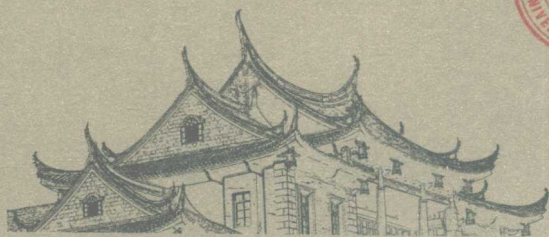


厦门大学南强丛书【第六辑】



*Xiamen daxue
Nanqiang Congshu*

现代天线 实用设计技术

游佰强 周建华 李伟文◎著



厦门大学出版社 | 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS | 全国百佳图书出版单位



厦门大学南强丛书

【第六辑】

现代天线实用设计技术

游佰强 周建华 李伟文◎著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

现代天线实用设计技术/游佰强,周建华,李伟文著. —厦门:厦门大学出版社, 2016.9

(厦门大学南强丛书,第6辑)

ISBN 978-7-5615-5983-3

I. ①现… II. ①游…②周…③李… III. ①天线设计—研究 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 054938 号

出版人 蒋东明
责任编辑 郑丹
装帧设计 李夏凌
责任印制 许克华

出版发行 厦门大学出版社
社址 厦门市软件园二期望海路 39 号
邮政编码 361008
总编办 0592-2182177 0592-2181406(传真)
营销中心 0592-2184458 0592-2181365
网址 <http://www.xmupress.com>
邮箱 xmupress@126.com
印刷 厦门集大印刷厂

开本 720mm×1000mm 1/16
印张 26
印张 4
字数 436 千字
版次 2016 年 9 月第 1 版
印次 2016 年 9 月第 1 次印刷
定价 69.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社
微信二维码



厦门大学出版社
微博二维码

“厦门大学南强丛书”（第六辑）编委会

主任委员：朱崇实

副主任委员：李建发 韩家淮

委 员：（以姓氏笔画为序）

万惠霖 朱崇实 孙世刚 李建发 宋文艳

陈支平 陈武元 陈振明 周 宁 周涵韬

洪永淼 蒋东明 韩家淮 谢素原 谭绍滨

作者简介

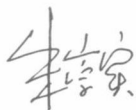
游佰强, 教授, 厦门大学教学名师, IEEE 高级会员, 中国电子学会高级会员, 曾任厦门大学信息科学与技术学院电子工程系副主任。从国家“七五”计划起先后主持和参加完成了十多项国家“863 计划”、国家自然科学基金重大、重点和面上项目, 已发表论文 70 余篇, 获多项国家省校级奖, 申报并公开国家发明专利 90 多项, 已经获得 55 项发明专利授权, 出版编译著作 4 部。注重教学科研结合, 主持国家视频公开课、福建省精品课程及一批校级精品课程。研究领域主要有: 新型天线设计、射频电路及微波器件、智能隐身技术、人工电磁材料、电磁兼容、光电子和光子器件等。

周建华, 工学博士, 教授, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员, 仁荷大学访问教授。主持多门电磁场系列精品课程的网络教学、国家级视频公开课。主持参与多项国家、省和校级科研项目, 曾获“国家教委科学技术进步奖”(二等奖)和多项校级奖励, 已发表论文 50 多篇, 获得国家发明专利授权 49 项, 出版编译著作 4 部。研究领域包括天线理论与技术、应用电磁学、光波导技术、集成光学、电磁材料与器件、电磁场数值分析等方面。

李伟文, 工学博士, 副教授。曾学习工作于吉林大学和浙江大学国际电磁学院, 2005 年到厦门大学电子工程系工作。参与多项福建省精品课程建设并主持 3 项校教改项目。参加多项国家“863 计划”、国家自然科学基金和省市级科研项目, 已发表论文 40 余篇, 获得国家发明专利授权 17 项。目前主要研究领域包括微波器件、天线及微波光子学等方面。

