

微波射频技术 电路设计与分析

王培章 余同彬 晋军 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

微波射频技术 电路设计与分析

王培章 余同彬 晋军 编著

国防工业出版社

·北京·

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16章。介绍了收发机结构及应用、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、噪声和非线性失真、电路和电磁场设计工具与仿真技术、射频放大器、信号产生电路(振荡器、压控振荡器与频率合成器)、频谱搬移电路(混频器、倍频器和分频器)、微波测试技术、射频电路基片、混合/单片集成电路、MCM和三维集成电路、微波电路的工程设计案例、ADS射频电路设计基础、射频同轴电缆和连接器。书中有些章附有思考题和习题。

本书针对现代微波射频电路技术与设计的人才培养编写,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、系统的无线应用微波射频电路技术领域的专著。

图书在版编目(CIP)数据

微波射频技术电路设计与分析 / 王培章,余同彬,
晋军编著. —北京:国防工业出版社,2012.8
ISBN 978-7-118-08258-6

I. ①微… II. ①王… ②余… ③晋… III. ①微波电
路—射频电路—电路设计②微波电路—射频电路—电路分
析 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 177672 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27½ 字数 631千字
2012年8月第1版第1次印刷 印数 1—3500册 定价 82.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

近年来,无线通信技术及其应用得到了非常迅速的发展。无线通信的飞速发展给无线收发机射频前端的设计带来了很多挑战。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广泛的应用。射频微波电路技术为现代无线通信、定位、传感、雷达、射频识别、认知无线电、电子对抗、卫星导航、遥感遥测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。

现在,许多大学和工业界都在进行射频集成电路的研究,采用射频集成电路的产品越来越多,功能也越来越复杂,射频集成电路开始进入真正的产品开发阶段。与这一阶段相适应,工业界对射频集成电路设计人才具有巨大的需求,而且在不久的将来该需求还会逐渐增加。为了加快射频集成电路人才的培养,国内迫切需要一本较好的射频电路教材。本书正是在这样的背景下完成的。它以实现一个完整的无线收发机射频前端为主线,按照“射频电路基础—射频电路元器件—无线收发机系统结构—射频模块电路分析与设计—后端设计与混合信号集成—无线收发机实例”的结构编写。在编写过程中,编者力图面向实际应用,在介绍基本概念的基础上,着重讨论在集成射频前端框架下各模块电路的设计方法及提高性能的措施。书中讲述的主要概念和方法都尽量通过具有实际应用价值的设计实例加以解释和说明,使读者能够举一反三,独立解决射频电路设计中的实际问题。通过本书的学习,读者可以进行基本的射频电路设计,并对无线收发机射频前端结构选择以及模块划分、性能指标分配等初步了解。编写本书的另一个目的是对目前为止出现的射频电路设计技术进行总结。因此本书的内容力图反映射频集成电路领域的最新进展,在内容上包括了很多先进的射频集成电路设计技术。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。

本书在简要介绍移动通信、局域网、卫星通信、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。全书共 16 章。第 1 章介绍无线通信中射频收发机结构及其应用。第 2~7 章详细介绍了设计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、数字调制技术、射频网络参量及分析方法、噪声和非线性失真机理及效应、ADS/MWO/HFSS 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。第 8~12 章分别介绍无线收发机射频前端的系统结构、射

频低噪声放大器、微波功率放大器、微波功率放大器的线性化技术、混频器、倍频器、分频器、振荡器、压控振荡器、频率综合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、设计与仿真技术及其最新理论与实验研究成果。第 13 章介绍了射频电路基片、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。第 14 章介绍了微波电路的工程设计案例。第 15 章介绍了 ADS 射频电路设计基础。第 16 章介绍了射频同轴电缆和连接器。每章后附有练习用的习题可供广大师生选用。

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。

本书由王培章教授统筹全书内容。在本书的编写过程中,得到解放军理工大学通信工程学院教保处的大力支持,在此深表感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者
2012.4

