

21世纪

高等学校电子信息类规划教材



微波电子线路

编著 雷振亚 李磊 谢拥军 郑会利 全利安
主审 王家礼



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

微波电子线路

雷振亚 李磊 谢拥军 郑会利 金利安 编著
王家礼 主审

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书介绍了微波电子系统的构成,各种微波半导体器件的原理以及各类微波电路的原理和设计。主要内容包括微波混频器、微波频率变换器、微波放大器、微波振荡器、微波控制电路、微波电真空器件以及微波集成电路的基本功能、理论基础、基本电路结构和基本分析设计方法。附录中给出了微波电路的噪声理论、常用微波无源元件简介、微波电路及其 PCB 设计和世界知名微波电路厂家网站,便于读者在学习中参考。全书内容是微波发射机和接收机前端的核心部分。

本书可作为电子信息工程、通信工程、测控与仪器等微波工程的相关专业教材,也可作为雷达、通信、测控、航空、航天等方面科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微波电子线路/雷振亚等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2009.3

21世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-2175-3

I. 微… II. 雷… III. 微波电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 197305 号

策 划 戚文艳

责任编辑 张 玮 戚文艳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子信箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22

字 数 523 千字

印 数 1~4000 册

定 价 32.00 元

ISBN 978-7-5606-2175-3/TN·0478

XDUP 2467001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书是高等学校电子通信类专业的专业课教材之一，是国家电工电子教学基地规划教材，得到了西安电子科技大学教材建设委员会教材建设基金的支持。

教材建设委员会按照“基础厚、口径宽、能力强、素质高、复合型”的人才培养模式立项编写系列教材，要求教材编写小组研究本学科国际国内教材建设现状、特点和趋势，分析自身的优势和薄弱环节，结合专业的实际情况，从建设国内一流、国际知名高水平大学的角度出发，体现时代精神，具备较高的、扎实的学科理论基础、科研水平和丰富的教学经验，制订教材建设规划安排。

依据上述原则，“微波电子线路”课程组对现行教材内容进行了调整和补充，主要体现在以下四个方面：

(1) 保留现行教材的基本内容，这是我校五十多年“微波电子线路”(微波器件与电路、雷达发射设备和雷达接收设备)教学经验的积累。

(2) 结合国内外相关教材，补充完善各部分内容。

(3) 融入微电子技术和微波技术的最新进展，与现代工程技术接轨，扩充知识面。

(4) 鉴于微波电路设计的商业软件已经普及，在教材安排和教学实施中，尽可能多地扩充知识点，介绍各类微波电路的多种拓扑结构，简化推导计算，注重对设计和仿真软件的学习应用。

本书共 9 章，参考教学课时为 45~60 学时。第 1 章是绪论，介绍微波电子线路的特点以及通信系统和雷达系统的基本构成，使学生对无线电发射机和接收机系统有个概念性的理解。第 2 章是微波半导体基础，介绍各种微波半导体器件的原理和结构，为后面的电路设计打下良好的基础。第 3~7 章分别是微波混频器、微波变频器、微波放大器、微波振荡器和微波控制电路的原理和设计。第 8 章是微波电真空器件。第 9 章是微波集成电路简介。附录给出噪声理论、常用微波无源元件简介、微波电路及其 PCB 设计和世界知名微波电路厂家网站，方便读者在学习时查阅。

本书由雷振亚负责内容安排和稿件整理，教材的成稿凝聚着课程组全体同志的共同努力。编者感谢宁高利、雷斐然、赵毅、朱会柱等同学所做的大量具体工作。感谢西安电子科技大学教材建设委员会、电子工程学院、国家电工电子教学基地、天线与微波国家重点实验室及出版社等单位的有关领导和老师的热情鼓励、耐心帮助和大力支持。特别感谢本书所使用参考文献的作者，他们辛勤的劳动是本书能够完成的坚实基础。我们不会忘记吴万春、李天成、章荣庆、董宏发、杨德顺等多位教授，他们的着意耕耘为“微波电子线路”课程积攒了宝贵财富。

