

微波电路与天线

WEIBO DIANLU YU TIANXIAN

(第2版)

闫述 郑召文 孔娃 编著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

微波电路与天线

WEIBO DIANLU YU TIANXIAN

(第2版)

闫 述 郑召文 孔 娃 编著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

内容简介

本书讲授了微波电路与天线的基本内容,包括传输线理论、规则波导、微波集成传输线、无源微波网络和器件、天线的辐射与接收、线天线与面天线、电波的传播,安排了最基本的微波电路与天线实验。

本书可作为高等学校通信工程专业本科生的教材,也可作为电子工程与通信工程技术人员或相关专业的技术人员进行继续教育的参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

微波电路与天线 / 闫述, 郑召文, 孔娃编著. — 2
版. — 镇江: 江苏大学出版社, 2017.10
ISBN 978-7-5684-0639-0

I. ①微… II. ①闫… ②郑… ③孔… III. ①微波电
路②微波天线 IV. ①TN710②TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268511 号

微波电路与天线

编 著/闫 述 郑召文 孔 娃

责任编辑/吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/镇江文苑制版印刷有限责任公司

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/20.25

字 数/517 千字

版 次/2017 年 10 月第 2 版 2017 年 10 月第 2 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0639-0

定 价/45.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

第 1 版前言

本书面向通信工程专业本科生讲授微波电路与天线的基本概念与理论,包括传输线理论、规则波导、微波集成传输线、无源微波网络和器件、天线的辐射与接收、线天线与面天线、电波的传播等,安排了最基本的微波电路与天线实验。这些内容也可作为电子和通信工程技术人员或相关专业技术人员继续教育的参考材料。微波电路与天线课程涉及通信系统中的硬件设备与物理信道,是今后从事通信技术工作的知识准备。全书共 90 学时,其中第 1~5 章微波电路部分 35 学时,第 6~9 章天线部分 35 学时,第 10 章的微波电路和天线实验各 10 学时共 20 学时。需要的先修课程有:高等数学、线性代数、电路分析、电磁场与电磁波。其中,电路分析、电磁场与电磁波是本课程“路”、“场”分析的基础,高等数学和线性代数提供了所需的数学工具。如果要进一步学习有源微波网格、有源微波器件,还要预备模拟电路、高频电子线路等先修课程。书中要学习的内容尽量是自包含的,用到的重要公式、定理,相关知识等在附录中给出。

本书的第 1~2 章、第 4 章由闫述和郑召文共同编写;第 6~9 章、附录 1~2、附录 4、附录 6~9 由闫述编写;绪论、第 3 章、第 5 章、附录 3、附录 5 由郑召文编写;第 10 章由孔娃编写。郑召文绘制了绪论、第 2~3 章、第 5 章、附录 3、附录 5 的图件;孔娃绘制了第 6~7 章、第 10 章的图件;硕士研究生封陆游绘制了其余各章、其余附录中的图件,检视了全部图件,进行了必要的修改或重绘;硕士研究生刘文平、陈斌参与绘制了部分图件。全书由闫述统稿,方云团核查了第 1~2 章、第 4 章,夏景在任课中发现和纠正了书稿的差错。

在成书过程中,作者就作为课程基础的电磁场与电磁波理论,向西安交通大学冯恩信教授多次请教,得到了悉心的指点。作者所在的江苏大学通信工程系,为教材编写和试讲尽最大可能地创造了条件。江苏大学通信工程系 0901,0902,1001,1002,1101,1102 班的同学们试用了讲义,喻志浩、姜修俊同学提出了宝贵的意见。硕士研究生解欢在助课的过程中验算了公式,并对文字和表述做了修改,徐婷婷协助校对了第 6~9 章。特别需要指出的是,江苏大学出版社以极大的耐心和热情从组稿、写作到完稿,给予了全程的支持、鼓励和督促。尽管环境如此有利,因作者水平所限,缺陷和错误仍不能避免,热切期待同学们、各位同行和读者的批评指正。

