



电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

无线通信

射频电路技术与设计

文光俊 谢甫珍 李 建 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

无线通信射频电路技术与设计

文光俊 谢甫珍 李 建 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在概述现代无线通信信道特性、调制与解调机理及类型、收发机结构及特点的基础上,全面系统地介绍了无线通信应用的射频电路与系统基础知识、单元功能电路原理和关键技术、电路制造技术及测试技术,通过实例阐明了各单元电路设计方法,并集成了该领域最新理论与实验研究成果。全书共十四章。第1章介绍收发机结构及应用,第2章至第7章分别介绍无源和有源射频元器件及模型、传输线理论及Smith圆图、射频网络参量及分析、阻抗匹配与调谐、噪声和非线性失真、电路和电磁场设计工具与仿真技术等基础知识,第8章至第12章分别介绍射频滤波器、放大器、信号产生电路(振荡器、压控振荡器与频率综合器)、频谱搬移电路(混频器、倍频器和分频器)、控制电路(开关、移相器、衰减器和限幅器)的原理及其分析和设计技术,第13章介绍射频电路制造技术,第14章介绍射频电路与系统测试技术。

本书是现代无线通信射频电路技术与设计的教材或参考书,既可作为电子信息类高年级本科生和研究生的教材,也可作为工程师应用的参考书,同时又是一本比较全面、系统的无线应用射频电路技术领域的专著。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线通信射频电路技术与设计/文光俊,谢甫珍,李建编著. —北京:电子工业出版社,2010.10
电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业
ISBN 978-7-121-11906-4

I. ①无… II. ①文… ②谢… ③李… III. ①无线电通信—射频电路—高等学校—教材 IV. ①TN92 ②TN710
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第188518号

策划编辑:李秦华

责任编辑:谭海平 特约编辑:王崧

印刷:北京丰源印刷厂

装订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:26.25 字数:672千字

印次:2010年10月第1次印刷

印数:4000册 定价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

近年来,以个人移动通信、卫星通信、无线局域网、宽带无线接入技术为代表的无线通信技术发展迅猛,其工作频率日益提高,促使射频电路技术得到了非常广泛的应用。射频微波电路技术为现代无线通信、定位、传感、识别等系统提供了关键的核心元器件及集成组件,已成为各种无线技术发展成功的关键,因此,得到了学术界和工业界的特别关注,无线通信射频电路及相关领域的从业人员与日俱增。针对国内没有面向无线通信等具体应用的射频电路与系统设计方法、制造工艺与测试技术介绍的教材和工程参考书现状,响应具有深刻理解并掌握射频电路设计原理及技术的工程师的巨大需求,在电子工业出版社的大力支持下,我们决定编写一本系统性介绍无线通信射频电路技术与设计的教材,希望对无线通信、微波技术专业的师生和专业技术人员有所裨益。

本书在简要介绍了移动通信、局域网、卫星通信、高速数据链等无线通信信道特性、调制与解调、收发机功能与结构的基础上,导出无线通信收发机中射频电路及集成系统的技术特点与要求,以及构成射频电路的各种无源和有源器件射频特性与等效电路模型。详细介绍了设计和分析射频电路特性必须理解和掌握的传输线理论、Smith 圆图及应用方法、射频网络参量及分析方法、阻抗匹配与调谐电路、噪声和非线性失真机理及效应、ADS (Advanced Design System)/MWO (Microwave Office) /HFSS (High Frequency Structure Simulator) 等常用射频/微波电路与电磁场设计和仿真 EDA 工具与应用技术等基础知识。然后详细介绍了射频滤波器、放大器、混频器、倍频器、分频器、振荡器、压控振荡器、频率综合器、开关、移相器、限幅器、衰减器等单元基础电路的工作原理、功能指标参数及技术要求、基本电路结构与类型、设计与仿真技术、其最新理论与实验研究成果。最后介绍了射频电路芯片材料与工艺、混合/单片集成电路、MCM 和三维集成电路等射频电路制造技术,射频电路与系统的噪声特性、频率特性、功率特性、传输与端口匹配特性的测试技术。