衷心感谢王家礼教授对书稿的仔细审阅，本书的许多地方融入了他的体会和经验。

由于本书编写时间仓促，加之编者水平有限，不妥之处在所难免，诚望国内同行和教材使用者提出修改建议，以便后续版本改进，编者诚致谢意。

编 者

2009 年 2 月

课程网站：<http://sec.xidian.edu.cn/faculty/zhylei/mwc/>

联系邮箱：lzyxd2@yahoo.com.cn

目 录

第 1 章 绪论	1	2.6.1 微波器件的分类选择	92
1.1 微波电子线路的特点	1	2.6.2 世界知名厂家微波器件简介	92
1.2 移动通信系统	3	习题	94
1.2.1 移动通信体制	3	第 3 章 微波混频器	95
1.2.2 分址方式	5	3.1 微波混频器的工作原理	95
1.2.3 蜂窝通信	7	3.1.1 本振激励特性——混频器的 大信号参量	96
1.2.4 WCDMA 射频前端	7	3.1.2 非线性电阻的混频原理	97
1.3 多普勒测速雷达	8	3.1.3 混频器等效网络	99
第 2 章 微波半导体基础	11	3.2 微波混频器的小信号传输特性 ——变频损耗	101
2.1 微波半导体材料	11	3.2.1 净变频损耗	101
2.2 微波器件的分类	12	3.2.2 混频管寄生参量引起的结损耗	105
2.3 微波半导体原理	13	3.2.3 输入、输出端的失配损耗	106
2.3.1 微波半导体的能带模型	13	3.3 混频器的噪声系数及其他电气指标	106
2.3.2 半导体的本征激发	14	3.3.1 镜像短路或开路(单通道)混频 器的噪声系数	107
2.3.3 掺杂	15	3.3.2 镜像匹配(双通道)混频器的 噪声系数	108
2.3.4 载流子的运动	16	3.3.3 混频器—中放组件的噪声 系数	109
2.3.5 PN 结	18	3.3.4 混频器的其他电气指标	109
2.3.6 金属与半导体的肖特基接触	25	3.4 微波混频器电路	111
2.3.7 金属与半导体的欧姆接触	28	3.4.1 单端混频器	112
2.3.8 N 型砷化镓(GaAs)半导体	29	3.4.2 平衡混频器	114
2.3.9 异质结	32	3.4.3 微波双平衡混频器	120
2.4 微波二极管	33	3.4.4 镜像回收混频器	123
2.4.1 肖特基势垒二极管	33	3.4.5 毫米波混频器	126
2.4.2 变容二极管	39	3.5 微波 MESFET 混频器	128
2.4.3 阶跃恢复二极管	43	3.5.1 栅极混频器	128
2.4.4 PIN 二极管	46	3.5.2 漏极混频器	129
2.4.5 雪崩二极管	50	3.5.3 源极混频器	129
2.4.6 体效应二极管	54	3.5.4 双栅场效应管混频器	130
2.5 微波三极管	57	3.6 微波混频器新技术	131
2.5.1 双极型晶体管	57	3.6.1 单边带(SSB)调制器	131
2.5.2 异质结双极型晶体管	70	3.6.2 谐波混频器	131
2.5.3 场效应管	72		
2.5.4 SiGe HBT 与 SiGe MOSFET 简介	91		
2.6 世界知名微波半导体产品	92		

3.6.3 使用 CAD 工具设计混频器	132	5.5 小信号微波晶体管放大器的设计	193
习题	136	5.5.1 微波晶体管放大器基本结构	193
第 4 章 微波上变频器与倍频器	139	5.5.2 设计指标和设计步骤	196
4.1 非线性电容中的能量关系及其应用	140	5.5.3 高增益放大器的设计	198
4.1.1 非线性电容的变频效应	140	5.5.4 低噪声放大器的设计	200
4.1.2 非线性电容中的能量关系	140	5.5.5 等增益圆设计简介	200
4.1.3 门雷 - 罗威关系式的应用	142	5.5.6 微波小信号放大器设计实例	202
4.2 变容管上变频器	144	5.6 宽带放大器	209
4.2.1 电荷分析法	144	5.6.1 平衡放大器	209
4.2.2 等效电路分析法	146	5.6.2 补偿匹配放大器	211
4.2.3 功率上变频器电路及其设计	147	5.6.3 分布式放大器	213
4.3 微波晶体管上变频器电路	151	5.7 微波晶体管功率放大器	214
4.4 变容管倍频器	153	5.7.1 微波晶体管功率放大器的 指标体系	215
4.4.1 变容管倍频器的分析	153	5.7.2 微波晶体管功率放大器的结构	217
4.4.2 变容管倍频器的设计	155	5.7.3 功率合成的基本概念	218
4.4.3 变容管倍频器电路	159	习题	219
4.5 阶跃恢复二极管倍频器	159	第 6 章 微波振荡器	221
4.5.1 阶跃管倍频器电路原理及分析	159	6.1 微波二极管负阻振荡器电路	221
4.5.2 阶跃管倍频器的设计步骤	166	6.1.1 负阻振荡器的振荡条件	222
4.5.3 阶跃管倍频器电路实例	168	6.1.2 负阻振荡器电路	222
4.6 场效应管倍频器	169	6.1.3 固态微波功率合成技术	227
4.6.1 场效应管倍频器的原理	169	6.2 微波晶体管振荡器	230
4.6.2 场效应管倍频器电路	171	6.2.1 微波晶体管振荡器的起振分析	230
4.7 微波分频器	172	6.2.2 微波晶体管介质谐振器振荡器	232
4.7.1 变容管参量分频器	172	6.3 微波频率合成器	235
4.7.2 反馈混频器再生式分频器	173	6.3.1 频率合成器的重要指标	235
4.7.3 注入锁相振荡器分频器	175	6.3.2 频率合成器的基本原理	236
习题	176	习题	240
第 5 章 微波晶体管放大器	178	第 7 章 PIN 管微波控制电路	241
5.1 微波晶体管的 S 参数	179	7.1 PIN 管微波开关	241
5.2 微波晶体管放大器的功率增益	180	7.1.1 单刀单掷开关	241
5.2.1 晶体管端接任意负载时的输入、 输出阻抗	180	7.1.2 单刀多掷开关	244
5.2.2 微波晶体管放大器的输入、 输出功率	181	7.1.3 开关时间和功率容量	246
5.2.3 三种功率增益	182	7.2 PIN 管电调衰减器和限幅器	248
5.3 微波晶体管放大器的稳定性	184	7.2.1 环行器单管电调衰减器	248
5.3.1 稳定性判别圆	184	7.2.2 3 dB 定向耦合器型电调衰 减器	248
5.3.2 绝对稳定的充要条件	186	7.2.3 吸收型阵列式衰减器	249
5.4 微波晶体管放大器的噪声系数	189	7.2.4 PIN 管限幅器	250
5.4.1 有源两端口网络噪声系数的 一般表达式	190	7.3 PIN 管数字移相器(调相器)	251
5.4.2 等噪声系数圆	192	7.3.1 开关线型移相器	251
		7.3.2 加载线型移相器	252