编 者

2015 年 4 月

第2版前言

本书第2版是经过两个年级的教学实践后,根据作者、任课教师 and 同学们发现的差错和问题,对第1版所做的修订。

恳请同学们、各位同行和读者继续批评指正。

编 者

2017年9月

目 录

0 绪 论	001
0.1 微波及其特点	001
0.2 微波技术的研究方法	003
0.3 天线与无线电波传播	004
0.4 本课程的体系结构	005
第 1 章 微波传输线理论	006
1.1 长线与分布参数	007
1.1.1 电长度与长线和短线	007
1.1.2 集总参数与分布参数	007
1.2 均匀传输线方程	008
1.2.1 均匀传输线等效电路	008
1.2.2 均匀传输线方程	009
1.2.3 均匀传输线方程的解	010
1.3 传输线的特性参数和状态参数	012
1.3.1 传输线的特性参数	012
1.3.2 传输线的状态参数	015
1.4 均匀无耗传输线的工作状态	017
1.4.1 行波状态	017
1.4.2 纯驻波状态	018
1.4.3 行驻波状态	022
1.5 传输线的传输功率、效率和损耗	024
1.5.1 传输功率与效率	024
1.5.2 回波损耗与插入损耗	025
1.5.3 传输线的功率容量	025
1.6 阻抗匹配	026
1.6.1 匹配状态	026
1.6.2 匹配方法	028
1.7 Smith 圆图	033
1.7.1 阻抗的归一化	033
1.7.2 反射系数图	033
1.7.3 阻抗圆图	034
1.7.4 导纳圆图	037
1.7.5 圆图的应用	038

4.9.3 输入驻波比和回波损耗	124
4.10 散射参量的三点测量法	125
本章小结	126
习 题	126
 第 5 章 微波元器件	129
5.1 连接匹配元件	129
5.1.1 终端负载元件	129
5.1.2 微波连接元件	131
5.1.3 衰减与相移元件	134
5.1.4 阻抗匹配元件	136
5.2 功率分配元器件	139
5.2.1 定向耦合器	139
5.2.2 功率分配器	143
5.2.3 波导分支器	145
5.3 微波谐振器件	148
5.3.1 微波谐振器件的演化过程	149
5.3.2 微波谐振器件的基本参量	149
5.3.3 同轴线谐振器	152
5.3.4 金属空腔谐振器	154
5.3.5 微带谐振器	157
5.3.6 介质谐振器	158
5.3.7 谐振器的耦合和激励	159
5.4 微波滤波器	160
5.4.1 滤波器的衰减特性	160
5.4.2 微带滤波器	160
5.4.3 同轴线滤波器	161
5.4.4 波导滤波器	162
5.4.5 陶瓷介质滤波器	162
5.5 微波铁氧体器件	162
5.5.1 铁氧体材料的特性	163
5.5.2 隔离器	163
5.5.3 环行器	165
5.5.4 其他铁氧体器件	167
本章小结	168
习 题	168
 第 6 章 天线的辐射与接收	170
6.1 基本阵子的辐射	170
6.1.1 电基本振子	170

6.1.2 磁基本振子	173
6.2 天线的电参数	174
6.2.1 发射天线特性	175
6.2.2 接收天线特性	180
本章小结	182
习 题	182
第 7 章 线天线	183
7.1 对称振子天线	183
7.1.1 对称天线特性	185
7.1.2 半波振子天线	188
7.2 阵列天线	188
7.2.1 二元阵	189
7.2.2 N 元直线阵	191
7.3 直立与水平振子天线	195
7.3.1 直立振子天线	195
7.3.2 水平振子天线	197
7.4 引向天线与电视天线	201
7.4.1 引向天线原理	201
7.4.2 电视发射天线	205
7.5 移动通信基站天线	206
7.5.1 移动基站天线的特点	206
7.5.2 移动基站天线的结构	207
7.6 螺旋天线	208
7.6.1 法向模螺旋天线	208
7.6.2 轴向模螺旋天线	209
7.7 行波天线	210
7.7.1 行波单导线天线	211
7.7.2 V 形和菱形天线	211
7.8 宽频带天线	212
7.8.1 非频变天线的条件	212
7.8.2 平面等角螺旋天线	213
7.8.3 对数周期天线	213
7.9 缝隙天线	214
7.9.1 理想缝隙天线的辐射场	214
7.9.2 波导缝隙天线	215
7.10 微带天线	216
7.10.1 微带天线结构	216
7.10.2 微带天线辐射原理	217
7.10.3 辐射场及方向函数	217