本书系统地介绍了无线通信射频电路基础知识,单元基础电路原理与设计方法,电路制造技术,制造工艺,射频电路与系统测试技术。全书共十四章。第 1 章介绍收发机结构及应用,第 2 章至第 7 章分别介绍无源和有源射频元器件及等效电路模型、传输线理论、Smith 圆图及应用方法、射频网络参量及分析方法、阻抗匹配与调谐、噪声和非线性失真、电路和电磁场设计工具与仿真技术等基础知识,第 8 章至第 12 章分别介绍射频滤波器、放大器、信号产生电路(振荡器、压控振荡器与频率综合器)、频谱搬移电路(混频器、倍频器和分频器)、控制电路(开关、移相器、限幅器和衰减器)的原理分析和设计技术,第 13 章介绍射频电路制造技术,第 14 章介绍射频电路与系统测试技术。

本书特点在于从射频电路元件、原理、工艺、性能出发,循序渐进地提升到射频电路设计的先进思想,全面系统地介绍了现代射频电路与系统所涉及的基础知识、基础功能电路原理与经典拓扑结构、设计方法、制造技术及测试技术,通过实例阐明了各单元电路设计方法与步骤、性能仿真技巧,并集成了该领域最新理论与实验研究成果,使其既是相关专业高年级本科生或研究生的教材,又是适合工程师的实用参考书或手册。

本书的完成得到了中国工程院院士李乐民教授、蔡竟业教授的支持和帮助,他们对本书的

编写提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

文光俊教授负责了本书第 1 章、第 8 章至第 12 章、第 14 章的编著及全书的审校工作；谢甫珍副教授编著了第 2 章至第 7 章；李建老师编著了第 13 章，并完成了全书的统稿工作。陈伟建副教授、王兵博士、包红玉、王记平、高凡青、解文军等研究生参与了本书的资料整理与校对工作，在此感谢他们的辛勤劳动和夜以继日的工作。最后，感谢电子工业出版社领导与编辑同志对本书顺利出版提供的大力支持与指导。

由于编著者水平有限，加之时间仓促，全书中难免有不妥之处，希望广大读者给予批评指正。

文光俊，谢甫珍，李建
2010 年 8 月于电子科技大学

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 电磁波频段划分及典型应用领域	1
0.2 电磁波传播特性	2
0.2.1 自由空间中的传播	2
0.2.2 传输媒介对电波传播的影响	2
0.3 无线信道特性及容量	3
0.3.1 无线信道特性	3
0.3.2 通信带宽与信息容量	3
0.4 无线通信调制解调与多址方式	4
0.5 典型的无线通信系统	4
0.5.1 移动通信	4
0.5.2 卫星通信	5
0.5.3 无线局域网	5
0.6 无线通信系统的组成	5
0.7 无线收发信机射频前端功能和特性	6
0.8 无线通信及射频电路技术发展趋势	7
第 1 章 无线通信收发机结构	8
1.1 概述	8
1.2 无线通信接收机结构	9
1.2.1 接收机的性能指标	9
1.2.2 超外差式接收机	10
1.2.3 直接下变频接收机	14
1.2.4 低中频接收机结构	14
1.2.5 镜频抑制接收机	15
1.2.6 数字中频接收机	18
1.3 无线通信发射机	19
1.3.1 发射机的主要性能指标	19
1.3.2 发射机的主要结构	19
1.4 集成收发系统结构	21
1.5 典型应用的集成收发机	22
1.5.1 GSM 收发机	22
1.5.2 应用于无线局域网的收发机	25
1.5.3 应用于无线传感器网络的低功耗收发机	27

1.6 集成收发机的发展趋势	27
本章小结	28
习题	28
第2章 射频元器件及电路模型	30
2.1 无源集总元件	30
2.1.1 电阻器	30
2.1.2 电容器	31
2.1.3 电感器	33
2.1.4 无源元件的射频特性	34
2.2 射频二极管	35
2.2.1 肖特基二极管	36
2.2.2 PIN 二极管	37
2.2.3 变容二极管	39
2.2.4 IMPATT 二极管	40
2.2.5 耿氏二极管	42
2.2.6 其他二极管	42
2.3 双极型晶体管	42
2.3.1 双极型晶体管工作特性	42
2.3.2 异质结双极型晶体管 (HBT)	47
2.4 场效应晶体管	48
2.4.1 MESFET 工作特性	48
2.4.2 高电子迁移率晶体管	55
2.4.3 PHEMT 技术	57
2.4.4 金属氧化物场效应管 (MOSFET)	58
2.4.5 CMOS 技术	63
2.4.6 BiCMOS 技术	63
2.5 双极型器件和场效应器件的比较	64
2.5.1 双极型器件和场效应器件的 f_T 和 f_{max}	65
2.5.2 双极型和场效应器件的噪声性能	65
2.5.3 双极型器件和场效应器件的功率与线性度性能	66
本章小结	67
习题	67
第3章 传输线理论	69
3.1 传输线理论基础	69
3.2 传输线的种类	70
3.2.1 普通传输线结构及特性	70
3.2.2 平面传输线结构及特性	72