7.3.3 定向耦合器型移相器	254	习题	291
7.3.4 四位数字移相器	255	第9章 单片微波集成电路简介	294
习题	255	9.1 单片微波集成电路的材料与元件	295
第8章 微波电真空器件	258	9.1.1 单片微波集成电路的基片材料	295
8.1 微波电子管基础	258	9.1.2 单片微波集成电路的无源元件	295
8.1.1 静态控制真空管的工作原理	259	9.1.3 单片微波集成电路的有源器件	297
8.1.2 二极管中的感应电流	260	9.2 MMIC 电路的设计特点	297
8.1.3 电子流与电场的能量交换 原理	261	9.3 微波集成电路加工工艺简介	299
8.2 速调管放大器	263	9.3.1 微波集成电路工艺流程简介	299
8.2.1 双腔速调管放大器	263	9.3.2 单片微波集成电路工艺 流程简介	300
8.2.2 多腔速调管放大器	268	9.3.3 微波集成电路新技术简介	304
8.2.3 速调管放大器的工作特性	270	9.4 微波及毫米波集成电路应用实例	305
8.3 行波管放大器	272	9.4.1 微波及毫米波集成电路在雷达 领域的应用	305
8.3.1 行波管放大器的结构	272	9.4.2 微波及毫米波集成电路在电子 对抗领域的应用	306
8.3.2 行波管放大器的工作原理	273	9.4.3 微波及毫米波集成电路在通信 领域的应用	307
8.3.3 行波管放大器的主要特性	274	附录1 噪声理论	309
8.4 多腔磁控管振荡器	277	附录2 常用微波无源元件简介	325
8.4.1 多腔磁控管的结构	277	附录3 微波电路及其 PCB 设计	329
8.4.2 电子在直流电磁场中的运动	278	附录4 世界知名微波电路厂家网站	340
8.4.3 多腔磁控管振荡器的谐振 频率和振荡模式	282	参考文献	344
8.4.4 多腔磁控管振荡器的工作原理	283		
8.4.5 磁控管的工作特性和负载特性	287		
8.4.6 磁控管的调谐	291		

第1章 绪论

—— 本章内容 ——

微波电子线路的特点

移动通信系统

多普勒测速雷达系统

微波电子系统是由许多功能不同的微波元件、器件等所组成的一个有机整体,一般可分为微波发射机和微波接收机。雷达、通信、对抗、遥感等现代电子设备都离不开微波电子系统。微波电子线路研究的对象就是微波电子系统中各种功能模块的原理及其设计,包括微波信号的产生(振荡器)、放大(低噪声放大 LNA 和功率放大 PA)、变频(混频、上变频和倍频)和控制电路等。随着科学技术的不断进步,微波电子系统正向着小体积、多功能、低价格、大众化的方向快速发展。

1.1 微波电子线路的特点

微波电子线路是微波无源元件和微波有源器件的有机结合。微波无源元件包括阻抗变换器、滤波器、隔离器、定向耦合器、环形桥、功率分配器、衰减器、移相器、谐振腔和负载等,在前修课程内我们已经学习了这些元件的原理和设计。微波有源器件主要包括各类微波半导体器件和微波电真空器件,这些器件往往需要直流偏置。本课程的主要目标就是掌握有源器件的外特性及其功能,合理设计微波无源元件,从而充分发挥有源器件的电气功能。

微波技术的核心任务是构成发射机和接收机,实现功率的传输或信息的交换。电磁场理论是微波技术的基础和解决问题的基本方法之一,但这并不是说所有的微波问题都要建立严格的电磁场方程。事实上,工程中能够精确求解或能进行数值计算的问题是极为有限的。在微波网络中,我们已经学到利用网络思想解决无源元件问题。对于有源电路,微波网络概念依然是行之有效的方法。此外,还要用到半导体知识、信号分析,这些都是模拟电路或高频电路的知识向微波领域的扩展,只是由于频率的提高,相应的半导体器件的结构和原理有很大不同而已。清楚了这些,微波电子线路的学习就比较容易了。

微波电子线路涉及到的半导体器件有二极管(包括肖特基势垒二极管、变容二极管、阶跃恢复二极管(SRD)、雪崩渡越时间二极管(IMPATT)、体效应二极管(TED)、PIN 二极管等)、三极管(包括双极结管(BJT)、场效应管(FET)、异质结管(HBT)、高电子迁移

