

*RF* and Microwave Circuit Design

# 射频微波电路设计

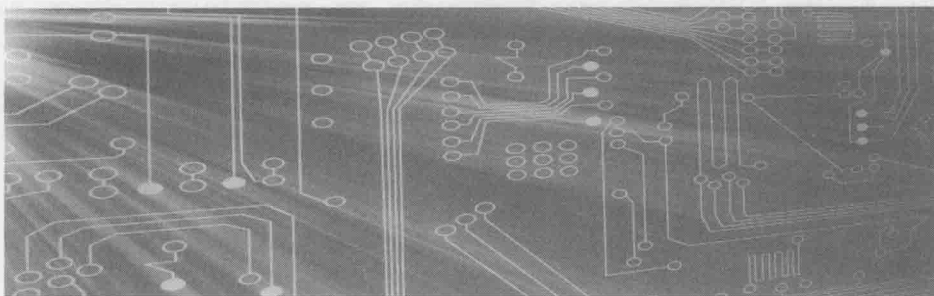
陈会 张玉兴 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

RF and microwave circuit design

# 射频微波电路设计



陈会 张玉兴 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

射频微波电路设计 / 陈会, 张玉兴编著. —北京: 机械工业出版社, 2015.2

ISBN 978-7-111-49287-0

I. 射… II. ①陈… ②张… III. 射频电路—微波电路—电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 024360 号

本书讲述了广泛应用于无线通信、雷达以及遥感遥测等现代电子系统中的射频微波电路, 主要内容涉及射频微波电路概论、传输线基本理论与散射参数、射频电路 CAD 基础、射频微波滤波器、放大器、功分器与合成器, 以及天线等。本书通过大量实例阐述了经典电路的设计方法与步骤, 并对业界广泛使用的电路与电磁仿真技术进行了介绍与应用示范。同时, 针对近年来出现的一些新型微带电路与技术也进行了介绍与讨论, 主要包括: 微带/共面波导 (CPW)、微带/槽线, 以及基片集成波导 (SIW) 等双面印制电路板。因此, 本书不仅适合作为无线通信与雷达等电子技术相关专业的本科生与研究生的教材, 而且可以作为从事各种电子技术相关方向专业人士的参考书。



## 射频微波电路设计

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 15 (含 2 面彩插)

书号: ISBN 978-7-111-49287-0

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东



图 4.74 SSL UWB BPF 的实物照片  
(移开了顶部的屏蔽盖)