3.3	传输线的集总元件电路模型	77
3.3.1	由电路理论过渡到集总元件电路	77
3.3.2	集总元件电路上的传输线的场分析	79
3.4	端接负载的无耗传输线	82
3.4.1	电压反射系数	82
3.4.2	传播常数和相速	83
3.4.3	驻波	83
3.4.4	开路线、短路线、四分之一波长传输线	84
3.5	有耗传输线	87
3.5.1	低耗线	87
3.5.2	无畸变	88
3.5.3	输入阻抗	88
3.5.4	入射波的功率损耗	89
3.5.5	用微扰方法求损耗	90
3.5.6	惠勒增量电感定则	91
3.6	Smith 圆图	92
3.6.1	特殊变换	93
3.6.2	阻抗 Smith 圆图	95
3.6.3	导纳 Smith 圆图	97
3.6.4	阻抗-导纳组合 Smith 圆图	98
	本章小结	99
	习题	100
第 4 章	射频网络分析	102
4.1	阻抗和导纳矩阵	102
4.1.1	阻抗矩阵和导纳矩阵概念	102
4.1.2	互易网络	104
4.1.3	无耗网络	105
4.2	传输 (ABCD) 矩阵	106
4.2.1	ABCD 矩阵表示方法	106
4.2.2	与阻抗矩阵的关系	108
4.3	混合 (H) 参量矩阵	109
4.3.1	H 参量描述	109
4.3.2	互连网络	110
4.4	散射参量	113
4.4.1	散射参量的定义	113
4.4.2	散射参量的物理意义	114
4.4.3	链形散射矩阵	117
4.4.4	Z 参量与 S 参量之间的转换	118

4.4.5 S 参量的推广	119
4.5 信号流图	120
4.5.1 信号流图的分解	121
4.5.2 散射参量的测量	124
本章小结	127
习题	127
第 5 章 阻抗匹配和调谐	130
5.1 分立元件匹配网络	130
5.1.1 L 形匹配网络	130
5.1.2 匹配禁区、频率响应及品质因数	134
5.1.3 T 形匹配网络和 π 形匹配网络	138
5.2 微带线匹配网络	140
5.2.1 从分立元件到微带线	140
5.2.2 单节短截线匹配网络	141
5.2.3 双短截线匹配网络	147
5.3 四分之一波长阻抗变换器	151
5.4 渐变传输线阻抗变换器	153
5.4.1 指数渐变	154
5.4.2 三角形渐变	154
5.4.3 Klopfenstein 渐变	155
5.5 宽带阻抗电路的阻抗变换	157
5.5.1 普通变压器	157
5.5.2 传输线变压器	157
本章小结	159
习题	159
第 6 章 噪声和非线性失真	161
6.1 射频电路中的噪声	161
6.1.1 噪声的分类	161
6.1.2 二端口网络的等效噪声温度和噪声系数	163
6.1.3 二端口网络级联链路的噪声系数	165
6.1.4 无线通信系统中的噪声抑制	166
6.2 射频电路中的非线性失真	166
6.2.1 非线性网络级联链路的 3 阶交调截点	169
6.2.2 无线通信系统中非线性失真的抑制方法	170
6.3 灵敏度与动态范围	172
6.3.1 灵敏度	172
6.3.2 动态范围	173

