同时还要特别感谢电子科技大学、西安交通大学、山东大学、武汉科技大学、合肥工业大学等二十多所高校对本教材的选用,以及各高校微波技术任课

老师杨洪平、徐伟军、李祥、王林茂、曹良足和陈传君等对教材内容和使用效果所进行的交流；十分感激母校教务处领导的再次鼎力相助和电光学院方大纲教授的建议和帮助；感激我的几届学生龚剑、李德文、周小敏、杨一飞、朱银霞、周虹和胡莎莎等为本书插图所做的仿真和绘制工作。

非常感谢科学出版社长期与我的愉快合作，以及给我提供了与读者交流的良好平台。

最后，我要深深感谢我的儿子亮亮，他自三岁起便一直伴随着我的教材长大，如今他已是二十岁出头的帅小伙了！感谢他的独立和自强给予了我充分的时间工作和写作，同时又给我带来了无限欢乐和勇气。

面对大家的关爱，我只有用教学和工作上更好的成绩作为回报，在结束这次写作后我将投入到已筹划好的 MOOC 建设中。同时，继续期待有机会能与有识之士切磋、交流和合作，共同为微波专业的教师、学生和科技人员奉献一套好资料。

由于本人水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者不吝赐教，以求共勉（联系方式：025-84314917, gujihui@mail.njust.edu.cn）。

2014年5月

符号表

符号	名称	国际单位		其他常用单位		换算关系
		名称	符号	名称	符号	
A	矢量磁位	特斯拉·米	T·m			
A	衰减量	分贝	dB	奈贝	Np	1Np=8.68dB
a	矩形波导宽边	米	m	厘米 毫米	cm mm	1m=10 ² cm=10 ³ mm
B	磁感应强度 (磁通密度)	特斯拉	T	高斯	Gs Wb/m ²	1Gs=10 ⁻⁴ T 1T=1Wb/m ²
b	矩形波导窄边	米	m			
C	耦合度	分贝	dB			
C₀	分布电容	法拉/米	F/m	微法/米 皮法/米	μF/m pF/m	1F/m=10 ⁶ μ/m =10 ¹² pF/m
D	定向性	分贝	dB			
c	自由空间光速	米/秒	m/s			3×10 ⁸ m/s
D	电位移矢量 (电通密度)	库仑/米 ²	C/m ²			
E	电场强度	伏特/米	V/m			
F	力	牛顿	N	千克力,公斤力 达因	kgf dyn	1kgf=9.80665N 1dyn=10 ⁻⁵ N
f	工作频率	赫兹	Hz	千赫 兆赫 千兆赫	kHz MHz GHz	1Hz=10 ⁻³ kHz =10 ⁻⁶ MHz =10 ⁻⁹ GHz
G₀	分布电导	西门子/米	S/m			
G_{0l}	谐振器损耗电导	西门子	S			
H	磁场强度	安培/米	A/m	奥斯特 楞次	Oe	1Oe= $\frac{1000}{4\pi}$ A/m 1楞次=1A/m
h	基片厚度	米	m			
l	隔离度	分贝	dB			
I	电流	安培	A	毫安 微安	mA μA	1A=10 ³ mA=10 ⁶ μA
J_c	导体电流密度	安培/米 ²	A/m ²			
J_s	传导面电流密度	安培/米	A/m			
J_d	位移电流密度	安培/米 ²	A/m ²			

