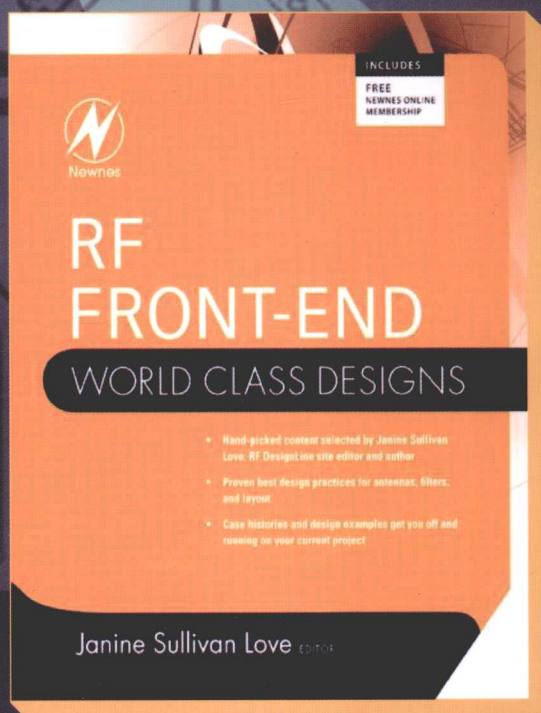


RF权威指南

RF Front-End World Class Designs

[美] Janine Sullivan Love 编著
李中华 译



RF前端世界级设计精华遴选

- 天线、滤波器及布局的最佳设计方案
- 一册在手，给硬件设计师带来无尽灵感

013038107

TN911.23
58



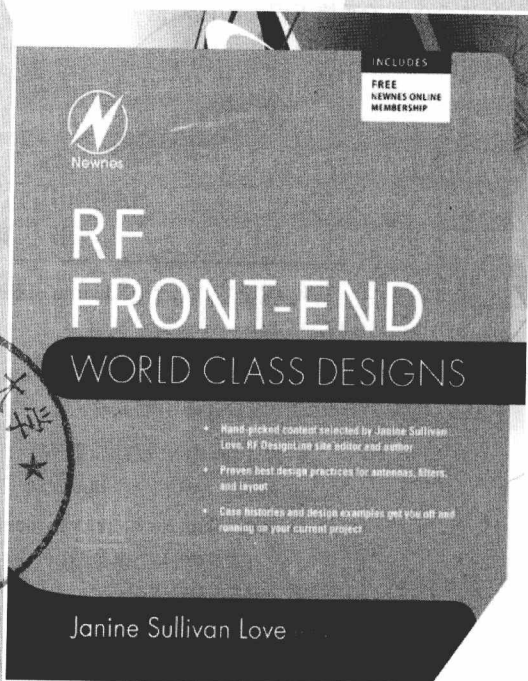
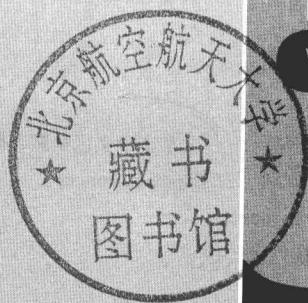
图灵电子与电气工程丛书

RF权威指南

RF Front-End

World Class Designs

[美] Janine Sullivan Love 编著
李中华 译



北航

C1644012

人民邮电出版社
北京

TN911.23
58

791280510

图书在版编目(CIP)数据

RF权威指南 / (美) 洛夫 (Love, J. S.) 编著 ; 李中华
译. — 北京 : 人民邮电出版社, 2013.6
(图灵电子与电气工程丛书)
书名原文: RF Front-End: World Class Designs
ISBN 978-7-115-30062-1

I. ①R… II. ①洛… ②李… III. ①无线电信号—射
频—信号识别—指南 IV. ①TN911.23-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第282337号

内 容 提 要

本书是目前最实用的射频技术类图书的精华集粹, 内容由浅入深, 包括无线电发射基本知识、RF 功率放大器、PA 设计基础知识、RF/IF 电路、滤波器和阻抗匹配等。本书结构清晰, 示例丰富, 实用性强。本书适合电子通信工程师阅读, 也可作为高等院校相关专业师生的参考指南。

图灵电子与电气工程丛书

RF权威指南

-
- ◆ 编著 [美] Janine Sullivan Love
 - 译 李中华
 - 责任编辑 朱 巍
 - 执行编辑 罗词亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 20.75
 - 字数: 545千字 2013年6月第1版
 - 印数: 1-3 000册 2013年6月河北第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2010-4015号

ISBN 978-7-115-30062-1

定价: 59.00元

读者服务热线: (010)51095186转604 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

版 权 声 明

RF Front-End: World Class Designs by Janine Sullivan Love

ISBN: 978-1-85617-622-4 .

Copyright © 2009 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2013 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved.