目 录

第 1 章 无线通信中射频收发信机结构及应用	1
1.1 无线收发信机射频前端功能和特性	1
1.2 射频电路在系统中的作用与地位	1
1.3 射频电路与微波电路和低频电路的关系	3
1.3.1 频段划分	3
1.3.2 电路的设计考虑	4
1.4 集成收发系统结构	5
1.5 典型应用的集成收发信机	5
1.5.1 全球数字移动通信系统收发机	6
1.5.2 应用于无线局域网的收发机	7
1.5.3 应用于无线传感器网络的低功耗收发机	8
1.5.4 应用于 WCDMA	9
1.6 无线通信及射频电路技术发展趋势.....	10
1.7 射频电路基础.....	11
1.7.1 频带宽度表示法	11
1.7.2 分贝表示法	12
第 2 章 射频元器件及电路模型	16
2.1 无源集总元件.....	16
2.1.1 电阻器	16
2.1.2 电容器	17
2.1.3 电感器	19
2.1.4 无源元件的射频特性	21
2.2 射频二极管.....	21
2.2.1 PIN 二极管	22
2.2.2 变容二极管	23
2.2.3 肖特基二极管	24
2.2.4 IMPATT 二极管	25
2.2.5 其他二极管	25
2.3 双极型晶体管.....	26
2.3.1 双极型晶体管工作特性	26
2.3.2 异质结双极型晶体管	29
2.4 场效应晶体管.....	30
2.4.1 MESFET 工作特性	31

2.4.2	高电子迁移率晶体管	35
2.4.3	PHEMT 技术	36
2.4.4	金属氧化物场效应管	37
2.5	双极型器件和场效应器件的比较	38
2.5.1	双极型器件和场效应器件的 f_T 和 f_{max}	39
2.5.2	双极型和场效应器件的噪声性能	39
2.5.3	双极型器件和场效应器件的功率与线性度性能	40
第 3 章	数字调制	43
3.1	数字调制简介	43
3.1.1	引言	43
3.1.2	数字调制的类型	43
3.1.3	数字调制功率	45
3.1.4	衡量数字调制技术的性能指标	47
3.2	相移键控的调制方式	48
3.3	幅移键控的调制方式	51
3.4	多载波调制和正交频分复用	54
3.4.1	MCM	54
3.4.2	OFDM	54
3.5	数字调制要素	56
3.6	调制器/解调器集成电路的设计	59
第 4 章	射频网络分析	63
4.1	网络基本概念	63
4.1.1	线性网络	63
4.1.2	阻抗矩阵和导纳矩阵概念	64
4.2	散射参量	66
4.2.1	散射参量的定义	66
4.2.2	散射参量的物理意义	68
4.2.3	S 参量的推广	69
4.2.4	多端口网络散射矩阵	70
4.2.5	散射矩阵的性质	71
第 5 章	传输线理论	74
5.1	传输线理论基础	74
5.2	传输线的种类	75
5.2.1	普通传输线结构及特性	75
5.2.2	平面传输线结构及特性	77
5.3	均匀传输线方程	80
5.4	传输线阻抗与状态参量	84
5.5	无耗传输线的状态分析	86
5.6	Smith 圆图	90

5.6.1	特殊变换	91
5.6.2	阻抗 Smith 圆图	92
5.6.3	导纳 Smith 圆图	93
5.6.4	阻抗——导纳组合 Smith 圆图	94
第 6 章	噪声和非线性失真	98
6.1	射频电路中的噪声	98
6.1.1	噪声的分类	98
6.1.2	二端口网络的等效噪声温度和噪声系数	100
6.1.3	二端口网络级联链路的噪声系数	102
6.2	灵敏度与动态范围	104
6.2.1	灵敏度	104
6.2.2	动态范围	105
6.3	非线性与时变性	106
6.3.1	非线性的影响	107
6.3.2	级联非线性	112
6.4	无线通信收发链路性能指标分析	113
第 7 章	射频电路设计的 CAD 技术	117
7.1	集成的 CAD 设计平台	117
7.2	CAD 程序包的特点	119
7.2.1	支持工具	119
7.2.2	原理图捕获	119
7.2.3	层次化设计	120
7.2.4	模拟控制参数	120
7.2.5	电路元件 CAD	121
7.2.6	电路优化	122
7.2.7	版图	123
7.3	电路模拟技术	123
7.3.1	直流模拟器	124
7.3.2	线性模拟器	125
7.3.3	谐波平衡模拟器	125
7.3.4	Volterra 级数	126
7.3.5	卷积分析	128
7.3.6	包络模拟	128
7.3.7	综合化射频信道的半实物仿真设计	129
第 8 章	无线收发信机射频前端的系统结构	134
8.1	接收机射频前端的系统结构	134
8.1.1	超外差式接收机	135
8.1.2	零中频接收机	146
8.1.3	低中频接收机	150