总 序

厦 门 大 学 校 长
“厦门大学南强丛书”编委会主任



厦门大学是由著名爱国华侨领袖陈嘉庚先生于1921年创办的,有着厚重的文化底蕴和光荣的传统,是中国近代教育史上第一所由华侨出资创办的高等学府。陈嘉庚先生所处的年代,是中国社会最贫穷、最落后、饱受外侮和欺凌的年代。陈嘉庚先生非常想改变这种状况,他明确提出:中国要变化,关键要提高国人素质,要提高国人素质,关键是要办好教育。基于教育救国的理念,陈嘉庚先生毅然个人倾资创办厦门大学,并明确提出要把厦大建成“南方之强”。陈嘉庚先生以此作为厦大的奋斗目标,蕴涵着他对厦门大学的殷切期望,代表着一代又一代厦门大学师生的志向。

1991年,在厦门大学建校70周年之际,厦门大学出版社出版了首辑“厦门大学南强丛书”,共15部优秀的学术专著,影响极佳,广受赞誉,为70周年校庆献上了一份厚礼。此后,逢五逢十校庆,“厦门大学南强丛书”又相继出版数辑,使得“厦门大学南强丛书”成为厦大的一个学术品牌。值此建校95周年之际,我们再次遴选一批优秀著作出版,这正是全校师生的愿望。入选这批“厦门大学南强丛书”的著作多为本校优势学科、特色学科的前沿研究成果。作者中有院士、资深教授,有全国重点学科的学术带头人,有新近在学界崭露头角的新秀,他们都在各自的学术领域中受到瞩目。这批学术著作的出版,为厦门大学95周年校庆增添了浓郁的学术风采。

至此,“厦门大学南强丛书”已出版了六辑。可以说,每一辑都从一个侧面反映了厦大学人奋斗的足迹和努力的成果,丛书的每一部著作都是厦大发展与进步的一个见证,都是厦大人探索未知、追

求真理、为民谋利、为国争光精神的一种体现。我想这样的一种精神一定会一辑又一辑地传承下去。

大学出版社对大学的教学科研可以起到很重要的推动作用,可以促进它所在大学的整体学术水平的提升。在95年前,厦门大学就把“研究高深学术,养成专门人才,阐扬世界文化”作为自己的三大任务。厦门大学出版社作为厦门大学的有机组成部分,它的目标与大学的发展目标是相一致的。学校一直把出版社作为教学科研的一个重要的支撑条件,在努力提高它的学术出版水平和影响力的过程中,真正使出版社成为厦门大学的一个窗口。“厦门大学南强丛书”的出版汇聚了著作者及厦门大学出版社全体同仁的心血与汗水,为实现厦门大学“两个百年”的奋斗目标做出了一份特有的贡献,我要借此机会表示我由衷的感谢。我不仅期望“厦门大学南强丛书”在国内学术界产生反响,而且更希望其影响被及海外,在世界各地都能看到它的身影。这是我,也是全校师生的共同心愿。

2016年3月

前 言

《现代天线实用设计技术》结合现代科技运用的需求,归纳总结了一些常用的天线优化设计技巧及解决问题的思路,重点讨论了对称振子线天线及其改进技术、宽带天线、缝隙及微带天线、天线阵列的方向图综合技术、平面反射天线阵列、分形与天线小型化技术、超宽带天线及陷波设计技术、多极化天线等现代研究热点。内容阐述紧扣现代通信系统、北斗导航系统应用、物联网及 RFID(Radio Frequency Identification, 射频识别)等实际需求,全书设计实例均来自近年来的实际科研应用专题,旨在为读者的学习和研究提供举一反三的基础素材。

本书编著过程中尽可能避免繁复枯燥的理论推导,重点放在设计思路形成、创作过程及性能提升技巧的讨论上。全书图文并茂,融入了大量原创专利成果,有关天线设计的创新优化重点围绕天线的核心性能指标要求,如方向性、极化、阻抗、带宽及增益控制等方面。

在过去的十多年里,我们先后承担了一批省级、校级及企业合作类的课题研究,包括福建省科技重大专项专题项目“北斗/GPS 双模高精度定位技术研发及应用”(2013HZ0002-1)、福建省科技重大专项专题项目“BD2-RDSS 小型化天线”(2010HZ0004-1)、中船重工集团 725 所合作项目“吸波涂层电磁参数可控性的探索性研究”、福建省科技计划重点项目“RFID 标签天线设计技术的研究”(2007H0036)、广东省教育部产学研重点项目“移动通信/RFID 多频兼容小型陶瓷天线系列产品开发”(2007B090400059)、福建省自然科学基金项目及一批企事业单位项目等。在此过程中前后有 60 多名硕士研究生在我们研究团队中学习工作,参与了不同阶段的研