6.4 无线通信收发链路性能指标分析	174
6.4.1 系统链路指标分配原则及计算	175
本章小结	176
习题	176
第 7 章 射频电路设计的 CAD 技术	178
7.1 集成的 CAD 设计平台	178
7.2 CAD 程序包的特点	180
7.2.1 支持工具	180
7.2.2 原理图捕获	180
7.2.3 层次化设计	181
7.2.4 模拟控制参数	181
7.2.5 电路元件库	182
7.2.6 电路优化	182
7.2.7 版图	183
7.3 电路模拟技术	184
7.3.1 直流模拟器	185
7.3.2 线性模拟器	185
7.3.3 谐波平衡模拟器	186
7.3.4 Volterra 级数	187
7.3.5 瞬态分析	188
7.3.6 卷积分析	188
7.3.7 噪声分析	188
7.3.8 包络模拟	189
7.3.9 混合模式分析	189
7.3.10 成品率分析	190
7.4 电磁模拟技术	191
7.4.1 电磁求解程序的要求	191
7.4.2 EM 软件	193
7.4.3 EM 模拟器的应用和局限性	194
7.4.4 EM 模拟器的类型	194
7.4.5 数值方法	195
7.4.6 EM 模拟器的特性	197
7.4.7 优化 EM 模拟器的性能	200
7.4.8 商用 EM 软件包	201
7.5 商用 CAD 程序包	206
7.5.1 Agilent EEsof EDA Series IV (6.0 版)	207
7.5.2 Agilent EEsof EDA ADS (1.3 版)	208
7.5.3 Ansoft 公司的 Serenade Desktop (8.5 版)	208

7.5.4	AWR 公司的 Microwave Office 2000 (3.2 版)	209
7.5.5	Cadence 公司的 Analog Artist	210
7.5.6	Optotek 公司的 MMICAD (2.0 版)	210
7.5.7	Eagleware 公司的 Genesys (7.0 版)	210
	本章小结	210
第 8 章	射频滤波器	211
8.1	常见的射频滤波器	211
8.1.1	LC 滤波器	211
8.1.2	晶体滤波器	213
8.1.3	陶瓷滤波器	213
8.1.4	声表面波滤波器	213
8.1.5	薄膜体声滤波器	214
8.2	滤波器的基本结构	214
8.3	滤波器基本分析方法	216
8.3.1	镜像参量法	216
8.3.2	插入损耗法	217
8.4	低通滤波器原型	218
8.4.1	巴特沃斯低通滤波器	218
8.4.2	线性相位低通滤波器	219
8.4.3	切比雪夫低通滤波器	220
8.4.4	高斯低通滤波器	222
8.5	滤波器设计方法	223
8.5.1	频率变换	223
8.5.2	阻抗变换	224
8.5.3	Richards 变换	228
8.5.4	单位元件法	228
8.5.5	Kuroda 规则	229
8.6	耦合线滤波器	230
8.6.1	耦合微带线滤波器	230
8.6.2	耦合谐振器滤波器	233
	本章小结	237
	习题	238
第 9 章	射频放大器	240
9.1	射频放大器的相关理论	240
9.1.1	放大器的稳定性	240
9.1.2	射频放大器的功率增益	245
9.1.3	放大器的噪声系数圆	252

9.2	射频放大器偏置电路	254
9.2.1	双极型晶体管的偏置网络	254
9.2.2	场效应晶体管的偏置网络	256
9.3	低噪声放大器设计	256
9.3.1	低噪声放大器简介	256
9.3.2	低噪声放大器的主要技术指标	257
9.3.3	低噪声放大器基本电路	258
9.3.4	常见的 LNA 电路配置	258
9.3.5	低噪声放大器的设计步骤	259
9.3.6	低噪声放大器设计举例	260
9.4	功率放大器设计	262
9.4.1	功率放大器简介	262
9.4.2	功放的工作类型	263
9.4.3	功率放大器的主要性能指标	264
9.4.4	功率放大器的设计步骤	265
9.4.5	功率放大器设计举例	266
9.4.6	功率合成技术	268
9.4.7	功率放大器的线性化技术	269
9.4.8	功率放大器的效率增强技术	273
	本章小结	276
	习题	276
第 10 章	射频信号产生电路	278
10.1	射频振荡器	278
10.1.1	振荡器电路分析方法	278
10.1.2	共发射极的双极型晶体管振荡器	280
10.1.3	共栅极场效应晶体管的振荡器	282
10.1.4	晶体振荡器	284
10.1.5	振荡器相位噪声分析	284
10.2	固定频率振荡器	287
10.2.1	TDRO 作为串联反馈元件	287
10.2.2	TDRO 用做并联反馈元件	290
10.2.3	串联反馈与并联	291
10.2.4	振荡器最大输出功率	291
10.2.5	TDRO 的温度稳定性	291
10.2.6	TDRO 的调谐	293
10.2.7	传输线谐振腔振荡器	294
10.3	可调谐射频振荡器	295
10.3.1	YIG 调谐振荡器	295