7.11 智能天线	218
7.11.1 自适应天线	219
7.11.2 智能天线	219
本章小结	220
习 题	221
 第 8 章 面天线	222
8.1 Huygens 元的辐射	222
8.2 平面口径的辐射	223
8.2.1 矩形口径的辐射场	224
8.2.2 圆形口径的辐射场	226
8.2.3 口径场不同相位时对辐射的影响	227
8.3 旋转抛物面天线	228
8.3.1 抛物面天线的工作原理	228
8.3.2 抛物面天线的辐射特性	229
8.3.3 天线的馈源	233
8.3.4 抛物面天线的偏焦特性及应用	233
8.4 Cassegrain 天线	234
8.4.1 Cassegrain 天线的几何特性	234
8.4.2 Cassegrain 天线的几何参数	235
8.4.3 Cassegrain 天线的等效抛物面	235
8.5 有效接收面积和 Friis 传输公式	236
8.5.1 有效接收面积	236
8.5.2 Friis 传输公式	237
本章小结	237
习 题	238
 第 9 章 电波传播概要	239
9.1 电波传播基本概念	239
9.1.1 自由空间中的电波传播	239
9.1.2 传输媒质对电波传播的影响	239
9.1.3 干扰与噪声	241
9.2 地面波传播	242
9.2.1 地面电性参数	242
9.2.2 地面波传播特性	242
9.3 天波传播	243
9.3.1 电离层与电波传播	243
9.3.2 天波传播模式	246
9.3.3 短波的天波传播特性	247
9.4 视距传播	248

9.4.1 传播主区和 Fresnel 区	248
9.4.2 地面对电波的影响	249
9.4.3 大气对电波的影响	252
9.4.4 视距传播特征	254
9.5 散射传播	254
本章小结	255
习 题	255
第 10 章 微波电路与天线实验	256
10.1 微波电路实验	256
实验一 微波测量系统的基本认知	256
实验二 测量线的使用及波长的测量	258
实验三 驻波比及反射系数的测量	261
实验四 阻抗的测量	263
实验五 双端口微波网络参数及测量	265
10.2 天线实验	267
实验六 天线方向图的测量	267
实验七 天线增益的测量	271
附 录 1	273
1-1 第二、三种边界条件传输线方程的解	273
1-1.1 第二种边界条件	273
1-1.2 第三种边界条件	273
1-2 分贝(dB)制	274
1-3 函数的周期	274
1-3.1 三角函数的周期	274
1-3.2 两函数之和的周期	275
1-4 几种双导体传输线的分布参数	275
1-5 有关电磁学常数	275
1-6 实用的 Smith 圆图	276
1-7 同轴线特性参量	277
1-7.1 常用硬同轴线特性参量	277
1-7.2 常用同轴射频电缆特性参量	277
附 录 2	278
2-1 标准矩形波导参数	278
2-2 柱谐函数的性质和曲线	279
2-2.1 函数的性质	279
2-2.2 函数的曲线	279
2-3 Bessel 函数的部分根	279

2-3.1	前 m 阶 $J'_m(u_{nm})$ 的部分根	279
2-3.2	前 m 阶 $J_m(v_{nm})$ 的部分根	279
2-4	Bessel 函数的积分	280
附录 3		281
3-1	保角变换	281
3-2	微带线中的纵向分量	283
附录 4		285
4-1	色散波中的等效特性阻抗	285
4-2	参考面移动对散射参量的影响	286
4-2.1	两参考面向外移动	286
4-2.2	两参考面向内移动	287
4-2.3	两参考面分别向内向外移动	288
4-2.4	其他情况	288
4-3	无耗网络 $[S]^T[S]^* = [1]$ 的证明	288
附录 5		290
5-1	微波元器件按变换性质分类	290
5-2	魔 T 在微波工程中的应用	290
5-2.1	魔 T 对任意负载的调配 (E-H 调配器)	290
5-2.2	魔 T 构成微波电桥	290
5-2.3	魔 T 构成任意移相器	291
5-2.4	双联魔 T 做雷达收发开关	291
5-3	电抗元件	291
5-3.1	膜片	292
5-3.2	谐振窗	293
5-3.3	销钉	293
5-3.4	螺钉调配器	294
附录 6		295
6-1	静态偶极子的场	295
6-1.1	静电偶极子的电场	295
6-1.2	恒定电流元的磁场	295
6-2	对偶原理	296
6-3	互易原理	297
附录 7		300
7-1	镜像原理 (理想导电面)	300
7-2	镜像原理 (理想导磁面)	302