8.1.4	其他结构的接收机	153
8.2	发射机射频前端的系统结构	155
8.2.1	直接上变频发射机	156
8.2.2	两步发送器	157
8.2.3	其他结构的发射机	157
8.3	接收发送器	158
8.3.1	Philips DECT 接收发送器	158
8.3.2	朗讯(Lucent)GSM 接收发送器	159
8.4	软件无线电接收机和数字中频接收机	161
8.4.1	软件无线电接收机的结构及其特点	161
8.4.2	软件无线电接收机区域模块特点	162
8.4.3	软件无线电接收机的硬件结构及实现	162
第9章	射频放大器	166
9.1	射频放大器的相关理论	166
9.1.1	放大器的稳定性	167
9.1.2	射频放大器的功率增益	168
9.2	射频放大器偏置电路	171
9.2.1	双极型晶体管的偏置电路	172
9.2.2	场效应晶体管的偏置电路	173
9.3	低噪声放大器设计	173
9.3.1	低噪声放大器简介	173
9.3.2	低噪声放大器的主要技术指标	174
9.3.3	低噪声放大器基本电路	175
9.3.4	常见的 LNA 电路配置	175
9.3.5	低噪声放大器的设计步骤	176
9.3.6	低噪声放大器设计举例	177
9.4	射频功率放大器	178
9.4.1	晶体管非线性模型	178
9.4.2	性能参数	178
9.5	传统功率放大器	182
9.5.1	波形分析	182
9.5.2	输出终端	183
9.6	开关模式功率放大器	184
9.6.1	D类功率放大器	185
9.6.2	E类功率放大器	186
9.6.3	F类功率放大器	187
9.6.4	不同类型功率放大器性能比较	188
9.7	功率放大器电路设计技术	188
9.7.1	差分结构	188

9.7.2	功率合成	189
9.8	线性化技术	191
9.8.1	功率放大器非线性的影响	192
9.8.2	调制方式	195
9.8.3	线性化技术和提高效率的技术	197
9.8.4	功率放大器的主要性能指标	205
9.8.5	功率放大器的设计步骤	206
第 10 章	射频信号产生电路	210
10.1	射频振荡器	210
10.1.1	振荡器电路分析方法	210
10.1.2	共发射极的双极型晶体管振荡器	212
10.2	压控振荡器的相位域模型	213
10.3	相位噪声和抖动	213
10.3.1	相位噪声	213
10.3.2	相位噪声分析模型	216
10.3.3	振荡器相位噪声分析	218
10.4	微波频率振荡器	222
10.4.1	TDRO 作为串联反馈元件	222
10.4.2	TDRO 用做并联反馈元件	223
10.4.3	振荡器最大输出功率	224
10.4.4	压控振荡器	225
10.4.5	压控振荡器 HMC513LP5	227
10.5	锁相环的基本概念	228
10.5.1	锁相环的基本原理	228
10.5.2	锁相环的噪声分析	231
10.5.3	相位噪声产生的机理	232
10.5.4	相位噪声带来的问题	233
10.6	频率合成的基本概念	235
10.6.1	频率合成器的基本原理	235
10.6.2	频率合成器的常用技术方案	239
10.6.3	频率合成的主要参数	241
10.7	锁相频率合成器的设计	242
10.7.1	基本的设计思路	242
10.7.2	环路滤波器的设计	245
10.7.3	PLL 的各个部件选购和设计	246
10.7.4	PLL 的锁定过程	247
10.7.5	PLL 电路的设计实例	248
10.7.6	控制软件及仿真软件	252
第 11 章	频谱搬移电路	254
11.1	频谱搬移原理及分析方法	254