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan Province. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权人民邮电出版社在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

撰稿人简介

Cheryl Ajluni (第2章和第13章)是一位特约编辑和自由职业技术作家,专门为互联网、出版物、展览会和各种高科技公司提供技术内容。她每月都会编写无线技术方面的电子快讯(e-newsletter),定期主持技术网络研讨会,还制作一系列与移动技术相关主题的播客。

John Blyler (第2章和第13章)是 *Wireless Systems Design* 杂志的一名高级编辑, *RF Circuit Design* 一书的合著者。

Christopher Bowick (第2章和第13章)在2000年被任命为Cox通信公司的高级工程副总裁和首席技术官。Bowick先生负责战略技术开发以及日常的技术支持和网络运维。Bowick于1998年加入Cox公司,担任技术开发部副总裁一职。在加入Cox公司之前,他担任Jones Intercable公司的集团技术副总裁和首席技术官。他还担任Scientific Atlanta公司传输系统业务部工程副总裁和罗克韦尔国际公司的设计工程师。

Joe Carr (第6章和第12章)是 *RF Components and Circuits* 的作者。曾担任美国国防部的电子工程师(航空电子)以及Newnes和Prompt出版公司的主要电子学作者。在职业生涯中,已故的Joe Carr是世界上电子学与无线电领域的主要作者之一,是RF系统设计与使用方面的权威。

Farid Dowla (第2章和第13章)先后获得麻省理工学院电气工程专业学士学位、硕士学位和博士学位。在1985年获得博士学位之后不久,他加入了Lawrence Livermore国家实验室。他的研究方向包括自适应滤波器、信号处理、无线通信系统和RF/移动通信。他目前领导着一个研究团队,专门研究超宽带RF雷达和通信系统。Dowla还是加州大学戴维斯分校电气工程专业的兼职副教授。他是IEEE(美国电气电子工程师协会)和Sigma Xi科学协会的会员。他拥有3项信号处理领域的专利,为美国国防部撰写了一本关于神经网络的书,主编了一本关于地球物理学信号处理的书。他在许多IEEE和专业期刊上发表学术论文,是许多专业会议论坛的积极参与者。

Michael Finneran (第3章)是一位独立顾问和行业分析师,专门从事无线技术、移动统一通信和固定与移动融合通信。他在网络领域工作30余年,拥有丰富的经验,是该领域公认的专家。他最近出版了他的第一本书 *Voice Over Wireless LANs: The Complete Guide* (基于无线局域网的语音通信:完全指南)(Elsevier, 2008),不过,他的专长涵盖了无线技术的方方面面,包括Wi-Fi、3G/4G蜂窝、WiMAX和RFID。

Andrei Grebennikov (第7章)于1980年获得莫斯科物理技术学院无线电电子学专业工学硕士,并于1991年获得莫斯科通信与信息技术大学无线电工程专业博士学位。他作为一名工程师、研究员、讲师和教师,在莫斯科通信与信息技术大学(俄罗斯)、微电子研究院(新加坡)、M/A-COM公司(爱尔兰)、英飞凌科技公司(德国/奥地利)和贝尔实验室(爱尔兰)积累了长期的学术和行业工作经验。他作为客座教授在林茨大学(奥地利)讲学,受邀在国际微波学术研讨会、欧洲和亚太微波会议和摩托罗拉设计中心(马来西亚)进行短期授课和辅导。此外,他还发表了学术论文70余篇,拥有10多项欧洲和美国专利及专利申请,并出版了数本关于RF

和微波功率放大器和振荡器设计的书籍。

Ian Hickman (第4章和第8章)自20世纪40年代后期起就一直关注电子学,1954年开始进行专业研究。他从晶体管收音机开始着手,多年来研究兴趣涵盖了电子学的各个方面,不过主要集中在模拟电路。在退休前,Ian曾是*Electronics World*杂志多年的顾问。他是IET(英国工程技术协会)的会员,也是IEEE的终身会员。他还撰写了几本书,包括*Practical RF Handbook*、*Hickman's Analog and RF Circuits*和*Analog Circuits Cookbook*等。

Leo G. Maloratsky (第10章)分别于1962年和1967年获得莫斯科航空学院电机工程专业硕士学位和莫斯科通信学院博士学位。自1962年以来,他一直在波兰的Electrotechnical Institute(电子技术研究所)从事RF和微波集成电路的研究、开发和生产工作,是莫斯科无线电电子学研究所的助理教授。从1992年到1997年,他在联合信号(Allied Signal)公司担任主任工程师。从1997年到2008年,他在罗克韦尔柯林斯公司担任首席工程师,专门从事用于航空电子系统的RF和微波集成电路研究。2008年起,他加入航天电子公司。此外,他还编写了4本专著、1本教材,发表50余篇论文,拥有20项专利。他最新的书*Passive RF and Microwave Integrated Circuits*于2003年由Elsevier出版社出版。他被列入*Who is Who in the World*、*Who is Who in America*和*2000 Outstanding Scientists*等百科全书。