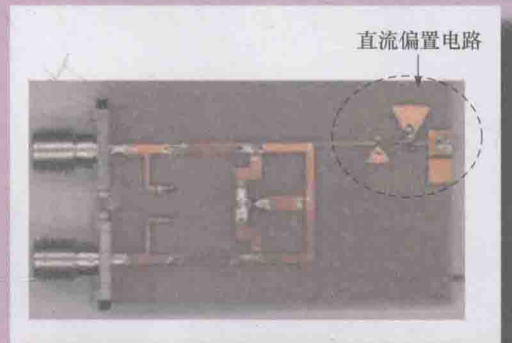


图 4.79 具有两个带陷可开关的 UWB 滤波器

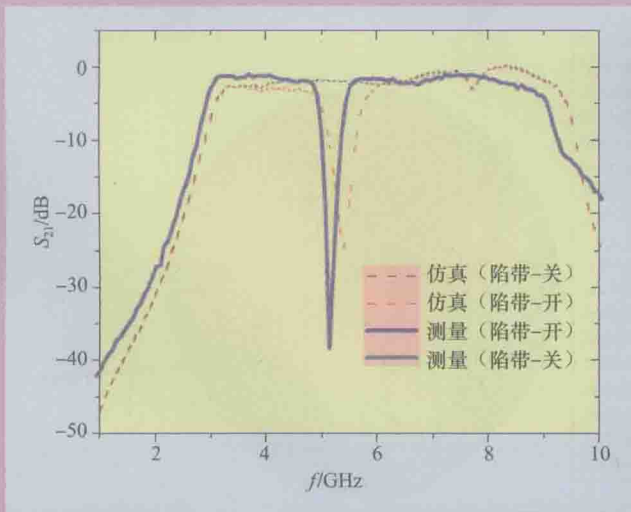


图 4.81 带陷可开关的 UWB 滤波器的仿真与测量结果

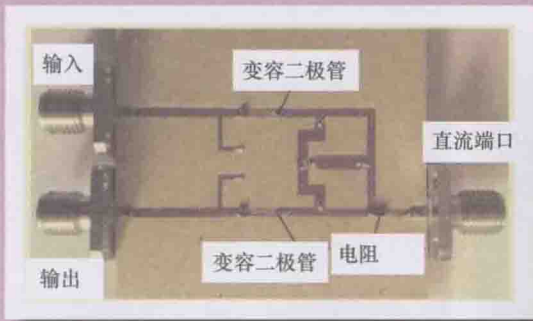


图 4.82 带陷可调谐 UWB 滤波器

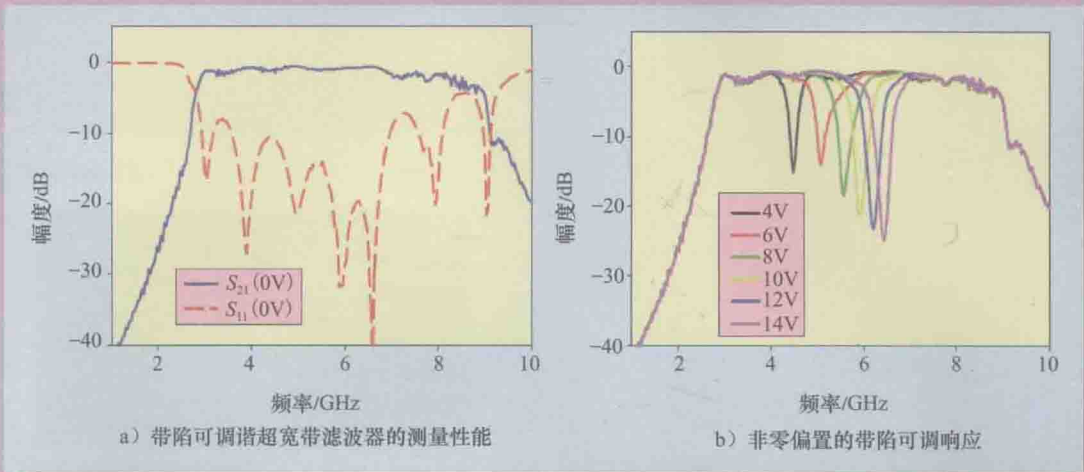
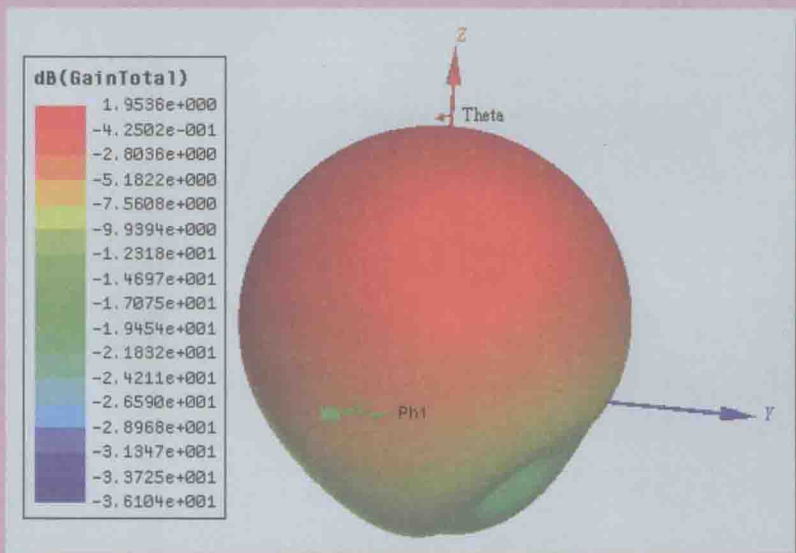


图 4.83 带陷可调谐 UWB 滤波器的响应

图 7.18 仿真得到的天线各项指标参数



# 前 言

近年来,无线技术,特别是通信(例如数据网络、移动电话)、射频识别(RFID)、导航(GPS)、遥感遥测以及探测(雷达)等技术的飞速发展与不断进步引起了全球范围内的普遍关注。因此,对于无线电应用所需的高频载波而言,这将有利于更好地规划和使用电磁频谱,并允许设计更多有效的天线。可以预见,基于低成本制造工艺和现代计算机辅助设计工具,未来的新型无线系统将使用更高频率以及更宽频带的频谱。因此,射频前端及其电路在现代无线系统中占据着重要地位。

纵观当今电路技术,不难发现射频概念已经深入到高速数字电路中了,因而数字电路设计者将面临新的设计挑战,即必须以分布式传输线理论来重新考虑以前的集总元件与相邻元件之间的寄生耦合等问题和现象。然而,从学习和掌握的角度来讲,射频微波电路的分析与设计始终是一个难点,这不仅是因为严格的射频微波电路分析与综合绕不开难以理解和掌握的电磁场理论与麦克斯韦方程,而且更重要的原因是射频微波电路很难准确设计与调试,尤其是以功率放大器为代表的有源电路更是如此。虽然现代电路与电磁仿真软件能够在一定程度上减轻设计者繁琐的分析与计算负担,但是这很大程度上取决于电路模型的准确性。

尽管射频微波领域包括了很宽的主题,但本书重点关注的是基本电路设计技术,其主要包括射频微波电路概述、传输线理论与散射参数、射频电路的计算机辅助设计(CAD)技术、滤波器、放大器、功率分配与合成,以及天线等内容。本书在内容和写法上有以下突出特点:一是,在内容安排上本书重点介绍以射频微波滤波器为代表的无源电路以及以放大器为代表的有源电路;二是,在写法上以大量设计实例阐述射频电路和器件的设计方法与步骤;三是,注重新型实用电路技术的引入与讨论,以拓展读者的学术视野。