11.2	射频混频器	256
11.2.1	混频器的特性	256
11.2.2	微波混频器的主要指标	257
11.2.3	抑制混频干扰和失真的方法	260
11.2.4	微波混频器的分析设计	261
11.2.5	单端二极管混频器	265
11.2.6	单端 FET 混频器	266
11.2.7	单平衡二极管混频器	267
11.2.8	混频器件	268
11.3	射频倍频器和分频器	269
11.3.1	非线性电抗器件倍频器	269
11.3.2	非线性电阻器件倍频器	275
11.3.3	有源倍频器	276
11.3.4	倍频器件	277
11.4	微波检波器	277
11.4.1	微波检波器特性	278
11.4.2	微波检波器电路	279
第 12 章	微波测量	283
12.1	微波信号源	283
12.1.1	模拟式扫频信号源	285
12.1.2	合成扫频信号源	286
12.2	频谱分析仪原理	287
12.2.1	频谱分析仪概述	287
12.2.2	快速傅里叶变换分析仪	289
12.2.3	相位噪声在射频通信中的影响	290
12.2.4	整机工作原理	294
12.2.5	频谱分析仪的主要技术性能和指标	296
12.3	矢量信号分析方法和仪表	302
12.3.1	矢量信号分析的技术背景	302
12.3.2	矢量调制误差的测量原理	303
12.3.3	观测数字调制信号的几种方法	303
12.3.4	主要技术性能和指标	304
12.4	矢量网络分析仪	305
12.4.1	微波网络的散射参数——S 参数	306
12.4.2	S 参数的概念	306
12.5	矢量网络分析仪基础	308
12.5.1	S 参数的定义	308
12.5.2	矢量网络分析仪的基本原理	309

12.5.3	矢量网络分析仪的基本结构	313
12.5.4	主要技术性能和指标	315
12.6	网络分析仪的典型应用	319
12.6.1	滤波器的测试	319
12.6.2	放大器的测试	320
第 13 章	微波射频集成电路技术	322
13.1	微波毫米波集成电路的发展趋势	322
13.2	国内外研究现状	323
13.3	多芯片组件简介	326
13.3.1	MCM 的分类	327
13.3.2	MCM 的主要特点及应用	327
13.4	低温共烧陶瓷技术	328
13.4.1	LTCC 加工工艺流程	328
13.4.2	LTCC 基板的材料特性	330
13.4.3	LTCC 技术特点	330
13.5	微波集成电路	331
13.5.1	混合微波集成电路	332
13.5.2	单片微波集成电路	339
第 14 章	微波电路的工程设计案例	343
14.1	Ka 波段高性能频率合成器的设计	343
14.1.1	技术指标	343
14.1.2	技术方案	343
14.1.3	10GHz 点频部分设计	345
14.1.4	点频部分锁相环环路参数设计	345
14.1.5	大环环路参数设计	346
14.2	Ka 波段频率合成器 LTCC 技术研究	348
14.2.1	技术指标	348
14.2.2	技术方案	348
14.2.3	系统设计与实现	352
14.2.4	频率合成器布局与布板	353
14.3	宽带射频前端系统仿真研究	356
14.3.1	接收机系统的方案选择	356
14.3.2	中频频率和本振频率的选择	357
14.3.3	大动态范围接收机的实现	358
14.3.4	接收机技术指标的计算与仿真	359
14.3.5	发射机系统的设计与仿真	359
14.3.6	发射机系统的方案设计	360
14.4	宽带一体化接收前端技术的研究	361
14.4.1	技术指标	361