率器件 (HEMT) 等)、多功能器件 (包括单片微波集成电路 (MMIC)、数字射频器件 (RFCMOS) 等)。各类器件都是当今先进的科学技术在各个领域进展的集中表现。材料科学和工艺科学、微电子技术的不断进步,使得微波半导体器件的集成化程度越来越高。在射频与微波频段,热门的器件有三种:双极结 (Si 或 SiGe)、场效应 (GaAs) 和 CMOS 器件,就成本、性能、功率等方面考虑,各有特长,它们共同构成了千变万化的微波电子系统。其中让人们感受最深的是手机的外型轻巧和功能强大, RFCMOS 技术使得射频 T/R 电路和信号处理电路合为一体,无论是可靠性还是节电效果都大为改观;而基站的功放要用 GaAsFET 或 LDMOS 器件。可以想象,微波半导体还将继续不断进步,而不会停滞在一个水平上,这必将是微波技术工作者和微电子工作者共同努力的发展过程。

微波电子线路的基本功能模块包括微波振荡器 (包括点频振荡器、频率合成器等)、微波放大器 (包括用于接收机高放的低噪声放大器,用于发射机的功率放大器,用于对抗的宽频带放大器等)、微波频率变换电路 (包括用于接收机的混频器、检波器,用于发射机的上变频器、倍频器)、微波信号控制电路 (包括微波开关、电调衰减器、微波限幅器、微波移相器等)。这些电路模块可以单独使用,也可以集成为专门用途的微波组件。有了这些电路模块,就可以构成各类微波电子系统。

现已有许多商业软件应用于微波电子线路设计。成熟的计算公式、世界著名公司器件的参数模型、世界著名品牌的微带介质基板参数都作为软件的组成部分,方便实用,效率高。ANSOFT 公司的 DESIGNER 和 SERENADE、Agilent 公司的 ADS、AWR 公司的 MICROWAVE OFFICE、EAGLEWARE 公司的 GENESYS 等软件是世界公认的优秀微波电路设计软件。MATLAB 和 MATHCAD 等数学计算工具也可用作微波电子线路的设计工具,并有相关配套软件包供选购使用。

可以看出,微波电子线路就是接收机和发射机组成部件,是决定各类无线电系统性能的关键。软件更新和器件换代要求我们必须不断学习,才能跟随时代的脚步。建议大家经常阅读以下英文杂志,了解微波电路的最新动向:《Microwave Journal》、《Microwave & RF》、《Microwave Product Digest (MPD)》、《Applied Microwave & Wireless》。这些杂志都可以在网上免费订阅电子版,十分方便。

下面给出常见的微波系统:

(1) 无线通信系统:空间通信,远距离通信,无线对讲,蜂窝移动,个人通信系统,无线局域网,卫星通信,航空通信,航海通信,机车通信,业余无线电等。

(2) 雷达系统:航空雷达,航海雷达,飞行器雷达,防撞雷达,气象雷达,成像雷达,警戒雷达,武器制导雷达,防盗雷达,警用雷达,高度表,距离表等。

(3) 导航系统:微波着陆系统 (MLS), GPS, 无线信标,防撞系统,航空、航海自动驾驶等。

(4) 遥感:地球监测,污染监测,森林、农田、鱼汛监测,矿藏、沙漠、海洋、水资源监测,风、雪、冰监测,城市发展和规划等。

(5) 射频识别:保安,防盗,入口控制,产品检查,身份识别,自动验票等。

(6) 广电系统:调幅 (AM)、调频 (FM) 广播,电视 (TV) 等。

(7) 汽车和高速公路:自动避让,路面告警,障碍监测,路车通信,交通管理,速度测量,智能高速路等。

(8) 传感器: 潮湿度传感器, 温度传感器, 长度传感器, 探地传感器, 机器人传感器等。

(9) 电子战系统: 间谍卫星, 辐射信号监测, 行军与狙击等。

(10) 医学应用: 磁共振成像, 微波成像, 微波理疗, 加热催化, 病房监管等。

(11) 空间研究: 射电望远镜, 外层空间探测等。

(12) 无线输电: 空对空、地对空、空对地、地对地输送电能等。

微波电子线路的这些应用各有侧重, 又有共性。下面以移动通信和多普勒测速雷达为例介绍其工作体制。

1.2 移动通信系统

1.2.1 移动通信体制

国际相关组织对移动通信体制有明确的规定, 见表 1-1。各国根据自己的实际情况可选择恰当的移动通信体制。我国两大运营商中国移动和中国联通使用的系统为 GSM 和 CDMA。第三代移动通信(3G)采用改进后的 CDMA。我国各大城市流行的小灵通是 PHS 体制, 而大灵通是 CDMA 体制。3G 牌照的呼之欲出将带动一场产业热潮。