在每章之后有习题以便加深读者对于该章内容的基本理解。关于习题答案以及教学课件,感兴趣的读者可以在 <http://www.hzbook.com> 上获得。

本书由电子科技大学的陈会副教授与张玉兴教授合作完成,其中张玉兴教授撰写了第1章和第2章,其余章节由陈会副教授完成。另外,张玉兴教授负责全书的统稿与审校。

本书最终完成于编者出国访学期间,因此,特别感谢电子科技大学与国家留学基金委的支持。限于成书时间以及作者的水平,书中不妥之处敬请广大同行批评与斧正。

编 者

2014年11月于电子科技大学

## 推荐阅读



### 电路基础 (原书第5版)

作者: (美) Charles K. Alexander 等 译者: 段哲民 等 ISBN: 978-7-111-47088-0 定价: 129.00元

本书是电类各专业“电路”课程的一本经典教材,被美国众多名校采用,是美国最有影响力的“电路”课程教材之一。本书每章开始增加了中文“导读”,适合用做高校“电路”课程双语授课或英文授课的教材。本书前4版获得了极大的成功,第5版以更清晰、更容易理解的方式阐述了电路的基础知识和电路分析方法,并反映了电路领域的最新技术进展。全书总共包括2447道例题和各类习题,并在书后给出了部分习题答案。

### 交直流电路基础: 系统方法

作者: (美) Thomas L. Floyd 译者: 殷瑞祥 等 ISBN: 978-7-111-45360-4 定价: 99.00元

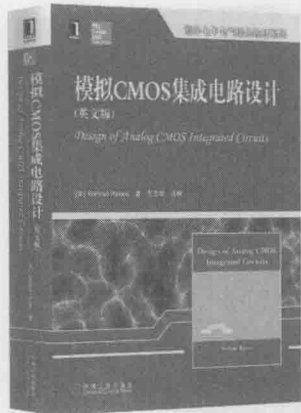
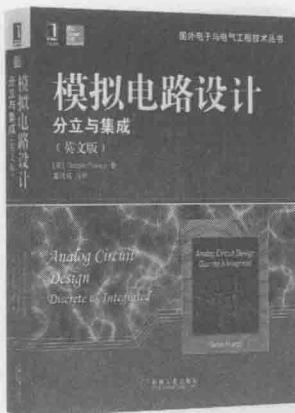
本书是知名作者Floyd的最新力作,在国外被广泛使用。本书系统介绍了直流和交流电路理论,强调直流/交流电路基本概念在实际系统中的应用。全书丰富的实例,有助于学生的理解系统模块、接口和输入/输出信号之间的关系。书中实例使用Multisim进行仿真,并提出在模拟电路与系统和排除故障中存在的问题及解决方法。本书可作为电子信息、电气工程、自动化等类专业的电路课程教材。

### 应用电路分析

作者: (美) Matthew N. O. Sadiku 等 译者: 苏育挺 等 ISBN: 978-7-111-47077-9 定价: 99.00元

本书可作为高等院校电类专业“电路分析”课程的教材,以更清晰、生动、易于理解的方式来阐述电路分析的方法。全书分为两部分,第一部分包括第1~10章,主要介绍直流电路;第二部分包括第11~19章,主要介绍交流电路。本书可以作为大学两学期或三学期的教材,授课教师也可选择适当的章节,将其用作一学期课程的教材。

## 推荐阅读



### 基于运算放大器的模拟集成电路设计（英文版·第4版）

作者：Sergio Franco ISBN：978-7-111-48933-7 出版时间：2015年1月 定价：99.00元

本书着重理论和实际应用相结合，重点阐述模拟电路设计的原理和技术直观分析方法；主要包括运算放大器的基本原理和应用、涉及运算放大器的静态和动态限制、噪声及稳定性问题等诸多实际问题，以及面向各种应用的电路设计方法三大核心内容，强调物理思想，帮助读者建立电路设计关键的洞察力，可作为电子信息、通信、控制、仪器仪表等相关专业本科高年级及研究生有关课程的教材或主要参考书，对电子工程师也是一本实用的参考书。

### 模拟电路设计：分立与集成（英文版）

作者：Sergio Franco ISBN：978-7-111-48932-0 出版时间：2015年1月 定价：119.00元

本书是针对电子工程专业且致力于将模拟电子学作为自身事业的学生和集成电路设计工程师而准备的，前三章介绍二极管、双极型晶体管和MOS场效应管，注重较为传统的分立电路设计方法，有助于学校通过物理洞察力来掌握电路基础技术；后续章节介绍模拟集成电路子模块、典型模拟集成电路、频率和时间响应、反馈、稳定性和噪声等集成电路内部工作原理（以优化其应用）。本书涵盖的分立与集成电路设计内容，有助于培养读者的芯片设计能力和电路板设计能力。

### 模拟CMOS集成电路设计（英文版）

作者：Behzad Razavi ISBN：978-7-111-43027-8 出版时间：2013年8月 定价：79.00元

本书介绍模拟CMOS集成电路的分析与设计。从直观和严密的角度阐述了各种模拟电路的基本原理和概念，同时还阐述了在SOC中模拟电路设计遇到的新问题及电路技术的新发展。本书由浅入深，理论与实际结合，提供了大量现代工业中的设计实例。全书共18章。前10章介绍各种基本模块和运放及其频率响应和噪声。第11章至第13章介绍带隙基准、开关电容电路以及电路的非线性和失配的影响，第14、15章介绍振荡器和锁相环。第16章至18章介绍MOS器件的高阶效应及其模型、CMOS制造工艺和混合信号电路的版图与封装。本书可供与集成电路领域有关的各电类专业的高年级本科生和研究生使用，也可供从事这一领域的工程技术人员自学和参考。



