

WILEY

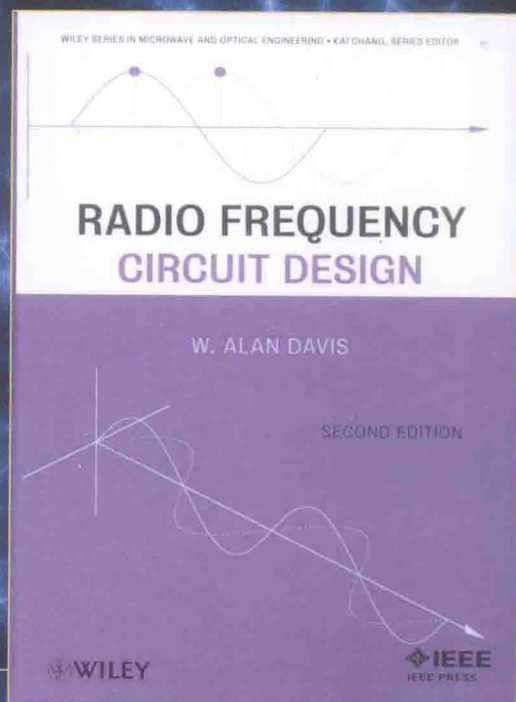
射频电路设计

(原书第2版)

[美] W. Alan Davis 著

李福乐 李玮韬 等译

*Radio Frequency
Circuit Design*
1 *cond Edition*



机械工业出版社
China Machine Press

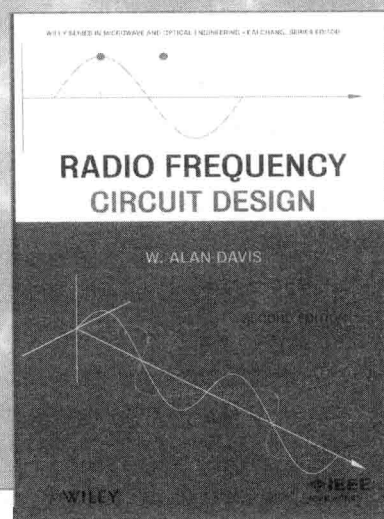
射频电路设计

(原书第2版)

[美] W. Alan Davis 著

李福乐 李玮韬 等译

*Radio Frequency
Circuit Design
Second Edition*



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

射频电路设计 (原书第 2 版) / (美) 戴维斯 (Davis, W. A.) 著; 李福乐等译. —北京: 机械工业出版社, 2014.10

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Radio Frequency Circuit Design, Second Edition

ISBN 978-7-111-48318-2

I. 射… II. ①戴… ②李… III. 射频电路—电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 241861 号

本书版权登记号: 图字: 01-2012-7582

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Radio Frequency Circuit Design, Second Edition, ISBN 978-0-470-57507-9, by W. A. Alan Davis, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰-威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

本书讲述射频电路设计的原理和应用, 涉及滤波器、阻抗变换器、小信号放大器、振荡器、噪声理论和 A 类/B 类大信号放大器, 以及混频器和锁相环等。书中采用当前在放大器和电路设计中广泛使用的大量散射参数, 还提供了大量 SPICE 网表和设计实例, 对工程实践有一定的参考价值。本书适合作为通信、电子工程及相关专业本科生或研究生的教材或参考书。对于射频元件设计和微波电路设计方面的工程技术人员, 本书也是一本有价值的参考书。



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: 谢晓芳

责任校对: 殷虹
版次: 2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 14.25

书号: ISBN 978-7-111-48318-2

定价: 55.00 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

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译 者 序

近十年来，移动通信技术和市场呈现高速发展的态势，尤其是智能手机的普及和移动互联网的不断拓展，正在潜移默化中改变着我们的日常生活方式。射频设计技术，作为移动与无线技术的生根之本，必然将继续快速发展下去，以满足市场应用对其提出的各种要求。射频电路从根本上来说还是以模拟电路为主的混合信号电路，虽然数字化是射频电路芯片的一个趋势，但射频技术本身很难离开高性能模拟技术的支持。因此，本书所关注的重点，即模拟电路设计领域中的射频电子学技术，现在仍然是射频设计技术学习者所必须掌握的内容。

本书第2版在第1版的基础上，改进了总体内容的逻辑性，并扩展了部分章节的内容，总体上更能体现射频技术的发展并符合学生的学习规律。本书第2版翻译是在第1版翻译的基础上完成的，在此感谢参与第1版翻译工作的人员。清华大学微电子学研究所的李福乐博士负责本书第2版的翻译工作，参加第2版翻译工作的人员还有：李玮韬、王亚和薛春莹。