续表

符号	名称	国际单位		其他常用单位		换算关系
		名称	符号	名称	符号	
J_e	电偶极子等效电流	安培/米 ²	A/m ²			
K	行波系数					
k	无耗介质空间波数	弧度/米	rad/m			$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$
k_0	自由空间波数	弧度/米	rad/m			$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0}$
k_c	截止波数	弧度/米	rad/m			
k_P	功分比					
L_0	分布电感	亨利/米	H/m			
L	插入损耗	分贝	dB			
M	磁流密度,磁偶极子等效磁流	伏特/米 ²	V/m ²			
P	无耗传输功率	瓦特	W	马力		1 马力=745.6999W
P	压力 压强 应力	帕斯卡	Pa	巴	bar, b	1b=10 ⁵ Pa
				毫巴	mbar	1mbar=10 ² Pa
				托	Torr	1Torr=133.322Pa
				标准大气压	atm	1atm=101.325×10 ³ Pa
				工程大气压	at	1at=98.0665×10 ³ Pa
				毫米汞柱	mmHg	1mmHg=133.322Pa
P_L	负载吸收功率	瓦特	W			
P_e	电极化强度	库仑/米 ²	C/m ²			
P_i	入射波功率	瓦特	W			
P_l	传输线损耗功率	瓦特	W			
p_l	单位长度传输线损耗功率	瓦特/米	W/m			
P_{ol}	谐振腔平均损耗功率	瓦特	W			
P_e	谐振腔匹配负载吸收功率	瓦特	W			
P_m	磁极化强度	安培/米	A/m			
Q_0	孤立谐振器固有品质因数					
Q_e	耦合谐振系统外部品质因数					
Q_L	耦合谐振系统有载品质因数					
q	微带线有效填充因子					
R	圆波导横截面半径	米	m			
R_s	导体表面电阻	欧姆	Ω			$R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma}$
R_0	分布电阻	欧姆/米	Ω/m			
R_{ol}	谐振器损耗电阻	欧姆	Ω			
S	坡印亭矢量	瓦特/米 ²	W/m ²			$S = E \times H$
T	力矩	牛顿·米	N·m			

续表

符号	名称	国际单位		其他常用单位		换算关系
		名称	符号	名称	符号	
T	温度	摄氏度	°C	度	deg	°C=deg
						°F=(°C×9/5)+32
		开尔文	K	华氏度	°F	°C=(°F-32)×5/9 0°C=32°F=273.16K
t	导带厚度,膜片厚度	米	m			
tanδ	损耗角正切					$\tan\delta = \sigma_d/(\omega\epsilon)$
V	电压	伏特	V	毫伏 微伏	mV μV	1V=10 ³ mV=10 ⁶ μV
v _g	群速	米/秒	m/s			
v _p	相速	米/秒	m/s			
W	微带线导带宽度	米	m			
W	能量,功	焦耳	J	尔格	erg	1erg=10 ⁻⁷ J
Z ₀	非色散传输线特性阻抗	欧姆	Ω			
Z _c	色散传输线等效阻抗	欧姆	Ω			
α	衰减常数	奈贝/米	Np/m	分贝/米	dB/m	1Np=8.68dB
α _c	导体衰减常数	奈贝/米	Np/m			
α _d	介质衰减常数	奈贝/米	Np/m			
β	相移常数	弧度/米	rad/m	度/米	°/m	1rad≈57.3°
β _c	耦合系数					
χ _e	电极化率					
χ _m	磁极化率					
ε	介电常数 (电容率)	法拉/米	F/m			
ε ₀	自由空间介电常数	法拉/米	F/m			ε ₀ = 10 ⁻⁹ /(36π)
ε _r	有耗介质复介电常数	法拉/米	F/m			
ε _{in}	感应电动势	伏特	V			
ε _r	相对介电常数					
ε _{re}	有效相对介电常数					
Φ _e	电通量	库仑	C			
Φ _m	磁通量	韦伯	Wb			
φ	标量电位	伏特	V			
φ ₂	驻波相位	弧度	rad	度	°	1rad≈57.3°
Γ	电压反射系数					
γ	传播常数					γ=α+jβ
η	波阻抗	欧姆	Ω			$\eta = \dot{E}_T/\dot{H}_T$ $\eta_{\text{TEM}} = \sqrt{\mu/\epsilon}$ η ₀ = 120π

目 录

前言	1
符号表	
绪论	1
0.1 微波技术的特点	1
0.2 微波特性与应用	3
0.3 本书内容及体系	6
第1章 导行波分析方法	7
1.1 引言	7
1.2 麦克斯韦方程组 边界条件 波动方程	9
1.3 导行波的场解法	14
1.4 导行波按纵向场分类及一般传输特性	18
习题一	24
第2章 微波传输线	25
2.1 微波规则波导	25
2.2 微波集成传输线	62
2.3 微波传输线中波的激励 耦合 模式转换	72
习题二	77
第3章 传输线理论	79
3.1 引言	79
3.2 传输线等效模型	79
3.3 传输线方程及其解	80
3.4 传输线特性参量 分布参量	82
3.5 无耗线工作状态分析	87
3.6 圆图	98
3.7 阻抗匹配	108
习题三	118
第4章 微波网络基础	123
4.1 引言	123
4.2 导波系统中均匀区域的等效	123
4.3 导波系统中不均匀区域的等效	128
4.4 微波网络参量	129
习题四	146
第5章 微波谐振器	149
5.1 引言	149
5.2 微波谐振器的基本参量	150
5.3 金属波导谐振腔	154