# 目 录

## 前言

## 第 1 章 射频微波电路概论 ..... 1

### 1.1 现代无线电的系统原理 ..... 1

#### 1.1.1 基本组成原理 ..... 1

#### 1.1.2 射频信号与调制技术 ..... 2

### 1.2 现代无线电收发机的结构 ..... 5

#### 1.2.1 现代发射机结构 ..... 5

#### 1.2.2 现代接收机结构 ..... 7

### 1.3 射频微波概念与应用 ..... 8

#### 1.3.1 无线电频谱的划分 ..... 8

#### 1.3.2 射频微波应用 ..... 9

### 1.4 射频微波域中的物理现象 ..... 11

#### 1.4.1 集总元件的射频效应 ..... 11

#### 1.4.2 趋肤效应 ..... 13

#### 1.4.3 电磁辐射 ..... 13

#### 1.4.4 电源耦合 ..... 14

#### 1.4.5 噪声 ..... 17

### 1.5 习题 ..... 18

## 第 2 章 传输线理论与散射参数 ..... 19

### 2.1 基本传输线 ..... 19

#### 2.1.1 基本结构 ..... 19

#### 2.1.2 传输线方程及其等效 电路 ..... 20

#### 2.1.3 终端传输线方程 ..... 22

### 2.2 耦合传输线 ..... 23

#### 2.2.1 耦合类型 ..... 25

#### 2.2.2 耦合原理 ..... 26

### 2.3 散射参数 ..... 32

#### 2.3.1 $Z/Y$ 、 $ABCD$ 及 $H$ 参数 的定义 ..... 32

#### 2.3.2 $S$ 参数 ..... 33

### 2.4 习题 ..... 35

## 第 3 章 射频电路 CAD 基础 ..... 37

### 3.1 引言 ..... 37

### 3.2 RFSim99 软件 ..... 37

#### 3.2.1 设计界面 ..... 38

#### 3.2.2 滤波器的自动化设计 ..... 38

#### 3.2.3 容差分析 ..... 39

#### 3.2.4 匹配电路的自动化 设计 ..... 40

### 3.3 AppCAD 系统仿真 ..... 42

#### 3.3.1 功能简介 ..... 42

#### 3.3.2 射频系统分析 ..... 42

### 3.4 Agilent ADS 振荡器仿真 ..... 43

#### 3.4.1 振荡条件 ..... 43

#### 3.4.2 常用设计指标 ..... 44

#### 3.4.3 设计步骤 ..... 45

3.4.4	设计实例: Colpitts 振荡器	45	第5章	射频微波放大器	122
3.5	Agilent Genesys 混频器仿真	49	5.1	低噪声放大器	122
3.5.1	混频器概述	49	5.1.1	概述	122
3.5.2	混频器的性能指标	50	5.1.2	低噪声放大器指标	123
3.5.3	混频器的基本理论	54	5.1.3	低噪声放大器设计	126
3.5.4	设计实例	55	5.2	功率放大器	148
3.6	习题	57	5.2.1	概述	148
第4章	射频微波滤波器	58	5.2.2	偏置电路	151
4.1	滤波器基本理论	58	5.2.3	A类功率放大器设计实例	152
4.1.1	设计参数	59	5.2.4	B类功率放大器设计实例	155
4.1.2	低通原型滤波器	61	5.2.5	D类功率放大器	158
4.1.3	滤波器变换	62	5.2.6	F类功率放大器	160
4.2	经典滤波器	66	5.3	习题	167
4.2.1	微带低通滤波器	66	第6章	功分与合成电路	168
4.2.2	微带带通滤波器	75	6.1	引言	168
4.2.3	微带高通滤波器	90	6.1.1	合成概念的演变	168
4.2.4	微带带阻滤波器	94	6.1.2	合成的基本原理	169
4.3	基于SIR耦合的交指滤波器设计	97	6.1.3	合成的网络特性	170
4.4	双面滤波电路	101	6.2	功分与合成电路的分析方法	172
4.4.1	宽阻带低通滤波器	102	6.2.1	传输线合成器的分析	173
4.4.2	(超)宽带高性能带通滤波器	104	6.2.2	平面二维功率合成结构的分析	173
4.5	滤波器的可重构技术	115	6.3	经典微带功分与合成电路	174
4.5.1	可调谐梳状滤波器	116	6.3.1	Wilkinson 功分器	174
4.5.2	可重构 UWB 滤波器	116	6.3.2	耦合线定向耦合器	180
4.6	无源器件的交调特性	119	6.3.3	微波混合桥	184
4.6.1	无源交调产生的原因	119	6.4	新型微带功分与合成电路	190
4.6.2	无源交调对系统性能的影响	120	6.4.1	任意双频比功分与合成技术	191
4.7	习题	120			