14.4.2	技术方案	362
14.4.3	技术指标的仿真论证	363
14.4.4	系统设计与实现	364
14.5	2GHz~6GHz 通用接收机研究及关键电路的设计与实验	366
14.5.1	接收机系统的主要技术指标	366
14.5.2	系统设计方案	366
14.5.3	2GHz~6GHz AGC 电路设计	367
14.5.4	混频部分电路设计	368
14.6	CDMA 800M 射频收发系统的设计与实现	370
14.6.1	系统设计方案	370
14.6.2	发射机的设计	370
14.6.3	接收机的设计	371
第 15 章	ADS 射频电路设计基础	373
15.1	ADS 概述与基本操作	373
15.1.1	ADS 概述	373
15.1.2	ADS 主要操作窗口	376
15.1.3	ADS 基本操作	382
15.2	ADS 仿真功能概述	391
15.2.1	ADS 的各种仿真功能描述	391
15.2.2	ADS 的仿真控制器	393
15.3	谐波平衡法仿真	395
15.4	增益压缩仿真	397
15.4.1	增益压缩仿真介绍	398
15.4.2	增益压缩仿真相关参数设置	399
15.5	ADS 系统仿真实例	400
15.5.1	收发机系统仿真	400
15.5.2	零中频接收机仿真	401
第 16 章	射频同轴电缆和连接器	409
16.1	射频同轴电缆的构造、类型和特性	409
16.1.1	同轴电缆的特性	409
16.1.2	射频电缆类型	410
16.2	射频同轴连接器的构造、类型和特性	413
16.2.1	连接器的选择	413
16.2.2	射频连接器	415
16.2.3	射频转接头	418
	部分习题答案	425
	参考文献	426

第 1 章 无线通信中射频收发信机结构及应用

1.1 无线收发信机射频前端功能和特性

当电子通信系统的信道介质为大气空间时,即“无线通信”。此时,通信系统主要由发送机和接收机两部分组成。

无线通信收发信机中存在两种变换。在发射端,第一个变换是输入变换器,它把需要传递的信息转换成电信号——基带信号;第二个变换是发射机将基带信号变换成其频带适合在信道中有效传输的信号形式——已调信号,这个过程称为调制。在接收端,第一个变换是接收机从信道中选取接收的已调波并将其变换为基带信号,此变换过程称为解调;第二个变换是输出变换器将解调后的基带信号变换成相应的信息。发送部分的基本框图如图 1-1 所示。

发送过程大致如下。

(1)调制。调制是将基带信号调制到通信载波上。在某些特殊应用领域还有一个对基带信号加密的步骤或其他步骤。

(2)中放变频。在这一步不但要对调制之后的信号进行放大,还要将信号变频到实际通信的频段(频道)。

(3)功放。其主要将发射信号的功率放大到满足通信(距离)的要求。

(4)发射天线。将信号有效地发射出去,除了发送功率(效率)之外,有时还有方向及电波传播方式的选择。

对于发送硬件电路系统而言,最困难的部分就在于中放变频和功放。中放变频的难点主要在于变频系统方案的设计,好的系统方案设计可能产生的相关干扰较少,甚至还可能降低对参与变频的本地振荡信号的要求。而 RF 功放的难点主要在于功率效率和线性度。

接收的过程可以说是发送的逆过程,其框图如图 1-2 所示。

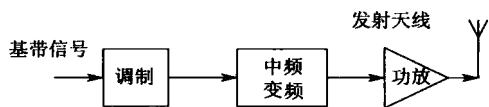


图 1-1 发射机结构框图

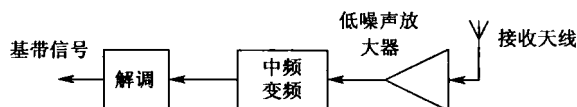


图 1-2 接收机结构

对于接收系统而言,最困难的部分就在于射频前端。因为空间中充满了各种各样的电磁信号,有用信号也在其中,如何既有效地接收到有用信号,同时还需尽可能地将无用信号抑制下去,一直是通信中的一个重要研究课题。