第 2 版前言

自本书第 1 版出版到现在已经将近 10 年了，在这期间，射频设计技术和应用在持续迅速扩张。读者会发现，第 2 版与第 1 版相比有很多变化，例如，扩展了功率放大器、振荡器相位噪声和阻抗匹配的内容，以及删除了其他一些材料。有些章节重新安排了次序，使得内容的前后关系更有逻辑。特别是，将有关噪声的章节安排在第 8 章的前面。然而，当这本书用于我们的射频电路课程时，这门课要求学生使用安捷伦的软件（Advanced Design System）来做一个设计项目，我们发现，让学生们在理解基本的放大器设计后先行启动项目设计，之后再去处理设计中的噪声问题，这样对他们更有帮助。在本书中，所给出的设计例子都可在第 1 章所给出的网站上找到。这些程序对于需要快速找到一个解决方案的工程师和希望去了解一个计算中某些细节的学生来说，应该是有帮助的。

感谢 Krishna K. Agarwal 先生对本书第 1 版所做的诸多贡献，以及 William Cantrell 先生对本版 E 类功率放大器部分的贡献。此外，也对各位审校者所给出的有价值的建议表示感谢。

W. Alan Davis

第 1 版前言

移动电话已经成为当前通信业务飞速发展的重要标志。在手机这个小小的电子设备中，包含着无数工程师的智慧，涉及高效电源、数字电路设计、模拟电路设计、半导体器件设计、天线、线性系统、数字信号处理、封装和材料科学等领域。这些领域内的天才工程师们通力协作，使得世界各地的人们能够方便快捷地使用即时通信技术。所有这些活动的一个特别方面，是模拟电路设计领域中的射频电子学技术，这也是本书关注的重点。通常在电子学课程或微波和天线课程中讨论的主题，不包含在本书的讨论范围之内。例如，由于分布式支线耦合器（distributed branch line coupler）在 1GHz 频率下的尺寸令人望而却步，所以本书没有研究它。而传输线变换器（transmission line transformer）在这个频率范围内非常适用，所以在本书中对它进行了讨论。

本书的读者应该对电子工程技术比较熟悉。本书曾经作为位于阿灵顿的得克萨斯大学四年级和研究生的射频电路设计教材。在过去的 20 年中，至少有 4 位教师讲授过这门课程（其中有两位是本书的作者），且受到学生们的广泛欢迎。由于近年来通信领域的研究十分活跃，因此，大家对这些课程越来越感兴趣。作者希望能够更新书中的内容，同时避免简单重复地讲解微波方面的内容。