6.4.2	基于 DGS 结构的不等分功率合成技术	194	7.3.1	微带天线的理论基础	211
6.4.3	基片集成波导功分与合成电路	197	7.3.2	微带天线的分析方法	213
6.5	习题	201	7.4	微带贴片天线	214
<b>第 7 章</b>	<b>微带天线</b>	<b>203</b>	7.4.1	线极化微带天线	214
7.1	引言	204	7.4.2	圆极化微带天线	220
7.1.1	天线的基本原理	204	7.5	小型化微带天线 PIFA	223
7.1.2	天线的分类	204	7.5.1	概述	223
7.1.3	微带天线简介	205	7.5.2	倒 F 天线的结构参数	224
7.2	微带天线的电气参数	207	7.5.3	PIFA 天线的设计与仿真	224
7.2.1	电路参数	207	7.6	微带阵列天线	227
7.2.2	辐射参数	208	7.7	现代天线概念	229
7.3	微带天线基本理论与分析方法	211	7.8	习题	229
			<b>参考文献</b>	<b>231</b>	

# 射频微波电路概论

在现代无线通信和雷达等电子系统中，“电路与系统”的关系犹如“树木与森林”的关系：相互包含、相互渗透以及相互作用和影响，谁也离不开谁。系统需要电路来支撑，而电路则需要系统来体现。因此，我们在讨论射频微波电路设计的时候，切不可将两者完全割裂开来。但限于篇幅和侧重点，我们对无线系统的知识只做简单介绍，感兴趣的读者可以进一步参阅书末的相关文献。因此，本章首先介绍以通信和雷达为主体的现代无线电系统的基本组成、工作原理与体系结构；然后在此基础上简单介绍射频微波的概念与实际应用；最后，阐述实现上述无线系统的关键部件——射频与微波电路及其物理现象。

## 1.1 现代无线电的系统原理

射频通信接收机的前端由许多子系统级联以实现若干目的。滤波器和匹配网络提供了频率选择性以消除干扰信号，放大器通过提高接收信号幅度和需要发射的信号功率来“管理”噪声电平，混频器和振荡器将调制信息从一个频率变换到另一个频率。使用接收机的主要目的是把叠加到射频或载波上的信号转换到较低频率上，以便将其直接送到扬声器或进一步数字化处理。在蜂窝通信系统中，该低频信号通常被称为基带信号，其带宽从30kHz到5MHz的范围内变化，而载波频率可以在500MHz到2GHz的范围内选择。发射机则将基带信号叠加或调制到一个RF载波上，以便更容易地将其辐射到自由空间，并使其易于从一个天线(发射)传播到另一个天线(接收)。

### 1.1.1 基本组成原理

尽管实际的无线系统可能存在许多差异，但大多数系统的射频级有高度的共性。图1.1a和b分别给出了典型无线电发射机与接收机的功能框图。

输入到无线发射机的原始内容可能会是语音、视频、数据或者其他信息(现代通信中，这些内容已经被数字化)，它们将通过发射机传输到一个或多个远距离的接收机中。这些数据通常被称为基带信号。发射机的基本功能是调制或编码，即将基带信息加载到能够通过发射天线辐射出去的高频正弦载波上。究其原因是，与直接辐射基带信号相比，更高频率上的信号能够更有效地辐射以及更能有效地使用射频频谱。图1.1a所示的发射机首先使用基带数据去调制中频正弦波信号。正如我们将要讨论的那样，这里有很多可能的调制方法，其包括模拟和数字调制，并可以通过改变正弦波的幅度、频率以及相位来实现调制功能。调制器的输出被称为中频(IF)信号，通常其频率范围在10MHz到100MHz高中频之间。然后中频信号再通过混频器往上搬移(或上变频)到所需的射频发射频率。输入的中频

信号与本振(LO)频率在混频器内实现频谱搬移,从而得到它们的和、差频率。经混频器后的带通滤波器(BPF)允许上混的载波信号通过,而抑制掉镜像频率。如信号功率小,则可用。功率放大器可用于增加发射机的输出功率。最后,天线将已调制的载波信号从发射机变换到能够在自由空间传播的电磁波。