表 1-1 移动通信体制

系统	IS - 95	IS - 54	GSM	DCS - 1800	DECT	CDMA	WCDMA (CDMA2000)
频带 下行 /MHz 上行	869~894 824~849	869~894 824~849	935~960 890~915	1710~1785 1805~1880	1800~1900	1885~2025 2110~2200	1885~2025 2110~2200
多址	CDMA - SS /FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA	CDMA/ FDMA	CDMA/ FDMA
复用	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD		
信道带宽 /kHz	1250	30	200	200	1728	1250	4400~5000
调制	BPSK/ OQPSK	Pi/4 - DQPSK	GMSK	GMSK	GMSK		BPSK/ QPSK
发射功率 /W	0.2~2	0.6~3	2~20	0.2~2	0.25	0.25	0.25
功能	数字 蜂窝	数字 蜂窝	数字 全球	无绳	无绳	数字	数字
使用者	美国	北美	欧洲 中国	个人	欧洲	中国 美国 日本 韩国	中国 欧洲 日本 韩国

移动通信技术从诞生到现在已经有 100 多年的历史了。1897 年,马可尼在赫兹试验的基础上完成了一个固定站与一艘拖船之间的无线通信试验,证明了在移动体之间以无线方式进行通信的可行性。此后相当长的一段时间内,只在短波的几个频段上开发出了专用移动通信系统,并且通常只用于军队和政府部门。第二次世界大战期间,军事上的需求促进了无线电通信技术及其制造业的长足发展,同时也出现了许多新的理论和技术。二战结束后,移动通信技术从军用转向民用,移动通信网从专用网向公用网过渡。20 世纪 60 年代中期,美国和德国推出了采用大区制的移动通信网,实现了无线频道的自动选择并能够自动接续到公用电话网。大区制系统由于频率资源的原因,容量非常有限。为此,美国贝尔实验室及其他一些公司提出了蜂窝系统的概念和理论,蜂窝网(即所谓的小区制),由于实现了频率资源的复用,因此可以大大提高系统的容量。直到 20 世纪 70 年代中期,随着半导体技术的成熟、大规模集成电路器件和微电子技术的发展以及表面贴装工艺的广泛应用,移动通信系统的设备小型化问题逐步得以解决,这为蜂窝移动通信的实现提供了技术基础。贝尔实验室于 1978 年底推出 AMPS(先进移动电话业务),这是第一个真正意义上的具有随时随地通信功能的大容量蜂窝移动通信系统,移动通信技术由此进入蓬勃发展的时期。

1983 年,AMPS 系统首次在芝加哥投入商用。英国于 1985 年开发出 TACS(全地址通信系统),并首先在伦敦投入使用。我国采用 TACS 标准的公用移动通信网于 1987 年建成并开通。AMPS 和 TACS 等蜂窝移动通信系统通过频率复用显著增大了系统容量,网络的智能化实现了越区切换和漫游功能,扩大了用户的服务范围。由于采用的是模拟调制技术,这类蜂窝移动通信系统存在以下缺点:各系统间没有公共接口,手机不可能在国外使用;难以开展数据承载业务;安全保密性差,易被窃听和做“假机”;频谱利用率低,无法适应大容量的需求。随着超大规模集成电路和低速语音编码技术的出现,数字通信技术表现出比模拟技术更突出的优越性,在移动通信领域出现了数字技术取代模拟技术的趋势。20 世纪 80 年代出现了两种重要的数字移动通信体制:一种是以欧洲的 GSM(全球移动通信系统)为代表的 TDMA(时分多址)体制,另一种是以美国的 IS-95 系统为代表的 CDMA(码分多址)体制。1991 年,欧洲第一个 GSM 系统开通,1993 年,我国第一个 GSM 系统开通。1995 年,中国香港和美国的 CDMA 公用网开始投入商用,1998 年,我国 CDMA 实验网开通。以 GSM 系统和 CDMA 系统为代表的第二代移动通信系统经过 10 年多的发展,呈现出用户数量急剧增加的局面。与此同时,信息技术的飞速发展对移动通信提出了更多的新业务需求,如图像、语音与数据业务相结合的多媒体业务和高速数据业务需求,而第二代移动通信系统因只能提供语音业务和低速数据业务,因此新一代移动通信系统的研究和发展就成为移动通信领域的热点。

3G(第三代移动通信系统)最初的研究工作始于 1985 年,当时 ITU-R 成立临时工作组,提出了未来公共陆地移动通信系统(FPLMTS),实现了全球无缝漫游,并提供了多种业务。1996 年,FPLMTS 正式更名为 IMT-2000。IMT-2000 支持的网络称为第三代移动通信系统,它可以支持高达 2 Mb/s 的传输速率,并可提供多媒体业务和高速数据业务。第三代移动通信系统的标准化工作已经基本完成,形成了 WCDMA、CDMA2000 和

TD-SCDMA三大主流标准。其中欧洲的 WCDMA 和美国的 CDMA2000 分别是在 GSM 和 IS-95CDMA 的基础上发展起来的,采用的是 FDD(频分双工)模式,TD-SCDMA 是由大唐电信代表中国提出的,采用了 TDD(时分双工)模式。