十分感谢 Raytheon Systems 公司的 Michael Black 先生对第 12 章所做的贡献。

W. Alan Davis
Krishna Agarwal

出版者的话

译者序

第2版前言

第1版前言

第1章 信息传输技术 1

1.1 概述 1

1.2 信息和容量 1

1.3 相关状态 2

1.4 基本发射机-接收机结构 3

1.5 有源器件技术 5

习题 6

参考文献 6

第2章 电阻器、电容器和电感器 ... 7

2.1 概述 7

2.2 电阻器 7

2.3 电容器 10

2.4 电感器 13

2.5 小结 20

习题 20

参考文献 20

第3章 阻抗匹配 22

3.1 概述 22

3.2 Q 因数 22

3.3 谐振与带宽 22

3.4 无负载品质因数 Q 23

3.5 L 形电路阻抗匹配 24

3.6 π 形变换电路 25

3.7 T 形变换电路 26

3.8 分支电容变换器 27

3.9 并行双调谐变换器 28

3.10 小结 30

习题 31

参考文献 31

第4章 多端口电路参数和传输线 ... 32

4.1 电压-电流双端口参数 32

4.2 ABCD 参数 33

4.3 对等阻抗 33

4.4 传输线波动方程 36

4.5 传输线方程 37

4.6 史密斯圆图 38

4.7 传输线短截线变换器 39

4.8 常用的传输线 42

4.9 散射参数 49

4.10 不定导纳矩阵 52

4.11 不定散射矩阵 53

4.12 小结 54

习题 54

参考文献 55

第5章 滤波器设计与近似 56

5.1 概述 56

5.2 理想和近似滤波器的类型 56

5.3 传递函数和基本滤波器概念 58

5.4 梯形网络滤波器 58

5.5 椭圆滤波器 61

5.6 非平衡阻抗之间的匹配 62

5.7 小结 69

习题 69

参考文献 69

第6章 传输线变换器 70

6.1 概述 70

6.2 理想传输线变换器 70

6.3 传输线变换器综合 72

6.4 电学长传输线变换器 73

6.5 平衡-非平衡变换器 76

6.6 分配器和组合器 77

6.7 90° 耦合器 79

习题 82

参考文献	83	第 10 章 振荡器和谐波发生器	138
第 7 章 射频放大器中的噪声	84	10.1 振荡器基本原理	138
7.1 噪声源	84	10.2 反馈理论	138
7.2 热噪声	84	10.3 有外部反馈的双端口振荡器	139
7.3 散粒噪声	86	10.4 振荡器实例	141
7.4 噪声电路分析	87	10.5 对反射系数的最低要求	143
7.5 放大器噪声特征描述	87	10.6 共栅极 (共基极) 振荡器	144
7.6 噪声测量	88	10.7 振荡器的稳定性	146
7.7 有噪声的双端口网络	89	10.8 注频锁相振荡器	149
7.8 双端口噪声系数推导	90	10.9 振荡器相位噪声	150
7.9 晶体管的福井噪声模型	92	10.10 谐波发生器	153
习题	94	习题	156
参考文献	94	参考文献	156
第 8 章 A 类放大器	95	第 11 章 射频混频器	158
8.1 概述	95	11.1 非线性器件特性	158
8.2 增益的定义	95	11.2 混频器的品质因数	160
8.3 双端口变换器的功率增益	95	11.3 单端混频器	161
8.4 使用 S 参数表示的功率增益	96	11.4 单平衡混频器	162
8.5 同时匹配最大功率增益	98	11.5 双平衡混频器	163
8.6 稳定性	99	11.6 双平衡晶体管混频器	166
8.7 A 类功率放大器	105	11.7 伪频率响应	169
8.8 功率放大器的功率组合	106	11.8 单边带噪声系数和噪声温度	170
8.9 级联放大器的性能	107	11.9 典型混频器应用	172
8.10 最优增益和噪声的放大器 设计	108	11.10 小结	174
8.11 小结	110	习题	174
习题	110	参考文献	175
参考文献	110	第 12 章 锁相环	176
第 9 章 射频功率放大器	112	12.1 概述	176
9.1 晶体管结构	112	12.2 PLL 设计背景	176
9.2 B 类放大器	112	12.3 PLL 应用	176
9.3 C 类放大器	117	12.4 PLL 基础	177
9.4 C 类放大器的输入偏置电压	120	12.5 环路设计原则	177
9.5 D 类功率放大器	121	12.6 PLL 的线性分析	180
9.6 E 类功率放大器	125	12.7 PLL 的锁相过程	182
9.7 F 类功率放大器	130	12.8 PLL 的类型	183
9.8 前馈放大器	134	12.9 PLL 中的负反馈	184
9.9 小结	135	12.10 PLL 设计方程	185
习题	136	12.11 鉴相器类型	189
参考文献	136	12.12 设计实例	191

12.13 小结	193	附录 E 带有负载的晶体管端口的	
习题	194	终端	202
参考文献	194	附录 F 晶体管和放大器公式	205
附录 A 螺线管设计实例	195	附录 G 使用 SPICE 进行频域变换	
附录 B 螺旋电感解析模型	196	测量	208
附录 C 双调谐匹配电路实例	198	附录 H 对双平衡混频器的单频交调	
附录 D 双端口参数变换	199	失真抑制	217

第1章

信息传输技术

1.1 概述

射频(Radio Frequency, RF)电路的设计既借鉴了低频音频电路的设计方法,又借鉴了微波电路的设计方法,但是和音频和微波电路设计方法存在重要差异。因此,射频电路的设计需要使用在其他频率范围内不使用的一些特殊技术。在当前的应用中,射频的范围一般指 300MHz~3GHz。当前的多数无线电通信活动都在这个范围内发生。在此频率范围内,工程师必须关注辐射、杂散耦合和电路元件的频率响应,从集总(lumped)、低频分析的角度可以将这些电路元件看做是与频率无关的。同时,使用常规的微波电路元件(如 $1/4$ 波长变换器等)需要的线太长,因而不现实的。单片集成电路可以使用集总元件来实现高频电路设计,然而,仍需要仔细考虑这些“集总”元件的频率响应。在集成电路中,集总元件的尺寸很小,故能以集总元件的方式提供滤波器、变压器、耦合器等实用设计。因此,有关低噪声放大器、功率放大器、振荡器、混频器以及锁相环的设计讨论,将以集总元件和分布元件这两种方式来进行。在书中所给出的部分数值例子使用了计算机程序,其源代码可在网络上找到^①。最后,在进入电路设计细节之前,需要明确的是,射频电路的目的在于传输信息。