1.2 射频电路在系统中的作用与地位

现代通信系统复杂多样,并正以惊人的速度向前发展,如无绳电话、蜂窝(移动)电

话、家用卫星网络、全球定位系统(GPS)和个人通信服务(PCS)等应用都深入到了千家万户。

但是,通信系统(以及其他的系统和设备)的心脏是集成电路,包括模拟集成电路和数字集成电路,而其中射频电路起着举足轻重的作用。例如,对于接收链路来说,从天线接收下来的射频信号,首先经射频前端和其他模拟电路变换到低频的基带内,然后经模数(A/D)转换器转换成数字信号,这些数字信号再经后面的数字信号处理电路完成解码和其他运算后送给相应的应用设备。对于发射链路来说,相应的应用设备采集到的数据,经数字信号处理电路完成编码和其他运算后,送到数模(D/A)转换器转换成模拟信号,然后再经射频前端和其他模拟电路调制到相应的射频范围内,通过天线发射出去,如图 1-3所示。

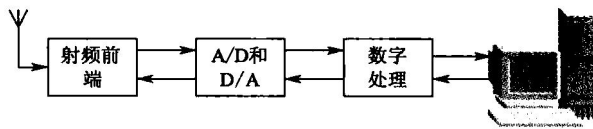


图 1-3 射频通信系统示意图

虽然现在存在着多种无线通信系统,它们在许多方面都不一样,但是所有的无线通信系统都包含一个射频前端模块来调制发送的信号和解调接收的信号。以图 1-4 所示的超外差式通信系统为例,射频前端指从天线到完成第一次频率变换所需要的电路,这些电路对射频信号进行处理。

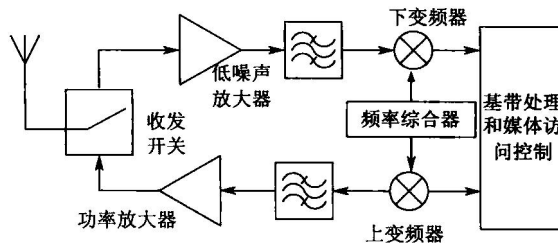


图 1-4 射频前端框图

接收信号时,射频前端通过天线接收空间传播来的电磁波。由于信号一般都比较微弱,需要使用低噪声放大器对它进行放大。同时,由于空间存在着许多其他的电磁波信号,需要使用滤波器将这些无用的信号过滤掉,保留有用的信号。然后在下变频器中经过与本地产生的振荡信号进行混频,来将信号从射频载波变换到中频或者基带。发送信号时,同接收信号相反,需要将中频或者基带信号经上变频器变换到射频载波,经过功率放大器放大到一定的功率,然后经过天线发送出去。频率综合器用来产生频率变换所需要的本地振荡信号。射频前端包括低噪声放大器、下变频器、上变频器、功率放大器和频率综合器 5 个模块和其他必要的偏置电路及控制电路。当然,将所有这些电路集成到一个芯片内,形成单芯片射频通信系统,是当前学术界和产业界研究的热点,而且已经有一些这样的芯片见诸报道,这样的芯片就是典型的数模混合集成电路。

综上所述,射频电路在系统中起着关键作用,现代通信系统的发展是与射频电路的发展分不开的。

1.3 射频电路与微波电路和低频电路的关系

1.3.1 频段划分

从现有的射频、微波应用,可以看出这个飞速发展的领域具有很大的潜力,成为未来许多应用的富有成效的资源。

由麦克斯韦方程可知,当电信号通过一个导体时,会产生电磁波(EM)。当信号频率高于最高的音频频率(为 15kHz~20kHz)时,EM 波就开始从这个导体向外辐射。当频率高于数百兆赫时,这个辐射很强,通常将这个频率或更高的频率称为射频(RF)或微波(MW)。

1. 频谱

要想设计一个电路覆盖全部频带,或者将全部频谱应用于某一种用途,是不切合实际的。所以要把频谱划分成许多频带,每个频带有专门的用途。通常一个电路都是被设计成用于某个特定的频带。

频谱有许多种划分和定义,表 1-1 所列为频谱的一种划分方法。

表 1-1 频谱的划分

频带名称	缩写	频带范围	频带名称	缩写	频带范围
甚低频	VLF	3kHz~30kHz	甚高频	VHF	30MHz~300MHz
低频	LF	30kHz~300kHz	超高频	UHF	0.3GHz~3GHz
中频	MF	0.3MHz~3MHz	特高频	SHF	3GHz~30GHz
高频	HF	3MHz~30MHz	极高频	EHF	30GHz~300GHz