附录 8	303
8-1 Huygens-Fresnel 原理	303
8-1.1 Kirchhoff 公式	303
8-1.2 Green 函数解	304
8-2 等效原理	304
附录 9	306
9-1 无线电波谱	306
9-2 各频段的主要信道模式、传播特性和典型应用	306
参考文献	308

0 绪 论

0.1 微波及其特点

微波(Microwave)是无线电波中频率最高(即波长最短)的波段,在电磁波谱中位于超短波和红外线之间(见图 0-1),频率范围 300 MHz ~ 3 000 GHz(对应真空中的波长 1 m~0.1 mm)。

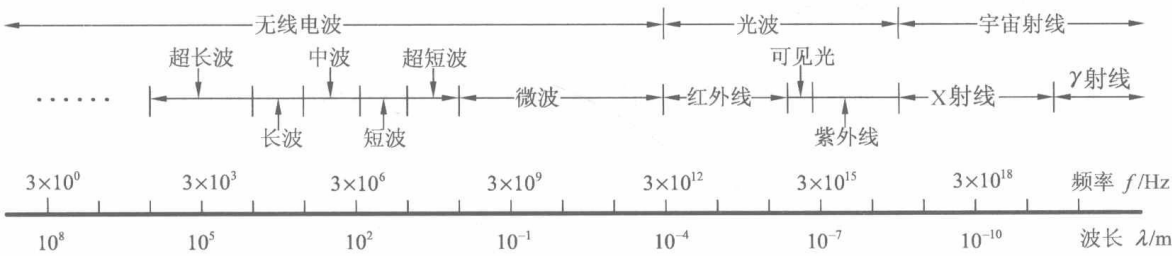


图 0-1 微波频段在电磁波频谱中的位置

微波波段通常又被划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波四个波段。在通信和雷达工程上还使用拉丁字母来表示微波波段更细致的划分,如表 0-1 和表 0-2 所示。

表 0-1 以波长表示的微波波段

波段名称	波长范围	频率范围/ GHz	频段名称
分米波	1 m ~ 10 cm	0.3 ~ 3	超高频 UHF
厘米波	10 cm ~ 1 cm	3 ~ 30	特高频 SHF
毫米波	10 mm ~ 1 mm	30 ~ 300	极高频 EHF
亚毫米波	1 mm ~ 0.1 mm	300 ~ 3 000	超极高频

表 0-2 以拉丁字母表示的微波波段

波段符号	频率范围/GHz	波段符号	频率范围/GHz
UHF	0.3 ~ 1.12	Ka	26.5 ~ 40
L	1.12 ~ 1.7	Q	33 ~ 50
LS	1.7 ~ 2.6	U	40 ~ 60
S	2.6 ~ 3.95	M	50 ~ 75
C	3.95 ~ 5.85	E	60 ~ 90

续表

波段符号	频率范围/GHz	波段符号	频率范围/GHz
XC	5.85 ~ 8.2	F	90 ~ 140
X	8.2 ~ 12.4	G	140 ~ 220
Ku	12.4 ~ 18	R	220 ~ 325
K	18 ~ 26.5		

微波在电磁波谱中所处的位置,使它具有以下特性。

(1) 似光性和视距传播

微波波长和地球上的一般物体(如飞机、舰船、导弹等)的尺寸相当或小得多,当微波辐射到这些物体上时,将产生显著的反射、折射,这和光的反射、折射一样;同时微波的传播特性也和几何光学相似,能够像光线一样直线传播;如同光可聚焦成光束,微波也可以通过天线装置形成定向辐射。利用微波的这些特性,发明了雷达系统,定向传输或接收空间传来的信号,进行微波通信或探测。

似光性使微波(还包括超短波)的传播为沿直线的视距传播。利用微波进行地面远距离通信时,由于地球曲率和障碍物(山脉、建筑物等)的阻拦,微波不能直接传播到很远的地方(通常为 20~50 km),需要在视距范围内建立中继站。

(2) 穿透性

微波照射到介质时具有穿透性,表现在云、雾、雪等对微波传播的影响较小,这是全天候微波通信和遥感的基础,微波能穿透生物体的特性是微波生物医学的基础。微波还可以穿越电离层,实验表明:微波波段中的 1~10 GHz,20~30 GHz 及 91 GHz 附近受电离层的影响较小,可以较为容易地通过电离层向外层空间传播,为空间通信、星际通信、卫星导航、卫星通信、遥感遥测和射电天文学提供无线电通道。