1.2 信息和容量

确切地讲,信息是什么?《兰登书屋词典》1966 是这样解释的:“信息”(information),是“与特定的事实或情形相关的被传送或接收的知识”。一个比较狭义的技术性定义与我们对“信息”的关注焦点更为一致:“信息是指可能选择的消息数,可以表示为选择数的单调函数,通常是以 2 为底的对数”。因此,“信息”这个术语指的是可以编码以用于数字处理的数据。

阐明信息含义的一些数据的例子是很有帮助的。如果通信信道中传送的信号是不变的,那么它没有传送任何信息。因此,要传送信息,必须要有变化发生。如果信号由“10101010...”组成,那么尽管这个信号存在变化,但是也没有包含任何信息,因为下一位可以准确预测。因此,虽然变化是很重要的,但是它并不是信息的唯一标准。最后再举一个例子。如果调幅系统中的信号只包含完全随机的电压波动,那么还是没有传送任何信息。这只是一个噪声信号,接收机收到这个信号以后也无法了解更多有意义的内容。

通信系统由发射机、接收机和信道(channel)组成。信道只能传送有限的信息。可以将信息信道比作水管,因为水管的直径有限,因此它只能传送一定量的水。用技术术语表示,这种限制称为“容量”(capacity)。它指的是在一个 T 秒时间段内传送的信息量。这个时间段可以进一步分为更短的时间段,每段持续时间为 τ 。显然,在总的时间段 T 内包含的独特的小时间段 τ 越多,可以传送的信息量也就越大。能够在多大程度上将一个时间段的脉冲信号与相邻时间段的脉冲信号区分开来,决定了 τ 的最小值。时间段的最短极限与信道的带宽有关。与水管类比,信道带宽相当于水管直径。

此外,信号电压的最大幅度受到可用的系统电源电压的限制。电压范围可以分为很多

^① <http://www-ee.uta.edu/online/adavis/rfsoftware>。

不同的电平，每个电平都代表一位信息，且各位之间相互区别。由于系统中总会存在噪声，因此电压的范围不能无限地分割。显然，在给定的时间段 τ 内可传送的电平数越多，系统的信息容量也就越大。正如水在水管中的流动受到水压、管壁的摩擦力和水管直径的限制一样，一个传输系统的容量受到最大的电平值、系统的噪声(它会使得系统中不同的电平变得混淆不清)以及信道带宽(与系统中信号脉冲的上升时间有关)的限制。

假设在一个时间段 τ 中，有 n 个电平。 τ 越小， n 越大，则信道能传送的信息量就越多。在每个时间段中有 n 个可能的电平值。在下一个时间段也有 n 个可能的电平值。假设在每个时间段中传送的电平和其他时间段的电平是相互独立的。那么，在总的时间 T 秒内能够传送的总的信息量等于在每个时间段内可能的电平数的乘积：

$$n \cdot n \cdot n \cdot n \cdot \cdots \cdot n = n^{T/\tau}$$

(1-1)

传输的信息总量 H 显然和总的时间跨度 T 成正比，并定义为以上乘积的对数值。习惯上，一般取以 2 为底的对数。

$$H = \frac{T}{\tau} \log_2 n$$

(1-2)

系统的容量就是在这个系统中最大的传输速度(rate of transmission)，以位/秒为单位：

$$C = \frac{H}{T} = \frac{1}{\tau} \log_2 n$$

(1-3)

系统容量与传送单位信息量所需的最小时间 τ 成反比。此外，随着可用电平数的增加，信息容量也随之增加。

信息可以以不同的形式在信道中传送，所有方式都能得到等量的信息。例如，假如一个信号在给定的时间 τ 内，可取 8 个不同的电平值 0, 1, ..., 7 中的任何一个。但是这 8 电平信号也可以仅使用两个不同的电平 0 和 1 来传送。然而，对每个使用 8 电平的时间段，传送二电平信号时，就需要占用 3 个时间段。一个简明的转换关系如表 1-1 所示。