3G 发展至今经历了较快的演变过程。以 WCDMA 为例,已经有 R99、R4 和 R5 等几个主要版本。其中,R99 版本的无线接入部分采用 CDMA 技术,核心网在 GSM 电路域的基础上增加了分组域。从 R99 演进到 R4 版本的网络时,3G 无线网络变化不大,主要是核心网发生了实体的改变,主要体现是引入了软交换的结构,即将原 R99 核心网络中 MSC 的功能分为两个设备来实现:MSC Server(主要包括 MSC 的呼叫控制和移动控制部分,负责处理信令)和 MGW(媒体网关),进而实现控制与承载的分离。在 R5 版本的网络中,无线网络侧引入了高速下行分组接入 HSDPA 技术,核心网在电路域和分组域的基础上增加了 IP 多媒体子系统。

3G 网络采用了码分多址技术,具有频谱利用率高、抗干扰能力强和保密性好的特点。与 GSM 网络相比,两者有以下主要不同之处:

(1) 影响网络覆盖的因素不同。GSM 网络中能够建立和保持呼叫的用户数取决于是否有空闲的时隙,网络覆盖则取决于基站的高度和发射功率等因素,容量和覆盖之间没有必然的关系。而 3G 网络的覆盖、容量和质量之间的关系是相互均衡的,3G 网络的覆盖与干扰程度、系统负荷、应用业务密切相关。

(2) 网络中存在的无线干扰不同。在 GSM 网络中,需要考虑的是同频和邻频干扰。因此,频率规划是影响网络质量的重要因素。在 3G 网络中,采用码分多址,每个小区占用分配的整个频段,主要干扰是由相邻小区造成的,减少干扰就等于增加了容量和覆盖。因此,在 3G 网络中,需要通过高频次的功率控制来减少基站和终端不必要的功率发射来减少干扰。

(3) 提供的服务不同。3G 网络采用了可变语音编码速率和软切换等技术,可以提供比 GSM 网络更优质的语音服务。GSM 网络只能提供低速率的数据应用,3G 网络可提供高达 384 kb/s 的数据速率。带宽的增加不仅对第二代移动网络原有的业务有促进作用,而且产生了丰富多彩的新业务。流媒体业务和视频电话业务是 3G 网络除语音业务外最重要的基本业务,根据市场需要还可以推出位置业务等多种增值业务。

目前,我国各大电信运营商和设备制造商都在密切关注 3G 技术的发展,相信在不久的将来,3G 移动网络一定会给我们带来更加丰富多彩的信息服务。

1.2.2 分址方式

1. 频分多址

频分多址(FDMA)是指在模拟移动通信系统中,把系统频带分成很多频率信道,使得不同的用户同时进入一组不同的频率。一般地,两个相邻信道中心频率间隔为 25 kHz,如图 1-1 所示。要提高通话容量,就要减小信道间隔或增加整机带宽。

FDMA 的优点:多用户同时进入给定频带;通过减小信道间隔可以提高通话容量。

FDMA 的缺点:信道间隔的减小导致通话质量的下降;要求每个信道频率准确度高;要求信道滤波器阻带特性好;每个信道有一套发射机/接收机。

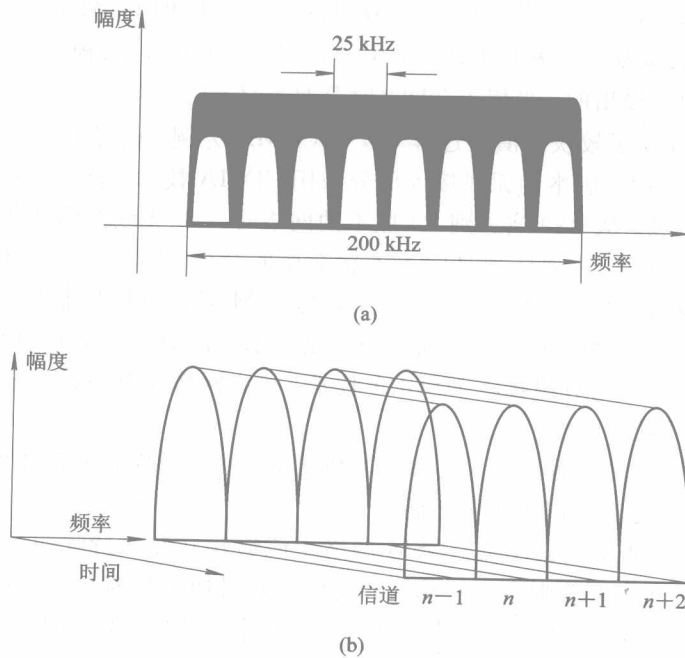


图 1-1 FDMA 示意图
(a) 信道间隔; (b) 时频关系

2. 时分多址

在时分多址(TDMA)系统中,所有用户使用同一个信道,这个信道足够宽,每个用户可以在非常短的时间间隙内使用整个信道,就通话速度而言,所有用户几乎是同时工作的,如图 1-2 所示。