究工作,在他们所撰写的硕士论文及参加的国际会议中总结和积累了大量的研究成果,其中很多内容都具有创建性。团队先后申报了90多项国家发明专利(其中已有55项发明专利获得了授权),陆续在国内外期刊和国际会议上发表了数十篇科技学术论文。此系列成果内容丰富,但相对比较松散。所以,我们一直期望能逐步将常见的实用技术加以归纳,分步整理出来供交流学习,同时吸引更多的本科高年级同学加入应用电磁学领域,获取RF(Radio Frequency,射频)微波天线方面的入门素材。此外,整理出的资料也可以为合作的企业人员培训或者工作在相关领域科研生产一线的科技工作者及研究人员提供参考。

非常感谢厦门大学“南强丛书”项目为本专著的出版提供了机会。周建华教授参与编写了本书第1、2、4、7章;李伟文副教授参与编写了本书第8、9章;游佰强教授参与编写了本书第1、3、4、5、6、7、8章并审阅了全书。本书的成稿特别感谢已毕业的夏飞、陈浩、汤伟、林斌、罗勇、蔡立绍、柳青、刘禹锡、王天石、池金燕、黄天赠、李立之、胡宝法、蔡龙瑞、赵阳、周涛、张斌等同学在读研期间所做的大量研究工作,也非常感谢2002—2016年期间团队毕业及在读的研究生在这些年来系列研究项目中所做出的贡献。最后,衷心感谢美国电气和电子工程师学会院士(IEEE Fellow)周锡赠教授为多名研究生提供的合作培养机会及由此获取的系列研究成果。

由于水平有限,错误及不当之处在所难免,欢迎广大读者提出宝贵意见。

游佰强 周建华 李伟文
2016年5月于厦门大学海韵园

目 录

第一章 现代天线设计常用参数及基本理论与技术概述	1
1.1 天线的阻抗带宽和输入阻抗	1
1.1.1 带宽	1
1.1.2 输入阻抗	2
1.2 天线的方向图、增益和极化	2
1.2.1 方向图	2
1.2.2 增益	3
1.2.3 极化	4
1.3 天线的主要性能参数	5
1.3.1 输入阻抗	5
1.3.2 辐射效率	6
1.4 天线的基本辐射理论	6
1.5 偶极子天线的基本理论	9
1.5.1 偶极子天线的电流分布	9
1.5.2 偶极子天线的辐射场	11
1.5.3 偶极子天线的辐射功率和辐射阻抗	13
1.5.4 偶极子天线的有效长度	14
1.5.5 偶极子天线的带宽	17
1.5.6 不同长度的偶极子天线的性能总结	18
1.6 微带天线小型化的主流技术	20
1.6.1 加载技术	20
1.6.2 曲流技术	21
1.6.3 提高介电常数	22
1.6.4 采用电磁带隙结构	23

1.6.5	分形技术	24
1.7	叠层耦合微带天线基础	25
1.7.1	叠层耦合微带天线概述	25
1.7.2	叠层耦合微带天线的定义与结构	25
1.7.3	天线基板的选择	26
1.7.4	叠层耦合微带天线馈电方法	27
1.8	本章小结	28
	参考文献	29
第二章	对称振子线天线及其变形	32
2.1	带镜像结构的折叠偶极子天线的设计与分析	32
2.1.1	偶极子天线理论分析	33
2.1.2	折叠偶极子天线的结构设计	41
2.1.3	天线性能仿真与分析	43
2.1.4	天线实物制作与实测分析	48
2.1.5	应用于其他频段的的天线结构	49
2.2	带 PBG 结构的双频螺旋偶极子天线的设计与分析	51
2.2.1	螺旋偶极子天线理论分析与结构设计	52
2.2.2	天线性能的仿真与分析	55
2.2.3	天线实物制作与实测分析	59
2.3	双频镜像分形偶极子天线	61
2.3.1	3/2 Curve 分形曲线	61
2.3.2	基于 3/2 Curve 的双频镜像偶极子天线仿真设计	62
2.4	基于 PET 材料的 RFID 标签天线的设计	69
2.4.1	蝙蝠型超高频电子标签天线的设计与仿真	69
2.4.2	蝙蝠天线的优化和改进	72
2.4.3	天线的制作	73
2.5	旋转式偶极子车载天线	74
2.5.1	旋转式偶极子车载天线的结构设计	75
2.5.2	弯折辐射臂性能分析	80
2.5.3	旋转式偶极子车载天线的实现	81