显然，16 电平信号可以通过一个包含 4 个二进制信号的序列来传送，32 电平信号可以通过 5 个二进制信号序列来传送，依此类推。对 n 个不同的电平，需要有 $\log_2 n$ 个位。信号的信息量定义为需要传输的二进制选择(或位)的数量。一个系统如果设计为传输语音信号，那么它要具备传输语音中所包含信息的能力。尽管语音并不是人们交流和通信的全部内容，但是在通信系统中，它仍然是工程师必须要处理的对象。他们必须要决定以什么样的保真度来传送语音信号，这可转化为模拟系统的带宽需求问题，或一个给定的总电压范围内可用的电平数问题。即使采用复杂的编码技术，也仍然会存在这种限制，即系统的容量必须要大于或等于需要传送的信息速度。此外，还需要考虑系统成本、功率水平，以及可用的传输媒介等问题。

表 1-1 8 电平和二电平系统

$n = 8$	$n = 2$
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

1.3 相关状态

在前一节的定义中隐含着一个假设，即在每个时间段 τ 中的电平值与其他时间段中的电平值完全无关。然而，情况并不总是这样。一个简单的例子是英语语言的传送。我们都知道，在英语中，字母 e 的出现频率要远远高于字母 z。并且几乎可以肯定，字母 q 的后面是字母 u。因此，在用英语传输一个典型的信息时，发送的实际信息量要比字母表中每个字母出现机会均等情况下的信息量要小。可以利用概率的观点来说明这点。如果每个时间段都是彼此独立的，那么我们感兴趣的一个信息在 T 秒内可能出现的信号组合方式的总数为 $n^{T/\tau}$ 。平均而言，每一个可能的 T 秒长的信息出现的概率为 $1/n^{T/\tau}$ 。

概率可以用式(1-4)的形式来表示:

$$P = \frac{\text{一个特定事件的发生次数}}{\text{总的事件数}} \quad (1-4)$$

信息可以用概率来衡量, 如果 n 个不同的事件被指定为 n 个电平值, 并且每个事件发生的可能性是相同的, 那么概率为: $P = 1/n$ 。对于任何一个事件, 传输的信息记作 $H_1 = -P \log_2 P$ 。对 m 个时间段, 假设每个时间段为 τ 秒长, 那么总的信息量为 m 倍。因此, 对 m 个时间段, 使用概率表示的信息如式(1-5)所示:

$$H = \frac{T}{\tau} \log_2 n = -m \log_2 P \quad \text{位} \quad (1-5)$$

考虑一个二进制系统中, 数值 0 出现的概率为 p , 而数值 1 出现的概率为 q 。已知 $p+q=1$, 可以求得一个由 0 和 1 组成的消息的信息量。总的信息是 0 和 1 所携带的信息之和:

$$H = -\frac{T}{\tau} (p \log_2 p + q \log_2 q) \quad \text{位} \quad (1-6)$$

如果 p 和 q 发生的概率都是 0.5, 那么在 T 秒内的总信息量是 T/τ 。如果 p 和 q 的出现概率不等, 例如, $p=0.25$, $q=0.75$, 那么:

$$\begin{aligned} H &= -\frac{T}{\tau} (0.25 \log_2 0.25 + 0.75 \log_2 0.75) \quad \text{位} \\ H &= \frac{T}{\tau} (0.5 + 0.3113) = 0.8113 \frac{T}{\tau} \quad \text{位} \end{aligned} \quad (1-7)$$

因此, 一个预期事件发生的概率越大, 它所包含的信息量就越少。当 p 接近于 1 且 q 接近于 0 时, 概率为 p 的几乎肯定要发生的事件的信息量为零。信息量最大的情况出现在 $p=q=0.5$ 的情况下。

可以将上述情况推广到在给定的信号时间段 τ 内具有 n 个信号电平的情形。假设这 n 个信号电平中的任一个信号电平 s_i 的发生概率为 P_i , 并且有如下关系:

$$P_1 + P_2 + \cdots + P_n = \sum P_i = 1 \quad (1-8)$$

进一步假设找到一个给定的信号电平的概率与其相邻的信号电平值无关, 那么在 T/τ 个时间段或 T 秒内的总信息量为:

$$H = -\frac{T}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i \quad \text{位} \quad (1-9)$$

传输这么多信息量所需要的系统容量为:

$$C = -\frac{1}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i \quad \text{位/秒} \quad (1-10)$$

当每种信号电平出现的概率相同时, 即: $P_1 = P_2 = P_3 = \cdots = P_n = 1/n$, 则对 n 电平信号, 有:

$$H = -\frac{T}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i = \frac{T}{\tau} \log_2 n \quad \text{位} \quad (1-11)$$