Peter Okrah (第5章和第14章)是通用动力公司(General Dynamics)C4 Systems部门的技术组工程师,专门为国防和政府客户开发高级通信技术。他于1992年获得斯坦福大学电气工程专业博士学位。在加盟通用动力公司之前,他在摩托罗拉公司工作了近10年。

Leonard Pelletier(第5章)是*Handbook of RF and Wireless Technologies*一书的撰稿人之一。

Ian Poole(第1章)是一位著名的电子工程顾问,具有丰富的通信和移动市场方面的经验。他编写了大量关于无线电和电子学的书籍,在英国和全球许多杂志上发表过文章。他曾因技术写作而获得ARRL(美国无线电中继联盟)首届Bill Orr奖。

Nathan Sokal(第7章)因在高效率的开关型电源转换和开关型RF功率放大器领域作出的杰出贡献于1989年当选为IEEE院士。2007年,他因在E类RF功率放大器开发方面的重大而持久的贡献得到认可,获得了IEEE微波理论技术会的微波先锋奖。早在1965年,他创办了Design Automation公司,专门为设备制造客户提供电子设计评审、产品设计以及那些极端疑难问题的解决方案。主要工作集中在频率高达2.5 GHz的高效率开关型RF功率放大器和开关型DC-DC电源转换器。他拥有8项功率电子方面的专利,作为作者或合著者出版了2本书,发表了约130篇技术论文(主要方向为RF电源和直流电源的高效率产生)。他是ARRL在RF功率放大器和直流电源方面的技术顾问,也是电磁学协会、电气工程荣誉学会(Eta Kappa Nu)和Sigma Xi荣誉专业协会的会员。

Steve Winder(第11章)现在是超科(Supertex)公司的欧洲现场应用工程师。超科公司是一家美国的高电压MOSFET和CMOS集成电路制造商。Steve居住在英国,与欧洲各国的设计工程师一道,采用超科公司制造的元件设计电路。在2002年加入超科公司之前,Steve在英国电信公司研究实验室担任了多年的团队领导。在那里,他为宽带传输系统(主要是高频)设计了模拟电路,还设计了许多有源和无源滤波器。Steve已经出版了许多关于电信、运算放大器、LED驱动器和滤波器设计的书籍。他拥有物理学和数学的荣誉学士学位以及通信领域的硕士学位。他还是总部位于英国的IET(原IEE)的注册工程师和会员。

Hank Zumbahlen(第9章)现供职于美国模拟器件公司。他是*Linear Circuit Design Handbook*的作者。

关于编著者

Janine Sullivan Love 有着超过 17 年的专业写作经验。她是一个自由撰稿人，曾担任许多行业出版物的特约编辑或专职编辑，这包括 EETimes、Microwaves & RF、Wireless Systems Design、Communication Systems Design、Wireless Design Online、RF Globalnet、eeProduct Center、Communications Products 和 Global Telephony。她曾担任 RF DesignLine 自 2006 年成立以来的网站编辑。Janine 还担任营销传播与技术写作方面的内部职位。目前，她为许多专业领域提供技术写作和编辑服务，如软件、设计、芯片、模块、内存、光学工程、网络管理和系统。作为国家科学作家协会的一名会员，她拥有 University of Delaware 学士学位和 Duquesne University 的硕士学位。

前言

13 年前，当我加入这个行业时，我们正致力于将业务机会从军事通信转向商业通信领域。我最早使用的蜂窝电话，以今天的标准来看，是个庞然大物，但它却是当时摩托罗拉公司最新推出的带抽出天线的翻盖手机。在紧急情况下，我可以很容易地把它放到我的手套里。在那时，这是我们大多数人使用蜂窝电话的情形，而且每分钟的电讯资费大约是 1 美元。

随着业务模式的改进，技术也在进步。无线通信设备的数量之所以能够急剧增加，是因为它们的体积越来越小、功能越来越强大、使用成本越来越低。今天，通信市场的大多数成功，可以归因于工程师们多年来在使“它”更小、更快、更便宜方面所作的努力。这些努力有很大部分是关于集成的，我至今还没有发现有跟 RF 前端集成一样有趣的事情。将天线和中频（IF）之间的每个环节合并，集成的 RF 前端对于今天的设计来说是不可或缺的。无论是用作主要的通信设施还是范围增强器，这种器件对于许多应用的出色设计是至关重要的，如手机、Wi-Fi、WiMAX、蓝牙和 ZigBee。它可以是一个集成电路或模块，但是集成 RF 前端成功的秘诀在于，它在芯片内保有一种“RF 魔力”，使得系统设计人员能够轻松应对寄生效应、调谐和匹配等设计困难。本质上，RF 信号通过天线接收，并通过前端传递给数字电路，用于操作控制。

