

清华大学优秀博士学位论文丛书



tsinghua
theses

多模式协同分析法 在小型天线设计中的应用

邓长江 著 Deng Changjiang

Applications of Multi-mode Synergy
in Small Antenna Design

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

多模式协同分析法 在小型天线设计中的应用

邓长江 著 Deng Changjiang

Applications of Multi-mode Synergy
in Small Antenna Design

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

天线的种类繁多,形状各异,然其实质是求解满足特定边界条件的电磁场方程。本书从方程的解——模式出发,介绍小型天线的典型模式分析法。面对天线小型化与多功能化的发展趋势,本书提出多模式协同的概念,使用多个模式提升小型天线的性能,并将协同的效果具体归类为三个方面:扩展工作带宽、增加正交模式和改善辐射方向图,本书用三个章节分别介绍这三方面的内容。本书针对多模式协同技术的每种应用,均提出了一系列的设计方案,并通过实验验证了技术的可行性和优越性。然后,结合移动终端这一载体,基于多模式协同的设计思想,介绍了多款符合移动通信标准的终端天线,为从事天线研发的科技人员提供参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

多模式协同分析法在小型天线设计中的应用/邓长江著. —北京:清华大学出版社,2019

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-52300-0

I. ①多… II. ①邓… III. ①天线设计—数值分析 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 028374 号

责任编辑:石磊 王倩

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:10 插 页:2 字 数:170千字

版 次:2019年5月第1版 印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:077354-01

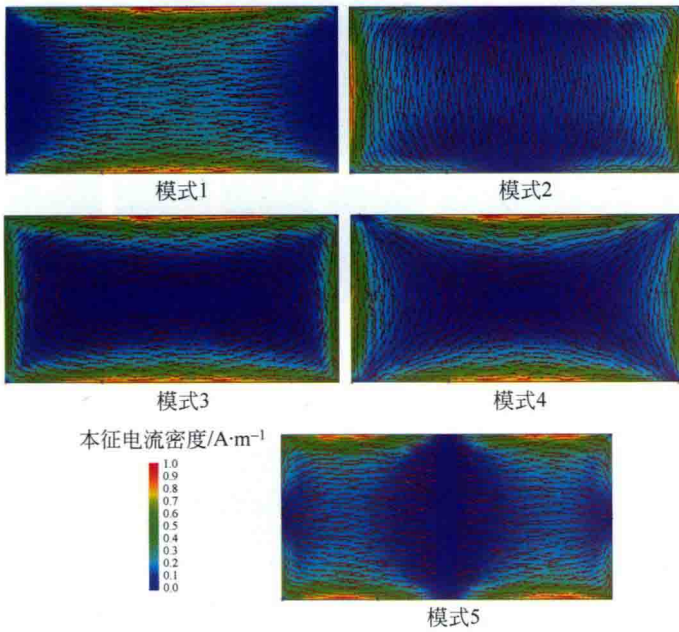


图 2.8 移动终端地板上的本征电流分布

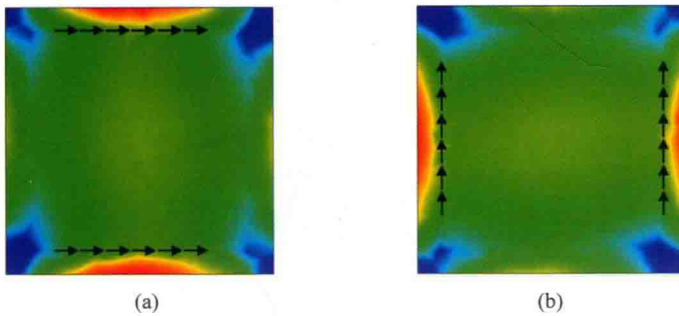


图 2.10 方形贴片天线的两个正交模式
(a) 水平方向; (b) 垂直方向

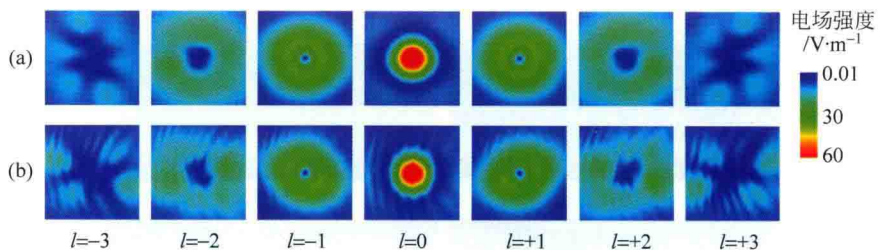


图 4.20 截面电场的幅度分布

(a) 仿真结果；(b) 测试结果

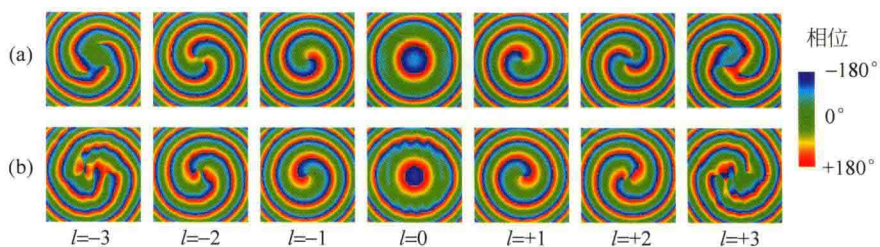


图 4.21 截面电场的相位分布

(a) 仿真结果；(b) 测试结果

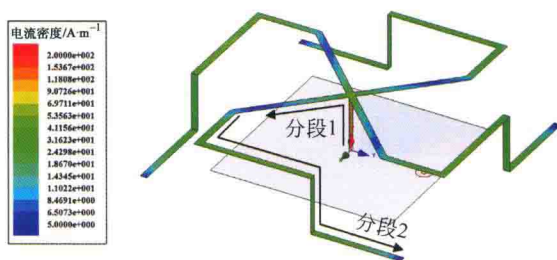


图 5.16 当端口 2 激励时四根金属条上的表面电流密度分布

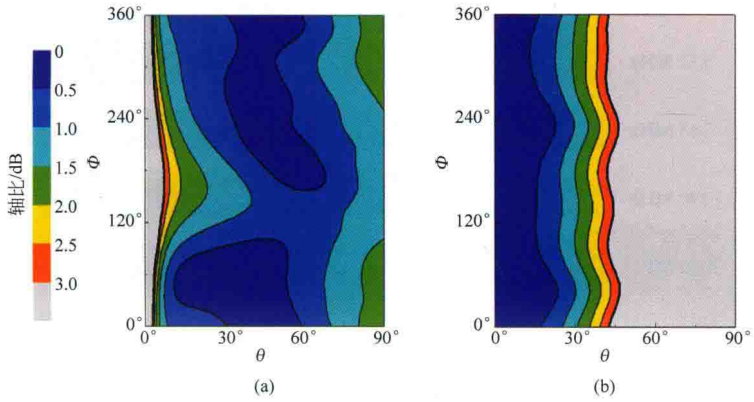