关于信息传输的更多细节可以参考其他文献, 例如 Schwartz 著作^[1]中的简要介绍。总体来讲, 本书中所讨论的射频电路设计, 关注的重点是在发射机和接收机中使用的基本的硬件设计。通信工程师感兴趣的其他课题, 如数字信号处理芯片的编程、调制方案、电磁传播问题等, 在相关领域内的专门教材中有更为详尽的讨论。在本书中, 这些内容只是在阐明系统实现方法时才有所涉及。

1.4 基本发射机-接收机结构

在一个典型的通信系统中, 既有模拟射频设计, 也有数字设计。数字信号处理在一些系统中与先进射频电路设计一样起着重要作用。图 1-1 给出了一个典型的超外差式无线电

发射机与接收机系统框图。一个实际系统会在成本、抗干扰能力、衰落、可用带宽、带宽效率(在给定的带宽内每赫兹通过的数据速率)、功耗效率(衡量一个系统在低功耗工作条件下保存消息的能力)、交调项以及邻带干扰等之间进行优化。图 1-1 中所示的调制器和解调器，所表征的是一个大规模的、通常使用数字技术的设计选项。显然，图 1-1 所示的电路只是实际发射机和接收机的一个结构概略图。

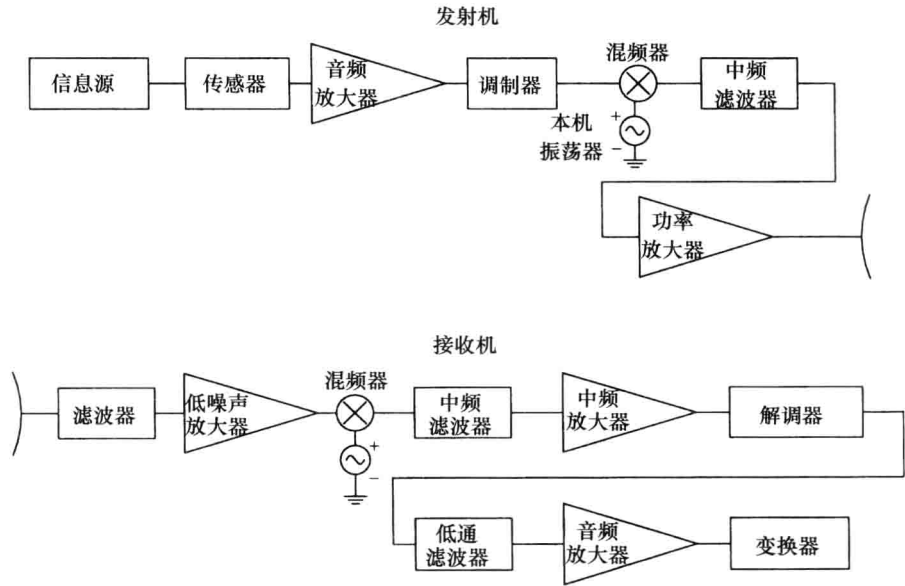


图 1-1 通信发射机和接收机的框图

图 1-1 中，发射机以某种信源为起点，信源可以是声音或者一幅可见图像。接着，传感器将其转换为电信号。该信号在进入调制器之前，可能需要一个放大操作。调制器将信息进行编码，且编码的方式必须和解调器兼容。调制器要么是模拟的要么是数字的，且形式多样。它以一定的方式对消息进行编码，以满足通信信道和接收机的要求。例如，若发射一个视频信号，则此信号须承载诸如扫描时间、强度，通常还有颜色和实际情报等信息。常用的模拟调制技术有幅度调制 (Amplitude Modulation, AM)、频率调制 (Frequency Modulation, FM) 和相位调制 (Phase Modulation, PM)，分别通过改变幅度、频率和相位的方式对载波波形进行编码。多个信号可以共享同一个信道，比如频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 中在不同的频率上，或者时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 中在不同的时隙中，或者码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA) 中在不同的数字码上。

混频器电路是本次讨论中第一个进入射频范围的元件，它主要提供两种必要功能，第一，抬升 AM 和 FM 系统中的载波频率，使之与相邻发射机相区别；第二，将消息信息转移到一个高得多的频率，可令天线缩小到一个合理的尺寸 (天线机械尺寸通常相当于信号波长)。尽管在制作电气小天线方面已经投入了大量的努力，但总是存在设计上的妥协。第 11 章将专门介绍混频器。