在多年的编辑和自由撰稿生涯里，我没有发现有哪个主题能与 RF 前端的流行度相媲美。因此，当有人邀请我选编一本关于 RF 的书时，RF 前端成了我的必然之选。我常常在想，RF 工程师懂得魔术，能够“从帽子里变出兔子来”。今天 RF 前端的美妙之处在于，很少有人理解“兔子是如何钻进帽子的”，但他们很清楚下一步怎么做。我希望读者能喜欢这本书。Elsevier 出版社的子品牌 Newnes 出版公司出版了许多关于这一迷人主题的好书，我竭尽所能，从中遴选出精华。

Janine Sullivan Love

欢迎加入

图灵社区 ituring.com.cn

——最前沿的IT类电子书发售平台

电子出版的时代已经来临。在许多出版界同行还在犹豫彷徨的时候，图灵社区已经采取实际行动拥抱这个出版业巨变。作为国内第一家发售电子图书的IT类出版商，图灵社区目前为读者提供两种DRM-free的阅读体验：在线阅读和PDF。

相比纸质书，电子书具有许多明显的优势。它不仅发布快，更新容易，而且尽可能采用了彩色图片（即使有的书纸质版是黑白印刷的）。读者还可以方便地进行搜索、剪贴、复制和打印。

图灵社区进一步把传统出版流程与电子书出版业务紧密结合，目前已实现作译者网上交稿、编辑网上审稿、按章发布的电子出版模式。这种新的出版模式，我们称之为“敏捷出版”，它可以让读者以较快的速度了解到国外最新技术图书的内容，弥补以往翻译版技术书“出版即过时”的缺憾。同时，敏捷出版使得作、译、编、读的交流更为方便，可以提前消灭书稿中的错误，最大程度地保证图书出版的质量。

优惠提示：现在购买电子书，读者将获赠书款20%的社区银子，可用于兑换纸质样书。

——最方便的开放出版平台

图灵社区向读者开放在线写作功能，协助你实现自出版和开源出版的梦想。利用“合集”功能，你就能联合二三好友共同创作一部技术参考书，以免费或收费的形式提供给读者。（收费形式须经过图灵社区立项评审。）这极大地降低了出版的门槛。只要有写作的意愿，图灵社区就能帮助你实现这个梦想。成熟的书稿，有机会入选出版计划，同时出版纸质书。

图灵社区引进出版的外文图书，都将在立项后马上在社区公布。如果你有意翻译哪本图书，欢迎你来社区申请。只要你通过试译的考验，即可签约成为图灵的译者。当然，要想成功地完成一本书的翻译工作，是需要有坚强的毅力的。

——最直接的读者交流平台

在图灵社区，你可以十分方便地写作文章、提交勘误、发表评论，以各种方式与作译者、编辑人员和其他读者进行交流互动。提交勘误还能够获赠社区银子。

你可以积极参与社区经常开展的访谈、乐译、评选等多种活动，赢取积分和银子，积累个人声望。



北航

C1644012

目 录

第1章 无线电波和传播	1	2.2.4 超外差接收机	31
1.1 电场	1	2.2.5 前端放大器	37
1.2 磁场	2	2.2.6 选择性	38
1.3 无线电波	3	2.3 模数转换器对RF前端设计的影响	39
1.4 频率到波长的转换	4	2.4 软件无线电	40
1.5 无线电频谱	5	2.5 案例分析——现代通信接收机	40
1.6 极化	6	第3章 WLAN无线电传输基本原理	45
1.7 无线电信号是如何传播的	6	3.1 传输能力和吞吐量的定义	45
1.8 折射、反射和衍射	7	3.2 带宽、无线电和香农定理	46
1.9 反射信号	9	3.2.1 带宽是个模拟测度	46
1.10 地面以上的大气层	10	3.2.2 数字设备的带宽	46
1.11 地波	13	3.2.3 香农定理:带宽和噪声	47
1.12 天波	13	3.2.4 关系	47
1.13 传播距离和辐射角	15	3.3 带宽效率	47
1.14 多次反射	16	3.3.1 自适应调制	48
1.15 临界频率	17	3.3.2 效率与健壮性的权衡	49
1.16 MUF	17	3.4 前向纠错	49
1.17 LUF	17	3.4.1 802.11a和802.11g卷积编码	49
1.18 跳跃区	18	3.4.2 FEC开销:3/4编码和1/2编	49
1.19 电离层状态	18	码	49
1.20 衰落	18	3.4.3 其他FEC技术	49
1.21 电离层扰动	19	3.5 无线电法规	50
1.22 VLF信号的传播	20	3.5.1 美国联邦通信委员会	50
1.23 VHF及以上的信号	20	(1934)	50
1.24 更远的传播距离	20	3.5.2 ITU-R	50
1.25 对流层散射	21	3.6 许可的和无需许可的无线电频谱	50
1.26 分散E层	21	3.6.1 主要的许可频段	50
1.27 流星散射	22	3.6.2 美国无需许可的频段:ISM和	51
1.28 3 GHz以上的信号	23	U-NII频段	51
第2章 RF前端设计	24	3.6.3 WLAN频谱	51
2.1 更高的集成度	25	3.7 其他国家的无需许可频段	52
2.2 接收机基本结构	26	3.7.1 欧盟5 GHz频段频谱	52
2.2.1 AM检波接收机	27	3.7.2 国际上5 GHz频段的频谱	52
2.2.2 TRF接收机	29	3.8 无线通信中存在的普遍难题	53
2.2.3 直接转换接收机	30	3.8.1 距离和路径损耗	53