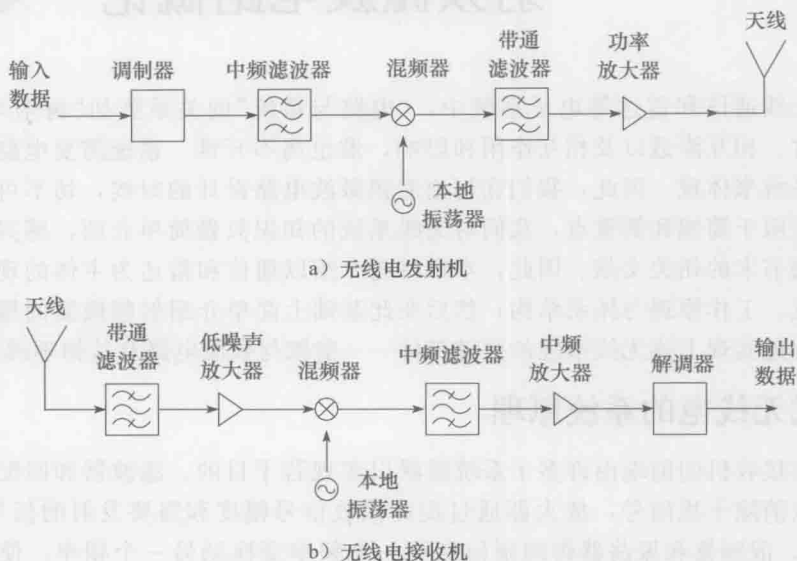


图 1.1 典型无线电发射机和接收机的功能框图

图 1.1b 所示的接收机将恢复经发射的基带数据,这个过程基本上是发射机元器件功能的逆过程。天线将在相对宽的频率范围内接收到来自很多辐射源的电磁波。天线后面的带通滤波器将利用滤掉不需要的接收信号并让所需频段的信号通过的方式来提供一定的频率选择性。紧随滤波器之后的低噪声放大器(LNA),其主要功能是放大可能接收到的微弱信号,并使进入到接收信号中的噪声影响最小化。在 LNA 之前放置了一个带通滤波器,其主要目的是减少高功率干扰信号对灵敏放大器造成过载的可能性。接下来,利用混频器将接收到的射频信号下变频到较低的频率,再一次称为中频(IF)。当 LO 频率被设置到输入射频频率的附近时,来自混频器的输出差频将相对较低(典型值低于 100MHz),并能够容易地利用中频带通滤波器进行过滤。高增益中频放大器将提升信号的功率电平,以便于基带数据恢复。恢复基带信号的过程称为解调,今天通常利用数字信号处理(DSP)电路来实现。正如我们将要讨论的那样,这种类型的接收机被称为超外差接收机,因为在最终的解调之前,它利用频率变换将相对较高的射频载波频率变换成相对较低的中频频率。

### 1.1.2 射频信号与调制技术

射频通信信号的设计需要在有效利用电磁频谱与所需射频硬件的复杂性和性能之间进行综合考虑。转换基带(或低频)信息到射频的过程被称为调制,这其中有两个类型:模拟

和数字调制。在模拟调制中,模拟信号是连续变化的,用经典的调幅、调频和调相对 RF 信号实现调制;而在数字调制中,则利用现代数字调制技术,如 BPSK、QPSK、GMSK、COFDM 等。在实际工程应用中,仅有部分调制方案能够达到频谱效率和硬件易用性的最佳折中。

在射频通信中要传送的信号必须经过调制,其原因是:

- 1) 在无线系统中,只有当天线尺寸与波长可比拟时,才能有效地辐射射频功率。
- 2) 在有线系统中,同轴线可对高频信号提供有效的屏蔽,以使信号不致泄漏。
- 3) 对于无线频谱的使用,国际上有严格的管理和分配,在频谱拥挤的条件下,高载频可提供较大的通信容量。
- 4) 调制解调技术可以提供有效的方法来克服高频无线信道缺陷。

常用的调制方案包括以下内容。

#### 1) 模拟调制

- 调幅(AM)
- 调频(FM)
- 相位调制(PM)

#### 2) 数字调制

- 频移键控(FSK)
- 相移键控(PSK)
- 最小频移键控(MSK 和 FSK 中的一种形式)
- 采用高斯滤波数据的最小频移键控(GMSK)
- 二进制频移键控(BFSK)
- 二进制相移键控(BPSK)
- 正交相移键控(QPSK)
- 编码正交频分多路(COFDM)

频率调制与相位调制统称为角度调制,它应用于模拟蜂窝无线电。调幅、调频以及调相三种调制技术是模拟无线电的基础,而其他调制原理则用于数字无线电,包括数字蜂窝无线电。GMSK 是用于全球移动通信系统(GSM)的蜂窝系统,它也是 FSK 的一种调制形式,并能产生一个恒定的振幅调制信号。在 FM、FSK、GMSK 以及 PM 技术中产生恒定的射频包络,这样,在已调信号的振幅中没有包含任何信息。因此,引入到系统幅度中的误差就变得不那么重要了。所以,可以使用诸如 C 类高效率、饱和工作模式的放大器,以延长电池寿命。总之,在射频信号设计的复杂度、调制类型的选择以及电源效率之间需要折中考虑,以便获得高效、合理的无线系统设计方案。

常规窄带无线电系统的调制类型是基于缓慢改变载波的幅度和相位,以达到修正其物理特性的目的。常用模拟调制的波形和频谱如图 1.2 所示。图 1.2 的左侧是时域信号,它包括基带、载波以及已调信号的时域波形,而图 1.2 的右侧则是其对应的频谱。幅度调制是利用基带信号  $f(t)$ (低频)去缓慢改变载波(高频)的幅度,以使载波的包络按基带信号的

幅度变化,其已调波形及其频谱如图 1.2c 所示。幅度调制属于频谱的线性变换。如前所述,频率调制和相位调制的基本原理是相同的,即角频率与相位的变化都会引起载波的相位角变化,因此这两种调制方式统称为角度调制,其基本特点是让载波的瞬时频率或瞬时相位与调制信号  $f(t)$  呈线性关系,而载波的振幅不变。角度调制具有比振幅调制更强的抗干扰能力。因此,调频被广泛地应用于卫星电视广播、调频广播、通信及遥控等,而调相主要应用于数字通信系统中的移相键控和间接调频。