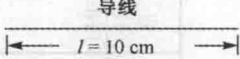
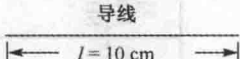
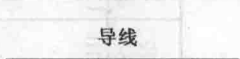
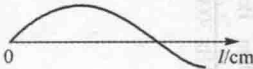
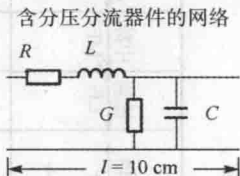
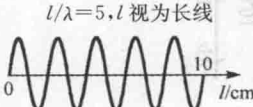
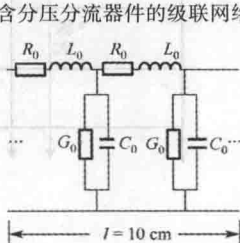
5.4	传输线谐振器	161
5.5	介质谐振器	165
5.6	谐振器的微扰原理	166
5.7	谐振器的激励与模式选择	167
* 5.8	谐振器与外电路的耦合等效电路及耦合参量	169
	习题五	175
第6章	常用微波元件	177
6.1	引言	177
6.2	微波电阻性元件	177
6.3	微波电抗性元件	181
6.4	微波连接元件	187
6.5	拐角与分支	190
6.6	微波移相器	201
6.7	极化变换器	204
6.8	阻抗调配器	205
* 6.9	阻抗变换器	207
	习题六	215
第7章	微波无源器件	218
7.1	微波功分器与定向耦合器	218
7.2	微波滤波器	254
* 7.3	双工器	281
* 7.4	微波铁氧体器件	284
	习题七	295
	参考文献	299
	附录	301
附录 A	磁流和磁偶极子等效磁流概念	301
附录 B	电壁与磁壁	302
* 附录 C	洛伦兹互易定理	303
附录 D	证明无耗网络满足 $[S]^T [S]^* = [1]$	305
附录 E	矩形波导规格表	306
附录 F	同轴线规格表	308
附录 G	双导体传输线分布参数及特性阻抗	309
附录 H	二端口网络参量换算	310
附录 I	简单二端口网络 $[A]$ 和 $[\tilde{A}]$ 矩阵	311
附录 J	材料特性	312
附录 K	数学公式	313
附录 L	阶梯过渡参数	315
* 附录 M	证明旋转式介质片移相器的相移量 $\Delta\varphi = 2\theta$	318
附录 N	微波网络 $[S]$ 参量的“阻抗法”实验测定方法	320
	索引	322

绪 论

0.1 微波技术的特点

“微波技术”与其他电类课程一样是研究某一指定频段信号在其传输系统中的工作状态；研究对信号幅度、相位、频率等参量的控制、选择和测量方法；研究对系统器件的分析与综合等。从电参量的角度看，他们都应涉及功率、频率、电压、电流、电阻、电抗等，只因“微波技术”所研究的信号频段(300MHz~300GHz)远高于电路、模电、数电中所讨论的直流、低频、高频信号频段(0Hz~几百 MHz)(见图 0-1 所示的电磁波频谱)，这种频率上的量变引起了传输线从低频集总参数到微波分布参数的质变(见表 0-1 的分析和说明)。相应地，描述低频电路的基本物理量电压和电流在微波系统中已失去物理意义，原本在集总参数电路中成熟的欧姆定律、克希霍夫电压、电流定律等需在新的分布参数电路条件下加以演变才能得以应用。

表 0-1 传输线由低频集总参数到微波分布参数的过渡

频率 f	波长 $\lambda=c/f$ ($c=3\times10^8$ m/s)	一段 $l=10\text{cm}$ 的传输线 与工作波长 λ 相比	沿线电压、 电流的幅、相	传输线等效模型	系统电参 量属性
0Hz	∞	$(l/\lambda)=0, l$ 视为无限短线	恒定不变		集总参数
50Hz	$6\times10^6\text{m}$	$(l/\lambda)=1.67\times10^{-8}\ll1$, l 视为无限短线	几乎不变		集总参数
300MHz	1m	$(l/\lambda)=0.1<1, l$ 近似为短线	有变化但变化 量值较小， 粗略不计		集总参数
2GHz	15cm	$(l/\lambda)=(2/3)\approx1, l$ 视为长线 	明显变化		分布参数
15GHz	2cm	$l/\lambda=5, l$ 视为长线 	已是沿线位置 的周期函数		分布参数