(3) 宽频带特性

微波频段的频带近 3 000 GHz,相比之下全部长波、中波、短波和超短波频段的频带总和不足 300 MHz。众所周知,需要传输的信息量越大、占用的频带就越宽。一个传输通道的相对带宽(频带宽度与中心频率之比)通常不能超过百分之几,为使多路电话、电视同时在一条线路上传送,就要使信道中心频率比所要传递的信息总带宽高几十到几百倍。微波占有的频带宽度大大提高了携带信息的能力,因此现代多路无线通信几乎都工作在微波波段。

(4) 散射特性

微波的散射特性构成了微波遥感、雷达成像的基础。电磁波入射到物体上时,会在除入射波方向外的其他方向产生散射。由于散射是电磁波和物体相互作用的结果,因此散射波包含有散射体的信息。通过对不同物体散射特性的检测,分析微波信号提供的相位、极化等各种频域和时域信息,可以从中提取目标特征,进行目标识别和成像。此外,利用大气对流层的散射还可以实现远距离的微波散射通信。

(5) 微波的热效应

微波电磁能量进入物体后,使其中的极性分子相互碰撞、摩擦,产生热能,称为微波热效应。由于微波能够直接进入物体内部,且具有效率高、速度快的选择性加热特性,因此被广泛应用在各行各业中。此外,微波对生物体的热效应也是微波生物医学的基础。

(6) 抗低频干扰

微波波段处在无线电波谱的高端,宇宙和大气在传输信道上产生的自然噪声、各种电器设备工作时产生的人为噪声通常在中低频区域,与微波波段的频率成分差别较大,因此,在微波滤波器的阻隔下,中低频噪声基本不会对微波通信造成影响。

(7) 电路参数的分布性

在低频情况下,电路系统的几何尺寸比工作波长小得多,因此稳定状态的电压和电流可认为是在整个系统各处同时建立起来的。电路元件可用不随时间和空间变化的参量(称为集总参量)表示。在微波频段,电磁振荡周期极短,系统中电压和电流建立的延时效应不能忽略,要用随时间和空间变化的参量,即分布参量表征。

(8) 微波的非热效应

微波的非热效应是指除热效应以外的其他效应,如电效应、磁效应及化学效应等。目前对微波的非热效应了解得还不是很多,一般认为,当生物体受强功率微波照射时,热效应是主要的(功率密度 10 mW/cm^2 以上多产生热效应,频率越高产生热效应的阈强度越低)。长期的低功率密度(1 mW/cm^2 以下)的微波辐射主要引起非热效应。

(9) 微波与电磁兼容

随着微波技术的发展,越来越多的无线设备在相同的区域同时工作,引起相互间的干扰,如飞行器、舰船上狭小空间中通信设备之间的影响,拥挤的公共场所中众多移动用户之间的影响等。微波设备经各种途径产生的微波辐射,是电磁污染的组成部分,那么,使微波设备不对周围环境(包括人体、生物和其他设备)造成干扰并且不被别的设备干扰的电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)问题,将成为微波技术的重要研究内容。

0.2 微波技术的研究方法

(1) 解析方法

微波技术是研究微波信号的产生、传输、变换、发射、接收和测量的一门学科。微波的上述特点,使它的应用范围、研究方法、传输系统、元器件和测量方法都与普通的无线电波不同,因此有必要将微波从普通无线电波中划分出来专门加以研究。

微波的基本理论是经典的电磁理论,是以 Maxwell 方程为核心的场与波的理论。研究微波技术问题的基本方法是场分析法,这与在低频电路中采用的路的概念和方法不同。在低频电路中,波长远大于电系统的几何尺寸,电路系统各处的电压和电流可以认为是同时建立起来的,电压、电流有确定的物理意义,能对系统做完全的描述,这就是以 Kirchhoff 方程为核心的低频电路理论。在微波电路中,工作波长与电路尺寸可相比拟,甚至更小,从源端起至负载端,波已变化了若干个周期,因此电磁场的相位滞后现象(延时效应)不能忽视。高于微波波段的光波、X 射线、 γ 射线等,波长远小于电系统的几何尺寸,甚至可与分子、原子的尺寸相比拟,有相应的光学理论和分析方法。微波波长因为与电系统的几何尺寸相当,不能直接用电路或光学的方法进行研究,只有用电磁场和电磁波的概念和方法才能对系统做完全的描述。