3.8.2 信号频率	53	6.8 JFET预选器	87
3.8.3 环境障碍物	53	6.9 VHF接收机预选器	89
3.8.4 楼层间的传输	54	6.10 MOSFET预选器	90
3.8.5 多径和码间干扰	54	6.11 电压可调接收机预选器	92
3.8.6 同信道干扰	55	6.12 用于VLF、LF和AM BCB的宽带 RF前置放大器	93
3.8.7 多普勒效应	55	6.13 推挽式RF放大器	94
3.8.8 其他环境因素	55	6.13.1 推挽式放大器的类型	94
3.9 802.11 WLAN的基本特征	56	6.13.2 实际电路细节	95
3.10 总结	56	6.14 宽带 RF放大器 (50 Ω 输入和输出)	98
第4章 高级结构	58	第7章 PA设计基础	100
参考文献	66	7.1 谱域分析	100
第5章 RF功率放大器	67	7.2 基本的工作类型: A、AB、B和C	104
5.1 功率放大器的工作方式	67	7.3 有源器件模型	110
5.1.1 A类放大器的工作方式	67	7.4 高频导通角	113
5.1.2 B类放大器的工作方式	68	7.5 集电极电容的非线性效应	118
5.1.3 AB类放大器的工作方式	70	7.6 推挽功率放大器	120
5.1.4 C类放大器的工作方式	70	7.7 功率增益和稳定性	123
5.1.5 各类滤波器的使用	71	7.8 参数振荡	131
5.1.6 IMD简介	71	参考文献	134
5.1.7 A类放大器性能	72	第8章 功率放大器	136
5.1.8 A类偏置电路	73	8.1 需要考虑的安全因素	136
5.1.9 A类放大器的限制	74	8.1.1 氧化铍	136
5.1.10 B类放大器的性能	75	8.1.2 高温	136
5.1.11 AB类放大器的性能	76	8.1.3 高RF电压	136
5.1.12 AB类偏置电路	77	8.2 最初的设计决策	137
5.1.13 C类放大器的性能	78	8.3 调平器、VSWRP和RF路径开关	137
5.1.14 放大器类型小结	79	8.4 开始设计	137
5.2 结论	79	8.5 低通滤波器设计	138
参考文献	80	8.5.1 切比雪夫滤波器	138
第6章 RF放大器	81	8.5.2 椭圆滤波器	138
6.1 噪声和预选器/前置放大器	82	8.5.3 电容器的选择	139
6.2 放大器配置	82	8.5.4 电感器的选择	139
6.3 晶体管增益	82	8.6 离散PA	140
6.4 基于公共元件的分类	83	8.6.1 输出匹配方法	140
6.4.1 共发射极电路	84	8.6.2 最大集电极/漏极电压	141
6.4.2 共集电极电路	84	8.6.3 最大集电极/漏极电流	141
6.4.3 共基极电路	84	8.6.4 集电极/漏极效率	142
6.5 晶体管偏置	85	8.6.5 功率晶体管的封装	142
6.5.1 集电极—基极偏置	85	8.6.6 增益期望	144
6.5.2 发射极偏置或“自偏置”	86	8.6.7 散热设计和散热片	144
6.6 频率特性	86	8.6.8 偏置	145
6.7 JFET和MOSFET连接	86	8.6.9 反馈元件的选择	148