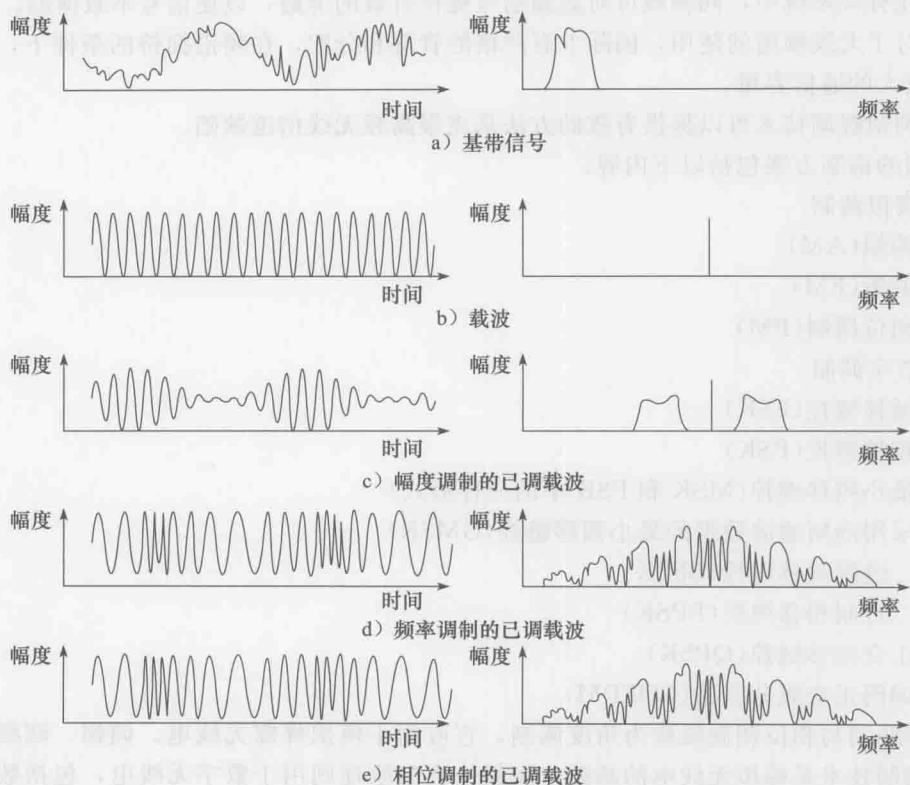


图 1.2 模拟调制的波形以及频谱

数字调制首先应用于无线电报信号的发送,载波通过开关或键控产生载波信号的脉冲。这种调制现在被称为幅移键控(ASK),但今天已很少使用这种调制方法。图 1.3 给出了几种数字调制形式。数字调制的基本特征是离散状态,每一个状态定义一种符号,而一个符号又描述一个或多个比特。在图 1.3 中,只有两种状态来描述 1 比特两个值中的一种(即 0 或 1)。利用多个状态可以描述比特组。已经成功证明过的数字调制形式有很多,其中一些常用的类型接下来将会简单介绍。在现代通信原理中,能够恢复原始载波是很重要的,因此,为了拓展时间周期,载波幅度不应该太小,这正如图 1.3c 中阐述的 ASK 原理。

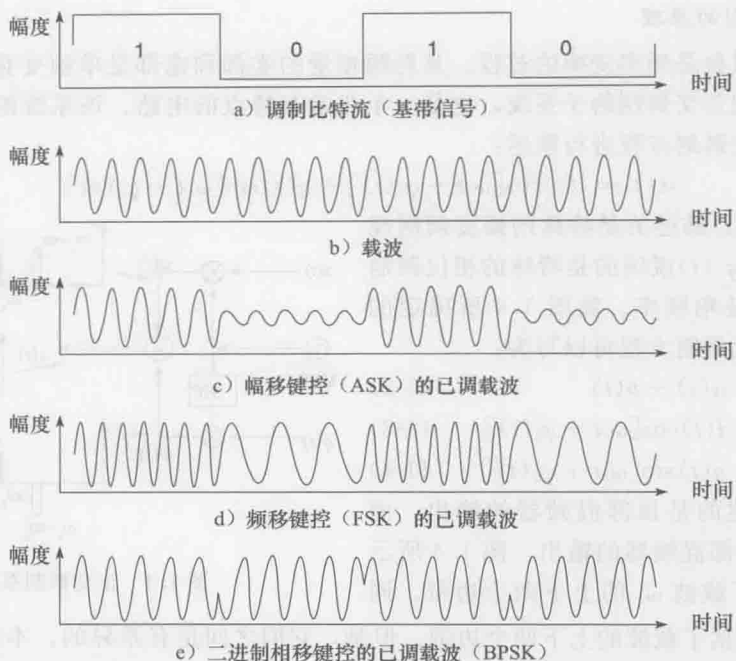


图 1.3 数字调制形式

## 1.2 现代无线电收发机的结构

### 1.2.1 现代发射机结构

现代移动通信发射机需要最大限度地提高频谱效率和电源效率,例如,频谱效率和电源效率的提高可通过抑制载波的发射以及只发射一个单边带来实现,也可以通过选择调制方式来提高频谱利用率。实现单边带调制的经典技术是正交调制,下面将有所介绍。通过严格要求允许的失真来实现电源效率,并且利用最少的手工调整来实现这样一种设计。对电源效率的要求会直接导致复合半导体晶体管的产生,包括 GaAs HBTs 和 pHEMTs,而且大部分应用于蜂窝手机中。对于基站和点对点应用而言,在低于几千兆赫兹的工作频率下, Si-LDMOS 是主流技术,并引入了高击穿电压的氮化镓(GaN)场效应管。另一种趋势是发展通用放大器的概念,它能使相同的 RF 前端应用于许多不同的应用场合。这里集中讨论的是窄带通信,即可以将已调 RF 载波看作是一个缓慢变化的 RF 相量。