虽然场分析法是严格的,但解析求解比较繁杂,很多情况下还常需借助各种数值解法。实际上,许多微波工程问题所关心的仅是传输特征或者仅是某元器件的外部特性,

由此产生了在一定条件下化“场”为“路”的理论,如均匀传输线理论、微波网络理论等。“路”的方法是一种简便的工程计算方法,在微波技术中得到了广泛应用。场和路的方法之间是紧密相关、相互补充的,如传输线理论,虽然是路的方法,但传输线的分布参数还会用到场方法求解。此外,由于微波的似光性,一些光学分析中的概念、术语和公式,如直线传播、射线等都可以在微波电路和天线的分析中应用。

还有,和其他学科一样,在基本理论指导下的实验研究具有十分重要的意义。

(2) MATLAB(matrix & laboratory)分析工具

在微波电路与天线的解析分析中,涉及的数学公式冗长、繁琐,还经常用到多种特殊函数,往往需要借助计算机程序语言编程计算。MATLAB 是由美国 Math Works 公司发布的、面对科学计算可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。该软件集成了数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等功能。与 C、C++、FORTRAN、PASCAL、BASIC 相比,MATLAB 的主要特点如下:

① 有大量工程中用到的运算函数。所用的算法均为最新的研究成果,经过了各种优化和容错处理,包括矩阵运算和线性方程组的求解,微分方程及偏微分方程组的求解,符号运算,Fourier 变换,数据的统计分析,工程中的优化问题,稀疏矩阵运算,复数的各种运算,三角函数和其他初等数学运算,多维数组操作,以及建模动态仿真等。

② 高级图形和可视化处理功能。MATLAB 自产生之日起就具有方便的数据可视化功能,可将向量和矩阵用图形表现出来,对图形进行标注和打印。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图像处理、动画和表达式作图。

③ 功能强大的模块集和工具箱。MATLAB 配备了由特定领域专家开发的模块集和工具箱,有数据采集、数据库接口、概率统计、样条拟合、优化算法、偏微分方程求解、神经网络、小波分析、信号处理、图像处理、系统辨识、控制系统设计、LMI 控制、鲁棒控制、模型预测、模糊逻辑、金融分析、地图工具、非线性控制设计、实时快速原型及半物理仿真、嵌入式系统开发、定点仿真、DSP 与通讯、电力系统仿真等。

(3) 数值方法

除了将要在本书中学习的上述解析方法外,随着电磁场数值模拟和计算机(特别是微型计算机)技术的发展,针对无法用解析法分析的微波电路与天线问题,出现了各种与电磁场数值解法密切相关的 EDA(Electronic Design Automation)仿真软件,主要有:

- ① 矩量法的 ADS、Sonnet、IE3D、Microwave Office 等;
- ② 时域有限差分的 CST、Microwave Studio Fidelity、IMST Empire 等;
- ③ 有限元的 HFSS 等。

上述以电子系统设计为目标的 EDA 软件,有各自的功能特点和应用范围。在今后的微波电路与天线的分析、综合、设计中,可以根据需要选用。

0.3 天线与无线电波传播

微波技术的重要应用是将携带信号的电磁能量以无线方式进行发送和接收,天线担负着微波电路中辐射和接收电磁能量的任务;发射天线或其他辐射源发出的电磁波通过自然条件下的媒质到达接收天线的过程,即为无线电波传播。微波电路、天线与电波传播是无线电技术的重要组成部分。其中,微波电路主要研究引导电磁波在微波系统中的

传输、匹配、分配、滤波等(无源微波电路),还有信号的产生、方法、调制、变频等(有源微波电路);天线将导行波变换为向空间辐射的电磁波,或将空间中传播的电磁波变换为微波设备中的导行波;电波传播分析和研究电波在空间的传播方式和特点。

0.4 本课程的体系结构

本课程的先修课程有电路理论、电磁场与电磁波、高等数学、线性代数等。针对高等院校信息与通信工程本科生的教学,课程突出了基本原理和基本概念,介绍了最基本的内容。还有更多的例如有源网络和有源器件等,以及更详尽的阐述和最新进展,可参考相关书籍和文献。