2.5.4	旋转式偶极子单频点天线实现	84
2.5.5	旋转式偶极子天线的性能对比分析	87
2.6	本章小结	90
	参考文献	90
第三章	宽带工作的天线	93
3.1	宽带天线概述	93
3.2	宽频带天线理论	95
3.3	利用平面螺旋结构实现 2G 频段宽带天线的设计样例	97
3.3.1	辐射频点设计	97
3.3.2	光子带隙结构的改进	98
3.3.3	实际宽带天线样品	99
3.4	多谐振宽带化叠层耦合微带天线的设计	101
3.4.1	叠层微带天线宽频带设计技术	101
3.4.2	多谐振宽频带叠层双频微带天线的设计	102
3.4.3	矩形贴片天线与加载 CSRR 阵列天线的对比	103
3.4.4	加载 CSRR 阵列的内切圆弧矩形微带贴片天线	106
3.4.5	加载环形缝隙阵列耦合腔和内切三角结构的低频 贴片的设计	109
3.4.6	叠层耦合结构微带天线的设计	110
3.4.7	层间耦合对天线性能影响因素的探讨	112
3.5	基于缝隙谐振器结构的多频宽带平面印刷天线研究	116
3.5.1	技术背景综述	116
3.5.2	基于箭头形对称双偶极调控缝隙耦合谐振器的微带 馈电印刷天线	119
3.5.3	基于“工”形对称双偶极调控缝隙耦合谐振器的共面 波导馈电印刷天线	129
3.6	本章小结	138
	参考文献	139

第四章 微带天线和缝隙天线	143
4.1 微带天线的结构和分类	143
4.2 微带天线的性能及其应用	143
4.3 微带天线的理论分析方法	145
4.3.1 传输线法	146
4.3.2 腔模理论	147
4.3.3 积分方程法	149
4.4 微带天线技术发展概况	150
4.4.1 多频段技术	150
4.4.2 宽频带技术	151
4.4.3 圆极化技术	152
4.4.4 增益提高技术	153
4.5 三频微带天线设计样例	154
4.5.1 调控设计的构思	154
4.5.2 介质基板材料的选择	154
4.5.3 矩形单贴片的设计	156
4.5.4 矩形双贴片的设计	157
4.6 分形阵元的微带阵列天线的设计样例	165
4.6.1 分形阵元的设计	166
4.6.2 均匀直线微带阵列的设计	172
4.6.3 均匀平面微带阵列的设计	178
4.6.4 缝隙耦合技术的尝试	185
4.6.5 新型陶瓷基底材料结合分形技术的应用	187
4.6.6 基底材料对天线的影响	189
4.6.7 天线样品及实测与仿真结果对比	190
4.7 本章小结	192
参考文献	192
第五章 阵列天线的分析与方向图综合	194
5.1 阵列天线方向图综合技术	195
5.1.1 方向图综合概述	195

5.1.2	方向图综合的发展历程	196
5.1.3	发展现状和未来发展方向	197
5.2	简单阵列天线方向图综合方法	199
5.2.1	阵列天线基础	200
5.2.2	常用的方向图综合方法	206
5.3	低副瓣阵列天线的模组化设计	213
5.3.1	中心对称的均匀直线阵列	214
5.3.2	离散阵列 Taylor 综合法推导	215
5.3.3	阵列天线的模组化设计	217
5.4	低副瓣模组化阵列天线	220
5.4.1	模组内部的 SPM 综合法	220
5.4.2	矩形口径阵列天线	221
5.4.3	仿真分析	222
5.5	低副瓣不等距模组化阵列天线的设计	228
5.6	泰勒-指数复合不等距模组化阵列天线	235
5.6.1	设计样例	237
5.6.2	帕斯卡模组化不等距阵列天线	241
5.7	本章小结	244
	参考文献	245
第六章	反射阵列天线设计技术	249
6.1	反射阵列天线简介	249
6.2	反射阵列天线的发展历史	251
6.2.1	早期的反射阵列天线结构	251
6.2.2	微带反射阵列天线	252
6.2.3	发展现状和未来发展方向	255
6.3	阵列单元设计	256
6.3.1	微带阵元的性能分析	257
6.3.2	变尺寸微带阵元的相移曲线	259
6.4	多层堆叠阵列结构设计	261
6.5	双频反射阵列阵元设计	263