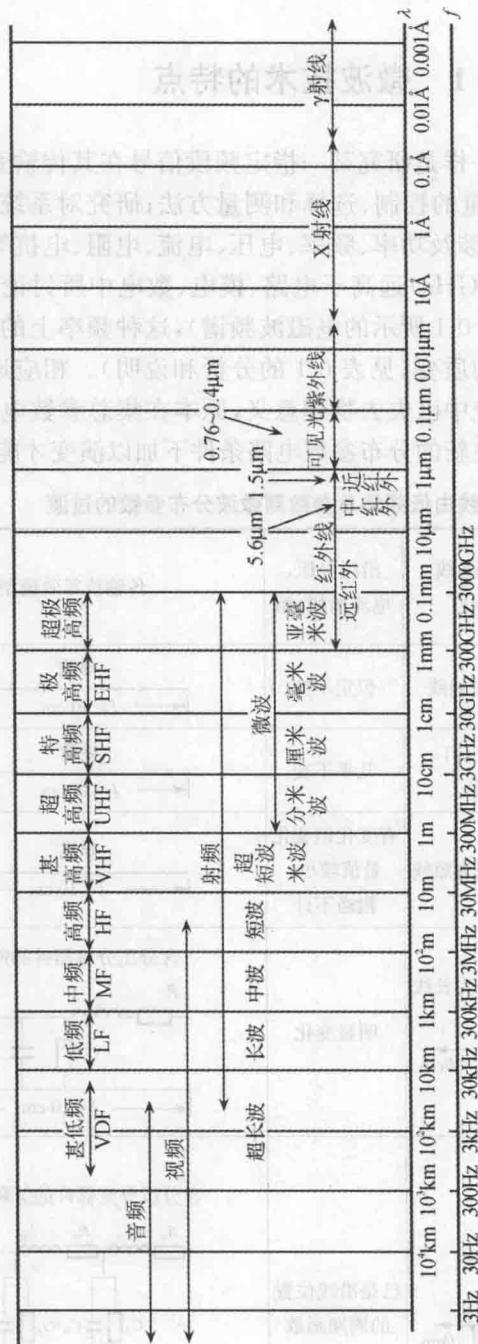


图 0-1 电磁波频谱

另一方面,当传输线几何尺寸小于或接近于所传输信号波长时,该传输线对其所传输的信号将产生电磁辐射,从而使电信号的传输问题本质上变成了电磁波的传播问题,相应地,所用传输线也将随频率的升高而从低频段的单导线回路逐渐演变为双导线、同轴线、波导等导波系统,统称为微波传输线(见表 0-2 的阐述)。需借助于电磁场理论分析微波信号在导波系统中的传输特性,同时需采用化整为零的方法将成熟的电路理论运用于微波传输线中任一微分段上(视该微分段为集总参数电路系统)以建立沿线电压、电流所满足的微分方程,进而解微分方程获取本质上属于分布参数特性的微波传输线中沿线电压、电流的变化规律。

因此,“微波技术”是“场”与“路”两种技术的结合。

微波传输线的分布参数特性决定了它在微波电路系统中不仅是传输信号功率的载体,也是构成各类微波元器件的主体。事实上,对不同微波传输线采取折、弯、分支,或开孔、槽、缝,或插入介质膜片、金属膜片、销钉、螺钉等手段可实现衰减、移相、变极化、功分、耦合、滤波等功能。因此,微波传输线是构成整个微波系统的核心和基础。

0.2 微波特性与应用

微波在电磁波频谱中其低频端与“超短波”相连接而其高频端与“远红外”毗邻,对不同介质(ϵ , μ , σ)具有不同的反射和透射特性,使其在雷达、地质地矿和射电天文等领域中可应用于探测,在工业中可应用于无污染加热和产品检测等,在日常生活中可应用于无油烟食物烹饪和无线通信,以及在医学领域可应用于病理诊断和微波理疗等。

举几个大家能感悟到的例子:

飞机的导航,利用的是微波的反射特性。地面机场雷达将微波馈源信号能量通过天线聚集成电磁波束发送给目标,同时接收来自目标的反射波,经信号处理后辨认目标,并始终扫描监控着每次航班。天线与雷达导航系统之间的默契配合关系,如同我们人的眼睛与大脑配合盯踪移动目标一样,从这个意义上讲,天线可称为雷达的眼睛。微波对雷达来说就如同光线对人的视力一样重要,雷达一旦失去微波便会丢失目标,翱翔在天空的飞机就如同漫游在荒野的盲人,漆黑一片,无人指路。另一方面,若能驾驭飞机在敌方雷达的视野之外同时又在自家监控雷达的视野之内,则可成功袭击目标。历史上日本偷袭美国珍珠港事件、阿富汗偷袭美国双子楼的 9.11 事件,都是高水平的微波专家和超低空飞行家干的事。

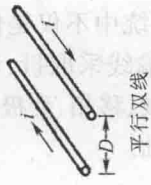
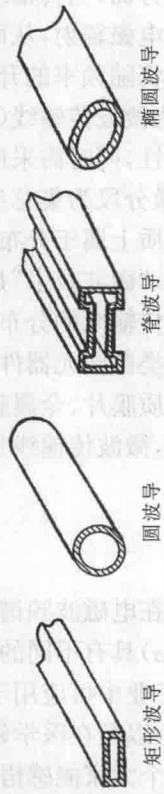
微波炉烘、烤、热、焖食物,利用的是微波的透射特性。让微波炉产生的电磁波穿透进入食物内部,使食物的所有分子同时吸收微波能量,转变为焦耳热($J_c = \sigma E$),达到里外同温同熟,原汁原味的目的。为高效利用微波功率同时保护微波炉设备,应使用微波炉专用器皿,切忌直接将锡箔包装食物放入微波炉加热或使用金属器皿,因金属对微波产生全反射,结果,食物获取不到微波能量而微波炉相当于自己在对自己开枪。

在了解微波特性后,人们在享受微波所带来的手机通信方便的同时应尽量避免长时间贴近眼睛,因手机天线的辐射对人体的负面效应与微波炉烘烤食物的道理一样,尽管手机辐射小至安全范围之内,但对娇嫩的眼球而言其累积效应不可不防。因此,微波是一把双刃剑,合理应用才能造福于人类。

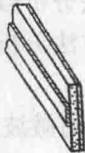
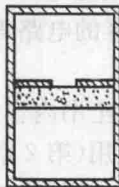
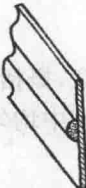
利用微波对金属材料的反射特性还可完成对香烟、茶叶、罐头等锡箔包装的整箱缺件检测,见本书 6.5 节中关于魔 T 的应用举例。

现在读者应推知到,航天领域中的深空探测技术一定是同时利用了微波对大气层的透射

表 0-2 微波传输线随工作频率不断升高而逐渐演变的过程

频率 f	信号特征	演变措施	传输线形式及特点
$f = 0 \sim \text{几十 kHz}$, $\lambda = \infty \sim 10^4 \text{ m}$	传输线几何尺寸与波长相比很短, 信号传经传输线时几乎无幅度起伏、相移、延时等附加效应		 普通单导线回路
f 升至 MHz 量级, λ 降至 m 量级	普通导线几何尺寸 l 与工作波长 λ 相接近, 传输信号时将产生能量辐射, 致使沿线衰减明显增加	利用平行反向电流在空间产生场的叠加效应, 抵消能量耗散, 确保信号正常传输	 平行双线 能量被限制在双线间传输
f 升至 GHz 量级, λ 降至 dm 量级	信号波长 λ 短至与平行双线几何尺寸 D 相接近, 引起能量辐射	将开放的双线变为封闭的同轴线, 使能量被限制在同轴线内、外导体间的空间传输	 同轴线 工作频带很宽, 普通同轴电缆可工作于 $0 \sim \text{GHz}$, 保相电缆可工作至几十 GHz
f 升至几十 GHz, λ 降至 cm 量级	同轴线内、外导体截面直径尺寸 d, D 随频率升高而必须减小, 致使欧姆损耗增加, 尤其体现在很细的内导体上。为防止内导体表面场强过强而击穿, 只能限制所传输的功率容量	去除内导体改用空心金属管, 称之为金属波导。理论和实验均证明, 在波导口径尺寸与信号工作波长满足一定条件下可传输相应模式的波, 波导口径形状可方可圆	 矩形波导 圆波导 椭圆波导 金属波导功率容量大、损耗小, 但工作频带较同轴线窄