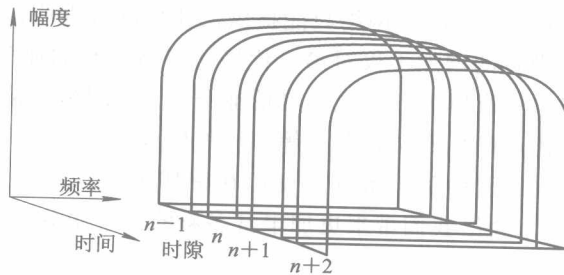


图 1-2 TDMA 示意图

TDMA 的优点:大量用户同时使用一个特定频带;依据时间间隙的数量,一套发射机/接收机同时为多用户服务;发射机/接收机间歇工作节省电能;减小对滤波器的要求。

TDMA 的缺点:要求各用户的时间同步;要求处理器的能力强;要求采用宽带调制。

3. 码分多址

在码分多址(CDMA)系统中,所有用户都可以在任何时候使用整个频带,依靠每个用户的特定编码来区分用户,如图 1-3 所示。

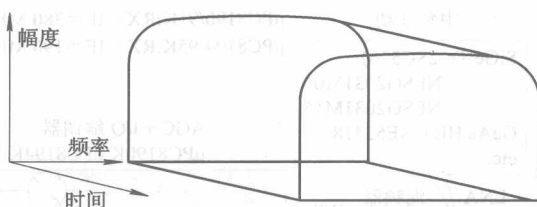


图 1-3 CDMA 示意图

CDMA 的优点：大量用户同时使用一个特定的信道；一个接收机能同时接收多个信号；对滤波器的要求不高；减少了系统的成本；可以为更多的用户提供服务。

CDMA 的缺点：要求各用户的时间同步；须在宽动态范围内快速控制发射机功率。

1.2.3 蜂窝通信

如图 1-4 所示，GSM 地面基站的设置就像蜂窝一样，每个蜂窝内设置一个基站。由于基站设置布满整个区域，因此不需要太大的功率就能覆盖系统范围，开阔区域每个基站的传输距离为 35 km。实际中每个基站的覆盖范围不一定是正六边形，图 1-4 中字母相同的基站工作频率也相同。

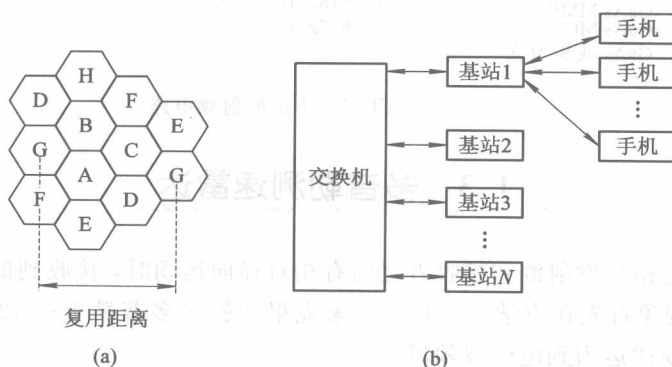


图 1-4 蜂窝移动通信系统
(a) 蜂窝示意；(b) 系统构成

1.2.4 WCDMA 射频前端

CDMA 体制是移动通信的发展方向。图 1-5 给出某款 WCDMA 手机射频电路的结构框图和可选用的微波电子器件。由图可以看出：整机的振荡信号由频率合成器产生，包括发射机/接收机本振和调制/解调本振；发射上变频和接收下变频；发射功率放大器用 MMIC 作驱动放大，用多芯片模块 (MCM) 作输出功放；接收机低噪声放大器和接收混频器都是 MMIC；收发开关是 MMIC 单刀双掷开关；发射调制器和接收解调器均采用硅集成专用芯片。

随着微电子技术的进步，射频和微波电路的集成化程度会越来越高，但发射机和接收机的原理和结构基本不会改变。

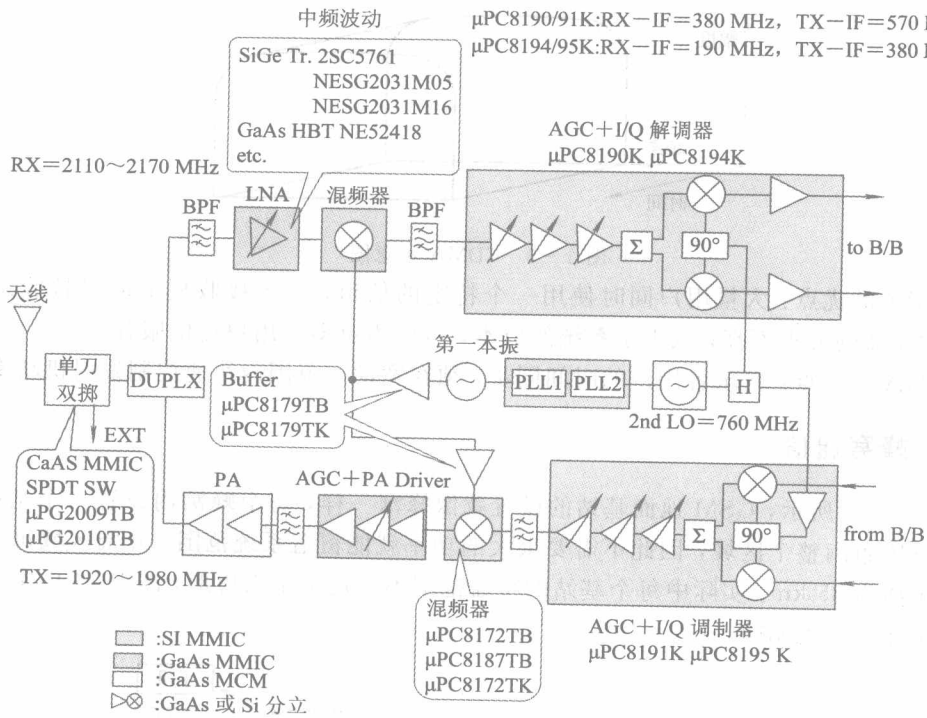


图 1-5 WCDMA 手机的射频电路

1.3 多普勒测速雷达

多普勒效应是指当发射源和接收者之间有相对径向运动时，接收到的信号频率将发生变化。这一物理现象首先在声学上由物理学家克里斯顿·多普勒于 1842 年发现。1930 年左右开始将这一规律运用到电磁波领域。