伴随混频器的是一个本地振荡器，它可以固定在一个频率 (比如在广播站中)，也可以仔细调谐到不同的频率上。一个振荡器的质量，在于其相位噪声有多低，或者其频率随时间、温度和老化的漂移有多大。振荡器可以设计成手动调谐或电调谐。稳定振荡器的技术包括使用高 Q 值元件，比如石英晶体和介质谐振器，或者采用恒温箱。也可以通过锁相环，用一个稳定的低频振荡器来稳定高频频率。第 10 章和第 12 章将分别讲述振荡器和锁

相环的设计。

后面的滤波器是必需的。它可以滤除混频器非线性相乘处理中产生的一些不想要的频率成分。同时,还可以给混频器和后续的放大器提供合适的阻抗值以实现阻抗匹配。射频滤波器和变压器是第3、5和6章的主题,相关内容也用在第8和9章放大器的设计中。

功率放大器是发射机在到达天线之前的最后一级。由于这个模块功耗最大,因此保持高效率是很重要的。在FM系统中,通常采用效率高达70%的C类放大器。而对于AM系统,考虑的AM信号传输有较高的线性度要求,通常采用A类或B类放大器。然而,A类放大器的典型效率只有30%~40%。在传输数字调制信号时,考虑到尽量减小同道干扰的需要,功率放大器的线性将变得非常重要。在所有情况中,当将放大器设计成最大功率传输时,其输出阻抗与负载阻抗共轭匹配,这意味着一半的功率耗散在晶体管本身上。对于内部输出阻抗相对于外部负载比较小的情形,功率放大器必须设计成最大效率。

接收机通常比发射机复杂得多。它的目标是解开来自发射机的信号,但是这个信号在通过信道后,已经增加了一些噪声和其他干扰。如果接收到的信号足够强,它就可直接送给混频器。然而,正如后续章节所要讨论的,在前端采用一个低噪声的放大器,可以极大地增强接收机的总体噪声响应。第8章将详细描述低噪声放大器的设计。

1.5 有源器件技术

第一个射频电真空器件出现在20世纪30年代,而且,它仍然使用在今天的一些最可靠、最高效的高功率放大器(功率高达30MW)中。正如无处不在的微波炉所表明的,这些器件在近期内也将继续使用。新器件设计和新材料将继续提高使用在放大器和振荡器中的真空管的质量。

固态器件登上射频舞台始于两端二极管,它们使用在参量放大器中,包括甘恩二极管、碰撞雪崩渡越时间(IMPATT)二极管、俘获等离子体雪崩触发渡越时间(TRAPATT)二极管、隧道二极管,甚至pn结(变容二极管)。不久之后,三端的砷化镓金属半导体场效应晶体管(MESFET)在大多数应用中代替了二极管。尽管MESFET的噪声系数不如参量放大器,功率不如IMPATT(在当时),但它胜在稳定性和效率上。而且,它的噪声水平对于很多实际应用来说已经足够低了。后续出现的器件是铝镓砷/砷化镓异质结双极型晶体管(HBT)和高电子迁移率晶体管(HEMT),全部基于砷化镓或其他的Ⅲ-V族材料。这些类型的器件在各种高功率、高频率的应用中至今仍提供最好的性能。对于高功率射频应用,工程师开始利用氮化镓和碳化硅材料。氮化镓宽带隙(3.4eV),以及这些材料的高击穿电压、高漂移速度和高热导率,使得它们对于高功率异质结场效应晶体管(HFET)器件来说是有吸引力的。尽管氮化镓器件的自加热和高闪烁噪声一直是个问题,但针对其闪烁噪声问题已经有了一些解决方案。

然而,世界是由硅制成的。硅的优势在于,它比砷化镓的制造成本低,它有好的热导率,而且最重要的是,它有一个根深蒂固的制造业基础设施。硅不久就超越了它的前任——锗。互补金属-氧化物半导体(CMOS)技术,由于具有在一个小的面积中集成大量晶体管的能力,在短短几年中就在数字电路中得到青睐。在同一个芯片上集成数字和模拟应用,以及提供相对于砷化镓器件而言更低的成本,这些愿望催生了人们对射频CMOS设计的兴趣。小栅长高速CMOS器件制造方面的进展提供了使用CMOS工艺制作射频器件的能力。然而,混合信号设计要求在厄利电压(Early voltage)方面有所牺牲,而厄利电压在很多模拟电路中是比较重要的。横向扩散金属氧化物半导体(LDMOS)已经在功率放大器中使用,较高的增益、线性和可靠性使得它们成为很多蜂窝基站应用的最好选择。最近,人们发现锗硅异质结双极型晶体管(SiGe-HBT)较之CMOS有很多优势,包括更优的