10.3.2	压控振荡器 (VCO)	298
10.4	频率合成器	300
10.4.1	分频器“延时”	301
10.4.2	带有静态模数的频率合成器	302
10.4.3	带有抖动模数的频率合成器	303
10.4.4	组合式频率合成器	303
10.4.5	直接数字合成器	304
	本章小结	305
	习题	305
第 11 章	频谱搬移电路	307
11.1	频谱搬移原理及分析方法	307
11.2	射频混频器	308
11.2.1	混频器的特性	308
11.2.2	抑制混频干扰和失真的方法	310
11.2.3	单端二极管混频器	311
11.2.4	单端 FET 混频器	312
11.2.5	单平衡二极管混频器	313
11.2.6	单平衡有源混频器	314
11.2.7	双平衡二极管混频器	316
11.2.8	吉尔伯特双平衡混频器 (有源双平衡混频器)	317
11.2.9	混频器设计举例	318
11.3	射频倍频器	319
11.3.1	非线性电抗器件倍频器	320
11.3.2	非线性电阻器件倍频器	320
11.3.3	有源倍频器	321
11.4	射频分频器	322
11.4.1	参量式二分频器	322
11.4.2	再生式分频器	323
11.4.3	数字式分频器	324
11.4.4	注入锁相振荡器式分频器	325
	本章小结	326
	习题	326
第 12 章	射频控制电路	329
12.1	射频开关	329
12.1.1	PIN 二极管	329
12.1.2	GaAs FET	330
12.1.3	电路设计	332

12.2	射频移相器	342
12.2.1	概述	342
12.2.2	移相器的主要技术指标	344
12.2.3	开关线型移相器	344
12.2.4	加载线型移相器	346
12.2.5	反射型移相器	348
12.2.6	高通/低通滤波器型移相器	351
12.2.7	放大器型移相器	353
12.3	射频衰减器	356
12.3.1	数字衰减器	356
12.3.2	模拟衰减器	361
12.4	射频频幅器	364
12.4.1	用于限幅的各种现象	364
12.4.2	PIN 二极管限幅器	366
12.4.3	微带结构限幅器	367
	本章小结	368
	习题	368
第 13 章	射频电路制造技术	371
13.1	微波电路引言	371
13.1.1	材料与工艺	371
13.1.2	掩模设计	374
13.1.3	掩模制造	374
13.2	印制电路板	378
13.2.1	PCB 制造	379
13.2.2	PCB 实例	379
13.3	混合集成电路	379
13.3.1	薄膜 MIC	380
13.3.2	厚膜工艺	380
13.3.3	烘烤陶瓷和玻璃陶瓷工艺	381
13.4	单片集成电路	382
13.4.1	MMIC 制造	383
13.4.2	MMIC 例子	384
13.5	MCM 和 3D 集成电路	384
	本章小结	385
第 14 章	射频电路与系统测试技术	386
14.1	基本测试设备	386

14.1.1	信号源	386
14.1.2	频谱分析仪	386
14.1.3	矢量网络分析仪	388
14.1.4	噪声系数分析仪	396
14.2	频率特性测试技术	397
14.2.1	外差法	397
14.2.2	计数法	398
14.2.3	测量系统的三阶截断点的方法	398
14.3	噪声特性测试技术	399
14.3.1	直接测量法	399
14.3.2	鉴相器法	400
14.3.3	鉴频器法	401
14.4	功率特性测试技术	401
14.4.1	微波功率测量方法	402
14.4.2	功率测量中的误差	402
14.5	温度特性测试技术	403
14.5.1	低温测量	404
	本章小结	404
	参考文献	405

第 0 章 绪 论

0.1 电磁波频段划分及典型应用领域

当今，影响电子（尤其是无线）通信系统发展的一个最重要制约因素是不可再生的频谱资源。几乎所有新理论/技术的出现，本质上都是为了在频谱（带宽）受限的条件下传送更多的信息和容纳更多的通信用户。

通常频谱资源由所在国或地区的政府的有关部门统一管理（中国为无线电管理局），各国的管理部门又组成国际电信联盟（ITU）负责对全球的频谱资源进行协调分配和管理。目前，已经知道的电磁频谱频率范围大约为 $10^0 \sim 10^{22}$ Hz。当今最为通用的频段划分是由国际电气和电子工程师学会（IEEE）建立的，如表 0.1 所示。而我国在某些工程领域常沿用前苏联制式，如表 0.2 所示。