8.6.10 输入匹配	150	10.2 滤波器合成	204
8.6.11 稳定性考虑	153	10.3 LPF	204
8.6.12 布局考虑	153	10.3.1 阶梯阻抗 LPF	204
8.6.13 结构技巧	154	10.3.2 集总元件 LPF	207
8.6.14 性能测量	154	10.3.3 不规则线 LPF	208
参考文献	156	10.4 BPF	210
第 9 章 RF/IF 电路	157	10.4.1 集成综合指数	210
9.1 混合器	158	10.4.2 平行耦合线 BPF	212
9.1.1 理想混合器	158	10.4.3 波形耦合线BPF: 有用的 “锯齿”	214
9.1.2 二极管环混合器	160	10.4.4 末端耦合BPF	216
9.1.3 有源混合器的基本操作	162	10.4.5 交指型BPF	217
9.2 调制器	163	10.4.6 梳状BPF	218
9.3 模拟乘法器	163	10.4.7 U型BPF	220
9.4 对数放大器	168	参考文献	221
9.5 Tru-Power检测器	173	第 11 章 将传输线和 PCB 用作滤 波器	223
9.6 VGA	175	11.1 传输线滤波器	223
9.6.1 电压控制放大器	175	11.2 开路线	224
9.6.2 X-AMP	176	11.3 短路线	225
9.6.3 数字控制VGA	179	11.4 非终端线的使用	225
9.7 直接数字合成	179	11.5 印刷电路滤波器	229
9.7.1 DDS	179	11.6 带通滤波器	231
9.7.2 DDS系统的混叠	182	参考文献	231
9.7.3 将DDS系统用作ADC时钟驱 动器	183	第 12 章 调谐与匹配	232
9.7.4 DDS系统中的AM	183	12.1 RF电路的矢量表示	232
9.7.5 DDS系统的不失真动态范围 考虑	184	12.2 LC谐振储能电路	235
9.8 PLL	185	12.2.1 串联谐振电路	236
9.8.1 PLL合成器的基本构建模块	187	12.2.2 并联谐振电路	237
9.8.2 参考计数器	188	12.3 调谐RF/IF变压器	238
9.8.3 反馈计数器	189	12.4 RF/IF变压器的构造	238
9.8.4 小数分频锁相环	191	12.5 RF/IF 变压器的带宽	240
9.8.5 振荡器系统的噪声	192	12.6 挑选LC谐振回路的元件值	242
9.8.6 VCO的相位噪声	192	12.7 追踪问题	244
9.8.7 利林方程	193	12.8 RF放大器/天线调节问题	244
9.8.8 闭合回路	194	12.9 本地振荡器问题	246
9.8.9 相位噪声测量	196	12.10 微调电容的方法	246
9.8.10 参考杂散	197	12.11 RF电路的阻抗匹配	247
9.8.11 CP 泄漏电流	199	12.12 变压器匹配	248
参考文献	199	12.13 谐振变压器	248
第 10 章 滤波器	202	12.14 谐振网络	250
10.1 分类	202	12.15 相反L网络	250

12.16 π 网络	251	13.8 软件设计工具	290
12.17 分离电容网络	251	13.8.1 史密斯图设计工具	291
12.18 晶体管—晶体管阻抗匹配	252	13.8.2 集成设计工具	297
第 13 章 阻抗匹配	254	13.9 小结	302
13.1 背景	254	第 14 章 RF 功率放大器线性化技术	303
13.2 L型网络	256	14.1 RF放大器的非线性	303
13.3 处理复阻抗负载	258	14.2 线性化技术	305
13.4 三元件匹配	260	14.2.1 前馈放大器	306
13.4.1 π 型网络	260	14.2.2 决定前馈放大器的耦合 器值	306
13.4.2 T型网络	264	14.2.3 RF 预失真	308
13.5 低 Q 值或宽带匹配网络	264	14.3 数字基带预失真	309
13.6 史密斯图	269	14.3.1 星座映射	311
13.6.1 史密斯图的结构	270	14.3.2 信号映射	311
13.6.2 有关史密斯图的基本 技巧	274	14.3.3 复LUT	311
13.6.3 绘制阻抗值	274	14.3.4 调节	312
13.6.4 图中的阻抗操作	274	14.3.5 采样	312
13.6.5 阻抗到导纳的转换	278	14.3.6 量化	313
13.6.6 图上的电导操作	281	14.3.7 反馈	313
13.7 史密斯图上的阻抗匹配	285	14.4 小结	314
13.7.1 二元件匹配	285	参考文献	314
13.7.2 三元件匹配	285	索引	316
13.7.3 多元件匹配	286		

第 1 章

无线电波和传播

Ian Poole

还是让我们从基础说起吧。本章介绍了无线电波、电场和传播的基本概念，以及描述频率和波长之间关系的基本公式。大部分内容都是关于无线电波在实际应用中如何传播的基本介绍，包括反射和多路径，另外还用了较大的篇幅介绍大气效应。

——Janine Sullivan Love

无线电波的特性和传播方式在无线电技术的研究中是至关重要的。在其他方法无法实现的情况下，无线电波的长距离传播特性使得通信成为可能。利用无线电波可以在几米到数千英里的距离之间建立通信。通过短波传播或卫星传播，我们可以同地球另一端的人打电话，或者进行其他形式的通信。与之相比，无线电波的传播距离还要更远。例如，无线电望远镜可以检测到由几光年以外的能量源发出的微弱信号。