闪烁噪声、宽带噪声、厄利电压、跨导，以及更好的 V_{be} 可跟踪性（相对于 MOSFET 的 V_t ）。SiGe HBT 的线性尽管不如 CMOS 器件，但也是相当不错的。

总之，对于模拟射频设计者来说，有各种各样的器件可用，并且有与之相关的各种专门处理和电路设计技术。后续章节的目标是提供基本的电路设计技术，这些技术可用于各种有源器件。

习题

- 1.1 通过一个最大容量为 25×10^3 位/秒的信道传送脉冲序列，这个脉冲序列有 16 个信号电平。
 - (a) 脉冲宽度是多少？
 - (b) 如果脉冲宽度加倍，并通过相同信道送回，那么需要的电平数是多少？
- 1.2 一个系统能以 0、1、2、3、4、5 这六个不同的电平发送信号，每个电平持续 1ms，这 6 个电平对应的概率分别为 1/8、1/8、1/16、1/4、3/8、1/16，且每一个脉冲的值独立于任何以前的脉冲值，那么 1s 中所能传输的信息总量是多少？

参考文献

1. M. Schwartz, *Information Transmission, Modulation, and Noise*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, Chapter 1, 1980.

2.1 概述

与低频设计相比,通常在射频设计中无源电路元件的模型会更复杂。在高频电路设计中,简单的电阻器、电容器或电感器不能再视为单纯的电阻、电容或电感元件。通常,“集总”元件最好能够以这些单纯元件组合的形式来建模。此外,当元件的尺寸在电路媒介中大于 0.1 倍的波长时,其等效电路应包括传输线。

2.2 电阻器

集成电路中的电阻器可以分为以下 3 种类型:半导体膜;淀积的金属膜;金属陶瓷(cermet, 金属和介质材料的混合物)。在这些类型的电阻器中,只有前两种广泛应用于高频电路中。半导体膜可以通过向半绝缘的衬底上进行扩散、淀积多晶硅层或向指定的区域内进行杂质的离子注入等方法制备。多晶硅(polysilcon, 或 polycrystalline silicon)由很多晶向随机的微小的亚微米硅晶体组成。

2.2.1 电阻器类型

集成电阻的阻值取决于电流流经通道的电导率。对半导体衬底上的扩散电阻,电导率是掺杂浓度和载流子迁移率的函数。电导率为:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2-1)$$

它通常以 $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 为单位来表示。在这个表达式中, q 是电子电荷($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$), μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$), n 和 p 分别是可用于传导电流的自由电子和空穴的数目(cm^{-3})。在室温下,可以假设半导体中所有的杂质原子都已经离子化。这意味着对 n 型半导体来说,可用的电子数和施主杂质的浓度相同:

$$n_n \approx N_D \quad (2-2)$$

同样地,对 p 型半导体而言,空穴的数量和受主杂质的浓度相同:

$$p_p \approx N_A \quad (2-3)$$

在 n 型或 p 型半导体中,电子浓度与空穴浓度的关系为:

$$np = n_i^2 \quad (2-4)$$

在上式中, n_i 的值对硅来说是 $1.45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 对砷化镓来说是 $9.0 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ 。这称为质量作用定律(mass action law)。因此,对于 n 型半导体,其电导率为:

$$\sigma = q\left(\mu_n N_D + \mu_p \frac{n_i^2}{N_D}\right) \approx q\mu_n N_D \quad (2-5)$$

典型地,在集成电路中,更倾向于使用 n 沟道 FET 和 npn 型双极型晶体管,因为电子的迁移率要比空穴的迁移率大得多。在电路设计中,需要的总工艺步骤数通常决定了电阻沟道类型的选择。

理想情况下,电导率为 σ 的扩散电阻器可由如图 2-1 所示的矩形块表示。矩形块的电阻值为:

$$R = \frac{L}{\sigma WT} \quad (2-6)$$

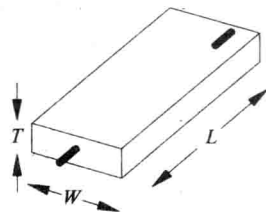


图 2-1 长度为 L , 宽度为 W , 高度为 T 的扩散电阻