在多普勒测速雷达中，如果目标向着雷达运动，反射波的频率会增加；如果目标远离雷达运动，反射波的频率会降低。反射波频率的变化就是多普勒频率，这个频率含有目标运动速度的信息，如图 1-6 所示。

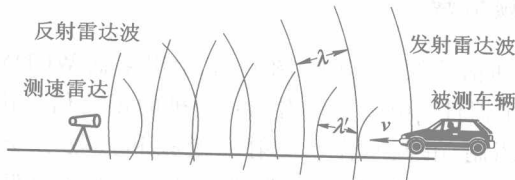


图 1-6 多普勒测速示意图

多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \tag{1-1}$$

式中： v 为运动目标的速度； c 为光速； f_0 为发射波频率。

因此,目标运动速度为

$$v = \frac{f_d c}{2f_0} \quad (1-2)$$

可见,只要测出多普勒频率就可以得出运动目标的速度。通常,测速雷达发射源为连续波工作。按照国际惯例,测速雷达的工作频率为 10.5 GHz、24.15 GHz、35.5 GHz 或 76.5 GHz。

实际中,雷达与目标之间往往有一个夹角 θ ,如图 1-7 所示。故多普勒频率也可写为

$$f_d = 2v \frac{f_0}{c} \cos\theta \quad (1-3)$$

如果目标与测速雷达垂直,则没有多普勒频率;如果目标与雷达是径向的,或者夹角 θ 很小(小于 10°),则多普勒频率为式(1-1)所示。

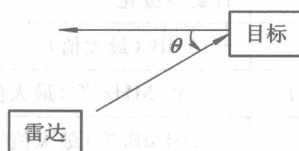


图 1-7 雷达与目标之间的夹角

图 1-8 是多普勒测速雷达的结构框图。微波源是体效应二极管(GUNN)点频振荡器(耿氏振荡器),经过极化分离器到达喇叭发射出去,回波信号经过极化分离器到达混频器,中频信号就是多普勒频率,经过放大后送入数字信号处理器(DSP),最后由显示器指示目标速度。

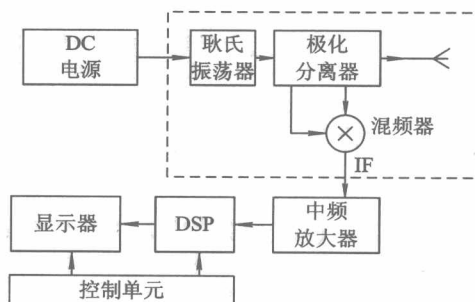


图 1-8 测速雷达结构框图

由式(1-1)可知,多普勒频率与微波发射源的频率有关。表 1-2 给出了两个发射频率下不同速度的多普勒频率。发射频率越高,多普勒频率越大。因此,目前流行的测速雷达的工作频段是 Ku 波段和毫米波段。

表 1-2 发射频率与多普勒频率的关系

发射频率/GHz	24.15			76.50		
目标速度/(km/h)	10	80	200	10	80	200
多普勒频率/Hz	224	1790	4475	709	5670	14 176

表 1-3 给出三种商品化多普勒测速雷达的主要电气指标,以供参考。

表 1-3 多普勒测速雷达的主要电气指标

微波频率	24 150 GHz	35 500 GHz	76 500 GHz
发射机输出功率	+10 dBm(典型值)	+10 dBm(典型值)	+10 dBm(典型值)
变频损耗	6 dB(典型值)	6 dB(典型值)	9 dB(典型值)
中频带宽	DC~100 MHz(最小值)	DC~100 MHz(最小值)	DC~100 MHz(最小值)
主瓣宽度	12°(典型值)	12°(典型值)	12°(典型值)
副瓣宽度	-20 dB(最大值)	-20 dB(最大值)	-20 dB(最大值)
极化	右旋圆极化	右旋圆极化	右旋圆极化
谐波抑制	-16 dBc(最大值)	-16 dBc(最大值)	-16 dBc(最大值)
$\Delta f/\Delta T$	-0.20 MHz/°C(最大值)	-0.40 MHz/°C(最大值)	-4.0 MHz/°C(典型值)
$\Delta P/\Delta T$	-0.03 dB/°C(最大值)	-0.04 dB/°C(最大值)	-0.04 dB/°C(典型值)
直流偏置	+5.5 V/250 mA(典型值)	+5.5 V/350 mA(典型值)	+5.5 V/650 mA(典型值)
工作温度	-40~85°C	-40~-85°C	-40~+85°C