为了提高移动发射机的电源效率,出现了很多新型高效率的功率放大器,例如,包络分离和恢复的 Kahn 功率放大器、异相功率放大器、Doherty 功率放大器、开关功率放大器和双途径功率放大器等。为了满足现代通信对功率放大器线性度的要求,还出现了前馈线性化技术、基带预失真技术等。



### 1. 正交调制的原理

正交调制过程是频率变换的过程,其射频相量的实部和虚部是单独变化的。图 1.4 给出了一种能实现正交调制的子系统,这是一个非常有特点的电。该系统的工作机理可通过如下广义正交调制方程进行阐述:

$$s(t) = i(t)\cos[\omega_c t + \varphi_i(t)] + q(t)\sin[\omega_c t + \varphi_q(t)] \quad (1-1)$$

其中,  $i(t)$  和  $q(t)$  描述的是特殊的幅度调制规则,而  $\varphi_i(t)$  和  $\varphi_q(t)$  说明的是特殊的相位调制规则,  $\omega_c$  是载波角频率。就图 1.4 所确定的信号而言,正交调制方程可以写为:

$$s(t) = a(t) + b(t) \quad (1-2)$$

$$a(t) = i(t)\cos[\omega_c t + \varphi_i(t)] \quad (1-3)$$

$$b(t) = q(t)\sin[\omega_c t + \varphi_q(t)] \quad (1-4)$$

其中,  $a(t)$  描述的是顶部混频器的输出,而  $b(t)$  描述的是底部混频器的输出。图 1.4 所示  $a(t)$  频谱包括了载波  $\omega_c$  的上下两个边带。同

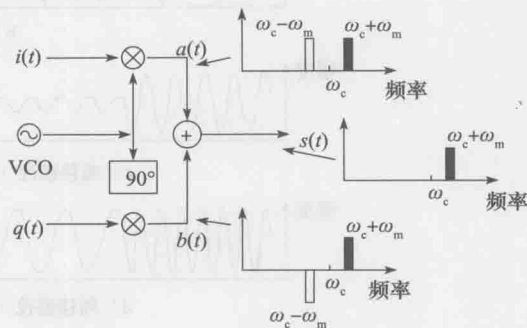


图 1.4 正交调制系统

样,  $b(t)$  频谱包括了载波的上下两个边带。但是,它们之间是有差异的。本振[这里是压控振荡器(LCO)]有  $90^\circ$  相移(可以使用 RC 延长线),因此,  $b(t)$  的频率分量对载波与  $a(t)$  的分量对载波有不同的相位关系。当  $a(t)$  和  $b(t)$  合成的时候,载波的内容就相互抵消,并得到一个边带,这正是我们所需要的结果:载波不应该被发射,因为它没有包含任何信息。而且,也希望只发射一个边带,因为它包含了调制过程中所有的信息。这种调制类型被称为抑制载波的单边带(SCSS)调制,下一小节将阐明该调制类型的工作原理。它的实际特征取决于  $i(t)$ 、 $q(t)$ 、 $\varphi_i(t)$  和  $\varphi_q(t)$  的特殊形式以及它们定义的调制原理。仅有少数定义良好的频谱具有陡峭边壁的最佳性能,因此,相邻信道可以彼此紧密排列。在数字调制中,每一个  $i(t)$  和  $q(t)$  都来自同一个比特流,它们可以简单地通过二进制波形的过滤来得到。

### 2. SCSS 的原理

本小节将简单讨论抑制载波的单边带(SCSS)调制原理。令  $i(t)$  和  $q(t)$  是角频率中心为  $\omega_m$  且相差  $\varphi_q(t) - \varphi_i(t) = 90^\circ$  的有限带宽信号,如图 1.4 所示。其中,  $\omega_m$  代表  $i(t)$  和  $q(t)$  的频率分量。参考图 1.4,并令  $\varphi_q(t) = \varphi_i(t) = 0$ , 则有:

$$i(t) = \cos(\omega_m t) \quad \text{和} \quad q(t) = -\sin(\omega_m t) \quad (1-5)$$

以及广义正交调制方程则变成如下形式:

$$s(t) = i(t)\cos(\omega_c t) + q(t)\sin(\omega_c t) = a(t) + b(t) \quad (1-6)$$

其中,

$$a(t) = \frac{1}{2}\{\cos[(\omega_c - \omega_m)t] + \cos[(\omega_c + \omega_m)t]\} \quad (1-7)$$

以及