图 5.18 1.575 GHz 处的轴比分布

(a) 水平模式；(b) 天顶模式

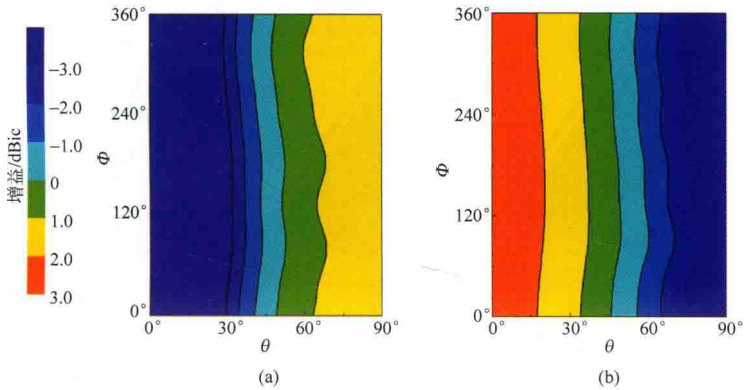


图 5.19 1.575 GHz 处的左旋圆极化增益分布

(a) 水平模式；(b) 天顶模式

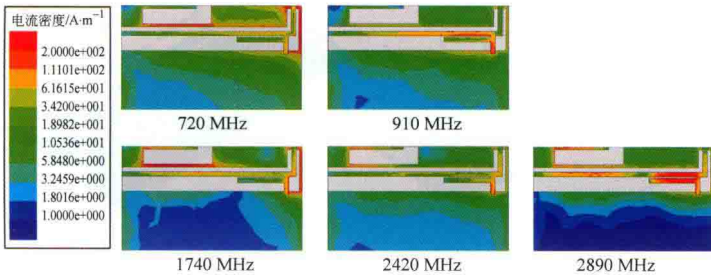


图 6.4 不同谐振点上的表面电流分布

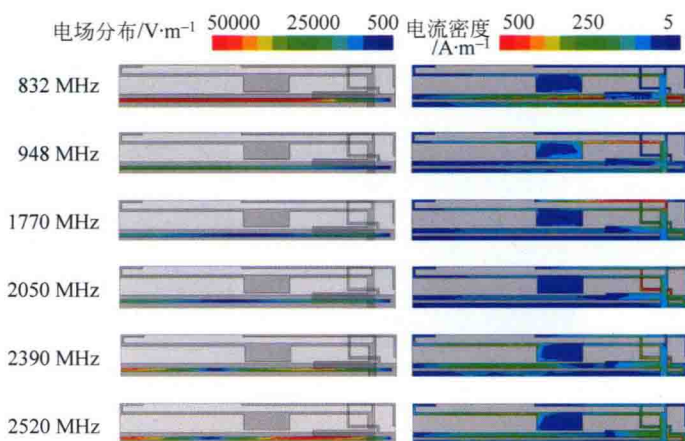


图 6.14 开路槽内的电场分布和天线表面的电流密度分布

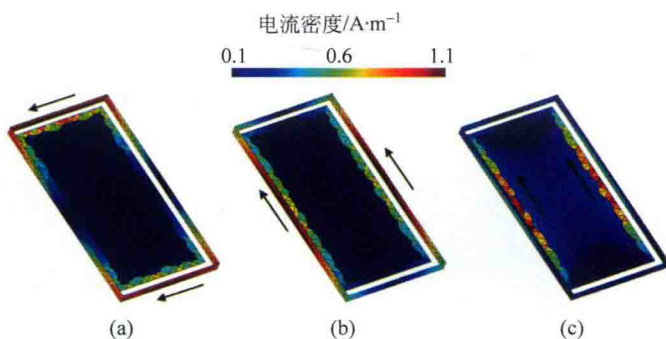


图 6.25 悬浮金属中框模型的本征电流分布

(a) 800 MHz 处的模式 1; (b) 800 MHz 处的模式 2; (c) 1 GHz 处的模式 3

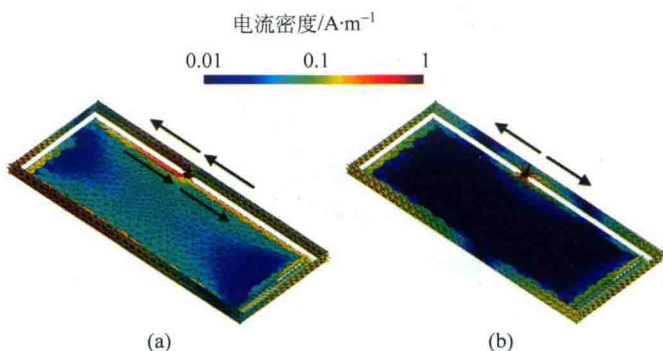


图 6.34 920 MHz 处计算的电流分布

(a) 端口 1 馈电; (b) 端口 2 馈电

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

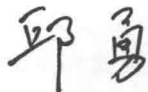
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生导师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研发系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