表 0.1 IEEE 频段划分

频 段	频 率	波 长	主 要 用 途
ELF (极低频)	30~300 Hz	10 000~1000 km	工频（交流配电）信号、低频遥测信号
VF (音频)	300~3000 Hz	1000~100 km	语音频带（信道）
VLF (甚低频)	3~30 kHz	100~10 km	人类听觉高端（音乐、声呐）政府或军事系统，如潜艇通信
LF (低频)	30~300 kHz	10~1 km	船舶与航空导航
MF (中频)	300~3000 kHz	1~0.1 km	商用 AM 无线广播
HF (高频)	3~30 MHz	100~10 m	短波广播、短波通信电台、业余无线电台
VHF (甚高频)	30~300 MHz	10~1 m	商业 FM 广播（88~108 MHz） 商业电视（54~216 MHz，2~13 频道） 移动通信（集群）、船舶、航空通信
UHF (超高频)	300~3000 MHz	100~10 cm	商业电视（14~83 频道）、陆上移动、蜂窝电话、雷达、导航系统，微波及卫星无线电系统
SHF (特高频)	3~30 GHz	10~1 cm	微波及卫星无线电系统
EHF (极高频)	30~300 GHz	1~0.1 cm	视距通信，波束方向集中，目前主要用于保密性要求高的军事领域
亚毫米波	300~3000 GHz	1~0.1 mm	光纤通信
红外	0.3~300 THz		
可见光	0.3 PHz~3 PHz		
紫外	10^{16} Hz		
X 射线	10^{19} Hz		
伽马射线	10^{20} Hz		
宇宙射线	大于等于 10^{22} Hz		

表 0.2 我国工程常用频段划分

波 段	频 率	波 长
P 波段	0.23~1 GHz	130~30 cm
L 波段	1~2 GHz	30~15 cm
S 波段	2~4 GHz	15~7.5 cm

(续表)

波 段	频 率	波 长
C 波段	4~8 GHz	7.5~3.75 cm
X 波段	8~12.5 GHz	3.75~2.4 cm
Ku 波段	12.5~18 GHz	2.4~1.67 cm
K 波段	18~26.5 GHz	1.67~1.13 cm
Ka 波段	26.5~40 GHz	1.13~0.75 cm

频段的划分不可能给出精确的界限，它们是有交叉的。对电子通信系统而言，一个实用的界限即为传播信号的波长是否与电子系统的实际尺寸相当。射频（RF）频段现在通常是指 VHF~X 波段，这个频段也是目前大多数集总元件所能达到的工作频段。

0.2 电磁波传播特性

在无线通信中，一个很重要的组成部分就是无线电波的传播部分，即从发射天线到接收天线，亦即所谓的“无线信道”部分。电磁波在实际媒介空间的传播从理论分析上，可以视为自由传播加上传输媒介的影响。

0.2.1 自由空间中的传播

设发射天线的输入功率为 P_i ，天线增益系数为 G_i ，则离天线 r 处的场强功率谱密度 E_0 为

$$E_0 = \frac{\sqrt{30P_i G_i}}{r}$$

功率谱密度 S_0 为 $S_0 = \frac{|E_0|^2}{120\pi}$ 。

若接收天线的增益系数为 G_R ，有效接收面积为 A_e ，则距离发射天线 r 处实际理论上能接收到的功率为

$$P_R = S_0 \cdot A_e = \frac{P_i G_i}{4\pi r^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

式中， λ 为无线电波之波长。于是我们可以得到自由空间基本传输损耗（输入功率与接收功率之比）为

$$L_{bf} = \frac{P_i}{P_R} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_i G_R}$$

用对数表示为

$$L_{bf}(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_i}{P_R} = 32.45 + 20 \lg f(\text{MHz}) + 20 \lg r(\text{km}) - G_i(\text{dB}) - G_R(\text{dB})$$

上式表明，电磁波在自由空间的传播损耗是由于球面波随距离增大，能量自然扩散而引起的。

0.2.2 传输媒介对电波传播的影响

1. 传输损耗（无线信道损耗）

电波在实际媒质中的传播是有能量损耗的。这种能量的损耗主要是由于媒介对电波的吸收、散射引起的，也可能是由于障碍物的绕射而引起的。我们将这种损耗定义为信道衰减因子，用 A 表示：