续表

频率 f	信号特征	演变措施	传输线形式及特点
	立体结构的传输线不适合航空航天技术的发展,基于同轴线、平行线及电磁场理论之上研制出了带状线、微带线等平面微波传输线,随后又相继派生出了槽线、共面波导等一系列微波集成传输线	在满足边界条件前提下将同轴线、平行线等立体双导体传输线演变成带状线、微带线等平面传输线。进而又将导体与接地板共置于同一面构成便于串、并联安置固体器件,实现半集成化的平面传输线——槽线、共面波导等	 带状线  微带线  共面波导  槽线 平面传输线的功率容量较小;半开放型的结构损耗相对较大;线宽尺寸随工作波长的减小而减小
	在平面传输线与金属波导之间寻找场分布吻合的工作模配构成能同时兼顾平面传输线易集成和金属波导损耗小的优势	将槽线竖置于矩形波导内两宽壁间,形如鱼鳍,故得名鳍线	 鳍线 相同频率下的工作波长比微带线长,降低了加工及公差要求;相同介质基片下的损耗约为微带线的(1/3)
f 升至几百 GHz, λ 降至 mm 量级	无论是立体金属波导还是平面集成传输线,当工作在毫米和亚毫米波段时,不但损耗大到工程无法接受,而且波导口径尺寸和平面线宽都小至工程难以加工	颠覆金属波导全封闭和平面集成传输线半开放的结构,改用全开放式的介质波导,利用高介电常数介质与空气界面形成束缚电磁波于介质内部及表面附近传输的表面波	 介质圆波导  介质镜像线 毫米波段介质波导的损耗明显低于金属波导,而加工及公差要求又明显低于微带线、鳍线等平面传输线

特性和对航天器的反射特性。另外,也能理解航天器再入过程中为何会出现通信中断的“黑障效应”,它是航天飞行器以几十马赫(1马赫=1倍音速)的高速再入大气层过程中与周围空气剧烈摩擦而导致表层材料蚀蚀和周围空气电离,形成一个包裹于飞行器表面的非均匀等离子体鞘套,从而对通信电磁波产生强烈吸收和反射的结果。

0.3 本书内容及体系

全书内容共7章,概括为三句话:导波理论及其在规则导波系统场分析中的应用,传输线理论及其对微波系统中均匀区和不均匀区的电路等效和应用,常用微波无源元器件的分析与综合。

对于系统学习微波技术的读者,可将全书内容分为三部分:

第一部分,导波理论(第1章)及其应用(第2章),用“场”的方法分析微波传输线;

第二部分,传输线理论(第3章)及其应用(第4章),用“路”的方法分析微波传输线及微波系统;

第三部分,微波技术的综合应用,包括微波谐振器(第5章),常用微波元件(第6章)和微波无源器件(第7章)。

对于已具有微波技术基础的读者,可根据自己的实际需要直接介入所需知识点,学习中若遇难点,可借助于书末页提供的“索引”查看关联知识点内容。书中所涉及的各参量及其符号和单位一并列于文前的“符号表”中,以备辨识。

对于单求物理概念理解的读者,可直接借助于“索引”查阅各章节中相关概念和公式的“物理诠释”部分。

对于部分拓展性内容,书中以小字号排印,读者可据自己的需求选择阅读。

对于授课内容的取舍,若开设4学分课,可覆盖全部内容。若开设3学分课,可删去7.2,7.3和7.4节,另外,对“介质片波导”和5.5节仅作定性介绍。若开设2.5学分课,可删去“介质片波导”,5.5,5.6,5.8,7.2,7.3,7.4节,以及“小孔耦合理论”。

在课时分配上,以第1,2,3章为主,因第4章内容学生有相关基础,第5~7章内容是第1~3章内容的应用。重在概念和基础,概念清楚了才能理解,基础扎实了才能应用。在前三章中又以第1章和第3章为重点,因第2章是用第1章的同一把钥匙开不同形状但锁芯相同的锁。各章节具体课时的分配和讨论深度,需根据不同教师的授课风格和面授学生的素质灵活调整。