无线电波是一种电磁波。因为电磁波包含电场成分和磁场成分，所以在学习电磁波之前有必要先介绍一下电场和磁场。

1.1 电场

任何带电物体，不管是带静电还是有电流从中通过，都有一个电场与之相关联。众所周知，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。这可以通过很多方式来证明。例如，梳理过的头发通常容易立起来。这是因为，梳头时梳子和头发摩擦产生静电，结果每根头发都带有相同极性的电荷，它们因相互排斥而立起来。由此可见，电荷之间存在着相互作用力。如果电压达到千伏以上，那么这样的例子的效果就相当显著了。然而，即使是电子电路中相对较低的电压，也会表现出相同的效果，尽管程度要小得多。

任何带电物体都会辐射出电场，如图 1-1 所示。电势随着与带电物体距离的增加而下降。下面举一个 10V 的带电球体的例子。在球的表面，电势为 10V。然而，随着与球心距离的增加，电势开始下降。由此可见，可以在球体周围画出如图 1-1 所示的等电势线。

电势随着与球心距离的增大而减弱。这表明，电势的大小与距球心的距离成反比，即增加一倍的距离，电势减半。电势与距球心的距离的变化关系如图 1-2 所示。

电场决定了其中带电物体的受力大小和方向。电场强度是图 1-2 中的曲线斜率的负值。曲线的斜率往往表示变量的变化率。在这里，它代表着某一点上的电势对距离的变化率，也就是所谓的电势梯度。可以看出，电势梯度与距离的平方成反比。换言之，若距离增加一倍，则电势的梯度将减少到 1/4。

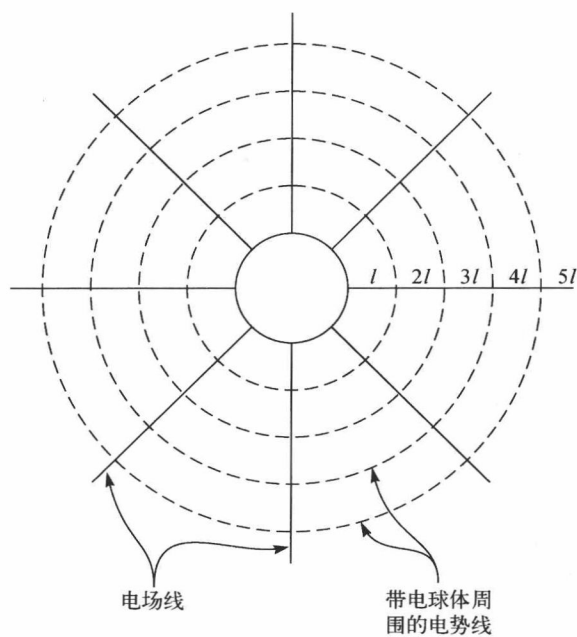


图 1-1 电场线和带电球体周围的电势线

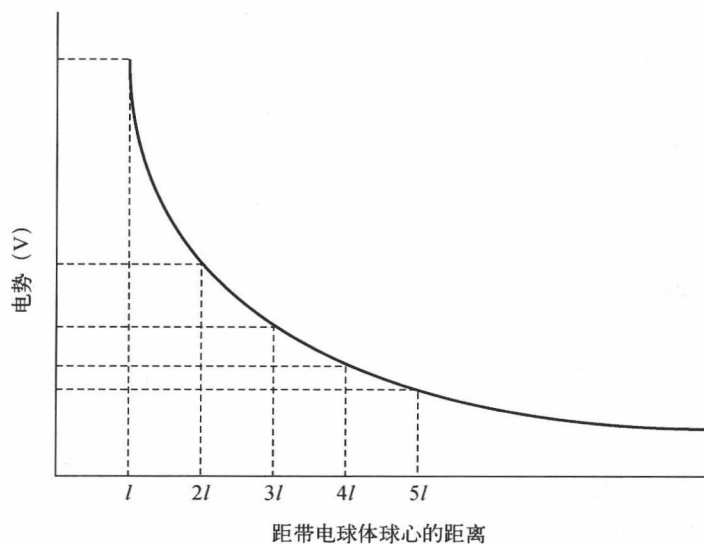


图 1-2 电势大小与距带电球体距离的关系

1.2 磁场

磁场也很重要。同电荷一样，磁体也可以相互吸引和相互排斥。类似于正电荷和负电荷，磁体有两种磁极，即北极和南极。同极相斥，异极相吸。在磁场中，同样可以发现，磁场强度与距离的平方成反比。

虽然最先为人们所用的磁体是永磁体，但很久以后，人们发现电流在导线中流动也可以产生磁场（见图 1-3）。这是很容易验证的，把磁针放在通电导体附近，磁针会发生偏转。图中导线四周特定方向的线就是磁力线。确定磁力线走向的最简单的方法就是在导体周围使用右手螺旋法则。想象一下，右手成螺旋状，拇指指向电流方向。其他手指成螺旋状旋转的方向就是磁力线的走向。