2. 微波和射频的定义

当工作频率提高到接近 1GHz 或者更高,就会出现一些在低频下没有的现象。一般频率范围为 1GHz~300GHz 的电磁波称为微波。在此频段内的信号波长为 1mm(对应于频率 300GHz)~30cm(对应于频率 1GHz)。通常把从 30GHz~300GHz 的频率范围特称为毫米波(因为其波长是在毫米范围)。但是,以上的划分不是很严格,以前人们认为 0.3GHz~1GHz 为射频,但随着近年来科技的迅猛发展,人们则以 0.3GHz 到 4GHz~5GHz(S 频带)为射频频段。而微波则指雷达系统工作的 C 带(4GHz~8GHz)和更高的频带。微波频段由 3 个主要的频带 UHF、SHF 和 EHF 组成。它可以再细分为一些专门的频段,各自有本身的定义,这就使微波的使用更加方便。

电气和电子工程师协会(IEEE)提出了在电子学工业方面最常用的微波频带,如表 1-2 所列。表中 Ka 带到 G 带是毫米波段(MMW)。

表 1-2 IEEE 和工业用微波波段的定义

频带名称	频率范围/GHz	频带名称	频率范围/GHz
L 带	1.0~2.0	S 带	2.0~4.0
C 带	4.0~8.0	X 带	8.0~12.0
Ku 带	12.0~18.0	K 带	18.0~26.5
Ka 带(毫米波)	26.5~40.0	Q 带(毫米波)	33.0~50.0
U 带(毫米波)	40.0~60.0	V 带(毫米波)	50.0~75.0
E 带(毫米波)	60.0~90.0	W 带(毫米波)	75.0~110.0
F 带(毫米波)	90.0~140.0	D 带(毫米波)	110.0~170.0
G 带(毫米波)	140.0~220.0		

1.3.2 电路的设计考虑

由于不同频率下电磁波性质不同,所以在电路设计时要有不同的考虑。一般分为两个主要的类别:低射频电路和高射频与微波电路。

1. 低射频电路

在低射频电路中,可以忽略其电波的传播效应。设计过程考虑以下 3 个特点。

(1)电路的长度远小于波长,即 $l \ll \lambda$ 。

(2)传播延时 t_d 趋近于零,即 $t_d \approx 0$ 。

(3)麦克斯韦方程简化为低频下的定律,如基尔霍夫电压和电流定律(KVL 和 KCL)与欧姆定律。

因此,在射频频率,当 $l \ll \lambda$ 时,传播延时 t_d 近似为零,并且所有电路中的元件可以认为是集总的。设计过程包含 3 个步骤:选择合适的器件,进行直流设计以确定合适的静态工作点;基于这个直流工作点,通过测量或计算得到交流小信号参数;设计匹配电路使器件与外界(即信号源和负载)连接。在这个过程中需考虑稳定性、增益和噪声等。

2. 高射频和微波电路

对于高射频和微波电路,其中可以有一个或几个集总元件,但至少要有有一个分布式元件。分布式元件就是该元件的特性是分布在电路的很大长度或面积上,而不是集中在一个部位或元件中。比如,分布式电感是其电感量分布在导体的整个长度上,而普通电感的电感值是集中在线圈中;分布式电容是其电容量分布在一段导线上,而非集中在一个电容器中(如线圈的匝间或电路相邻导体之间的电容等)。

对于分布电路,具有下述 3 个特点。

(1)须采用麦克斯韦方程提出的波传播概念。

(2)电路要有大的电长度,即其物理长度与电路中信号传播的波长可比拟。

(3)信号传播延时 t_d 不可忽略。

高射频和微波电路的设计过程如下。

(1)开始时进行直流电路设计,以建立稳定的工作点。

(2)表征器件在工作点附近的特性,即利用电磁波测量器件各端口的反射和传输