6.5.1	单层结构的双频反射阵列	264
6.5.2	双层结构的双频反射阵列	266
6.5.3	双方环嵌套结构阵元设计	268
6.6	近场方向图综合算法	272
6.7	单频阵列综合设计	275
6.7.1	相位综合结果及算法效率分析	275
6.7.2	馈源天线设计	276
6.7.3	阵列结构及仿真结果	277
6.8	双频阵列综合设计	279
6.9	本章小结	283
	参考文献	284
第七章 小型化分形天线的设计及改进技术		288
7.1	分形在微带天线设计中的应用	288
7.2	北斗频段系列康托尔分形改进天线的研究	293
7.2.1	9×9 凹弧改进康托尔分形天线的研究	294
7.2.2	凸弧改进康托尔分形天线的研究	303
7.3	π 型分形折叠偶极子天线的设计与分析	305
7.3.1	π 型分形折线结构理论	306
7.3.2	双频 π 型分形折叠偶极子天线的设计与分析	312
7.3.3	高阶双频 π 型分形折叠偶极子天线的设计与分析	316
7.3.4	两个 π 型分形折线比例变化对天线性能的影响	319
7.4	RFID 标签所粘贴的物体材料对天线性能的影响	321
7.5	分形光子晶体复合螺旋天线结构设计	323
7.6	本章小结	325
	参考文献	325
第八章 超宽带天线及限波改进技术		336
8.1	超宽带天线研究现状	336
8.2	印制单极超宽带天线基本结构设计及改进	342
8.2.1	天线仿真与测试分析	347

8.2.2	阻抗带宽提升因素分析·····	350
8.2.3	梯形接地面·····	355
8.3	椭圆印制陷波超宽带天线设计·····	358
8.3.1	椭圆印制单极超宽带天线设计·····	358
8.3.2	阻抗带宽影响因素分析·····	360
8.3.3	陷波特性的实现·····	363
8.4	树状分形改进型的缝隙结构超宽带天线设计·····	373
8.4.1	天线结构设计·····	373
8.4.2	天线参数仿真·····	375
8.4.3	超宽带天线陷波特性的实现·····	376
8.5	本章小结·····	380
	参考文献·····	381
第九章	多极化天线设计技术·····	385
9.1	多极化天线的应用背景·····	385
9.2	多极化天线的性能指标·····	386
9.2.1	交叉极化比·····	386
9.2.2	极化通道隔离度·····	387
9.3	多极化天线的实现方式·····	388
9.3.1	双极化天线·····	388
9.3.2	环形贴片与单极子组合的双极化天线·····	390
9.3.3	背腔环形缝隙双极化天线·····	392
9.3.4	三极化天线·····	396
9.4	本章小结·····	398
	参考文献·····	398

第一章 现代天线设计常用参数及基本理论与技术概述

本章将简单阐述本专著所涉及的近代天线设计及应用常见参数、术语及部分基础理论。

1.1 天线的阻抗带宽和输入阻抗

1.1.1 带宽

天线带宽是指满足天线某些性能要求的频带,是根据天线参数的允许变动范围来确定的,这些参数可以是方向图、主瓣宽度、增益、极化、输入阻抗等。天线的频带宽度随着所规定的参数不同而表现不同,由某一参数确定的频带宽度一般并不满足另一参数的要求。如果实际应用中同时对多个参数都有要求,则约定以其中最为严格的要求作为工程天线频带宽度的设计依据。

常见描述天线的带宽有两种形式:绝对带宽和相对带宽。

绝对带宽的定义为

$$\Delta f = f_h - f_l \quad (1-1)$$

即满足一定性能要求的上、下截止频率之差。

天线频带宽度更为常用的相对带宽定义为

$$B = \frac{f_h - f_l}{f_0} = \frac{2 \times (f_h - f_l)}{f_h + f_l} \quad (1-2)$$

其中, f_h 为频率上限, f_l 为频率下限, f_0 为中心频点。

对于目前北斗导航系统的应用需求,在工作频点附近回波损耗低于 -10 dB 的带宽要求达到 10 MHz,即有 90% 以上的能量被传递到了天线。