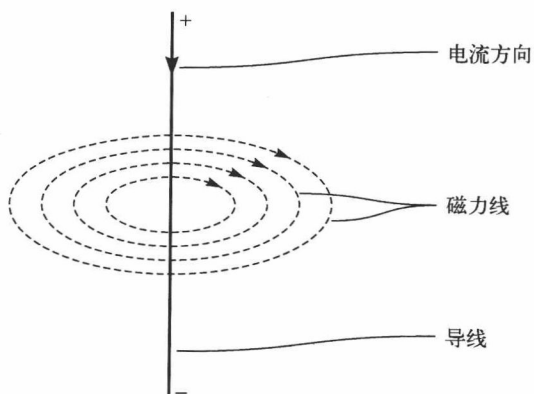


图 1-3 通电导线周围的磁力线

1.3 无线电波

正如之前提到的，无线电信号是一种电磁波。无线电信号有着与光波、紫外线和红外线相同的辐射类型，其不同之处在于波长和频率。电磁波在组成上是相当复杂的，它包含不可分离的电场分量和磁场分量。电场平面和磁场平面相互垂直，同时又都与电磁波的运动方向垂直。电磁波可以由图 1-4 形象地表示。

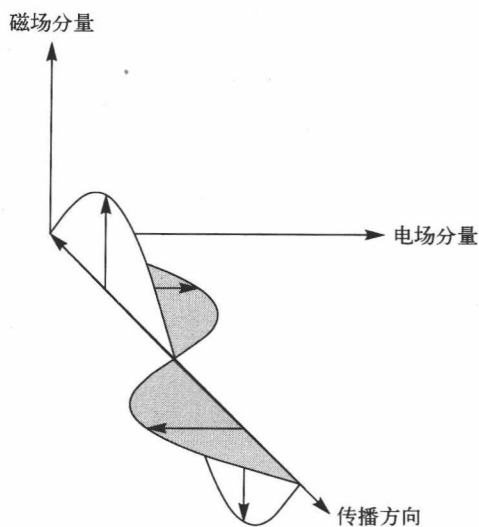


图 1-4 电磁波

发射信号的天线上的电压变化产生电场，而电流的流动引起磁场的变化。我们还可以发现，电场线沿着与天线相同的轴线传播，并随着远离轴线而向外扩散。电场的测量以给定距离上电势的变化量为单位（如 V/m），这就是电场强度。

电磁波有很多属性。第一个属性是波长。这是指电磁波上的一个点到下一个完全相同点的距离，如图 1-5 所示。最明显的一个选取点是峰值点，因为这个点很容易识别，不过选择任何点都是可以的。

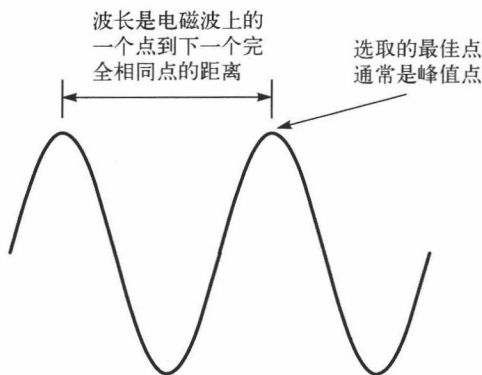


图 1-5 电磁波的波长

电磁波的第二个属性是频率。这是指电磁波上某一点在一定时间内（通常是 1 秒）往复运动的次数。频率的单位是 Hz，它等于周期/秒。该单位是以发现无线电波的德国科学家的名字命名的。无线电使用的频率通常很高。因此，我们经常要给赫兹加上前缀千、兆和千兆，例如，1 kHz 是 1000 赫兹，1 MHz 是 1 兆赫兹，1 GHz 是 1 千兆赫兹（即 1000 MHz）。最初，频率的单位是没有特定名字的，只是使用周期/秒（c/s）。一些较早期的书籍还给这个单位加上了前缀（如 kc/s、Mc/s 等）来表示较高的频率。

电磁波的第三个主要属性是速度。无线电波的传播速度和光速相等。对于大多数实际应用，波速取 300 000 000m/s，尽管更精确的值是 299 792 500m/s。

1.4 频率到波长的转换

以前，收音机刻度盘上无线电台的位置是用波长表示的。一个电台对应的波长可能是 1500m。现在的电台使用的是频率，因为频率在今天更容易测量。频率计数器可以非常准确地测量出频率，在今天的技术条件下，其成本相对更低。与光速链接，很容易得到频率和波长的关系：

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

其中， λ 是波长（单位：米）， f 是频率（单位：Hz）， c 是无线电波的速度（光速），对于实际应用可取 300 000 000m/s。

在前面的例子中，1500m 的波长对应的频率为 300 000 000/1500，即 200 千赫兹（200 kHz）。