现在,日新月异和无处不在的无线网络正在快速地改变着我们的生活方式,改变着这个世界。人们以各种形式进行着信息的获取、传输和消费。这种获取、传输和消费的信息量以指数的形式增加,这就给通信带来了巨大的压力。对无线通信而言,更大的通信容量需要更多的频谱资源,或者说需要更大的带宽或更多的频段。另一方面,随着集成电路、显示技术、传感技术和高效电源技术的快速发展,移动终端越来越小型化,功能也越来越强大。作为移动终端辐射和接收电磁波的关键器件——天线,就成为一个瓶颈,它既要满足宽带或多频段的要求,又要满足小体积的要求,这二者都受物理因素的限制。

为了满足带宽需要,多天线、多模式、多频段已经成为移动终端的常态,把它们容纳在一个狭小的空间里则是一个空前的挑战。天线已经不再是一个独立的、分离的器件,作者以模式为出发点,把协同的概念引入天线设计,进行多模式协同分析和设计,从而更好地实现天线的整体性能,同时尽可能减少天线占据的空间。论文从扩展带宽、增加模式、扩展天线方向图的自由度等方面讨论了协同设计的方法。

作为模式分析的具体应用,论文研究了一些新型天线单元和阵列的结构,还研究了多极化天线、全向天线、特征模分析和轨道角动量等新方法及其应用,并给出了一些结合移动终端应用的多频段天线设计实例。

无线网络和移动通信正处在一个快速增长的年代,移动终端已不再只有简单的通信功能,而是把金融、娱乐、交通、消费等融入其中,随着更多功能的开发和物联网、车联网等应用的加入,它的功能将更加强大,但这也给天线设计带来更大的挑战,相信本文作者提出的协同设计理念会得到有效的应用。

本文作者邓长江博士是一位具有创新精神的出色的青年学者,在整个博士生学习期间,他以第一作者发表的被SCI收录的论文14篇,每篇都有理论分析、仿真和实验验证,论文涉及面也很宽。他极其勤奋刻苦,每天都

很早来实验室,很晚才走,许多假期也都泡在实验室。由于他的出色表现,他先后获得了清华大学学术新秀、清华大学优秀博士学位论文一等奖、中国电子学会优秀博士学位论文、博士研究生国家奖学金等荣誉。作为指导教师,我为邓长江取得的成绩而感到非常高兴。衷心希望他在今后的学习和工作中不断拼搏,再接再厉,“长风破浪会有时,直挂云帆济沧海”。

冯正和

清华大学电子工程系

2018年6月

摘 要

无线通信的飞速发展推动着天线技术的不断创新。当前,小型天线正朝多功能化的趋势发展。为了适应这种需求,本论文以天线的模式为切入点,首次将协同的概念引入天线设计,提出了用多个模式协同工作提升天线性能的设计思想。多模式协同分析法是对已有天线设计方法比较系统的归纳,基于该方法,本论文分析了多模式协同在小型天线设计中的三个应用。

多模式协同扩展带宽。在单元设计方面,本论文提出了两款宽带天线设计,其中线极化天线是折合偶极子与半波偶极子的组合,圆极化天线是微带贴片与微带环的组合。与单谐振体相比,这两款天线无需增大天线尺寸,而带宽提升了一倍以上。在阵列设计方面,本论文用环天线激励 2×2 的贴片阵列,这种天线馈天线的方式简化了馈电网络并增加了带宽。

多模式协同增加正交模式,提升 MIMO 系统的信道容量。本论文充分挖掘极化这一自由度,设计了一款双极化贴片天线和一款三极化介质谐振天线,这两款天线与已有文献相比性能均有较大改进。此外,本论文还研究了轨道角动量这一新技术,通过搭建一个多通道发射机来控制环形阵的馈电信号,本设计在实验上产生了可动态调整的轨道角动量波束。为了检测轨道角动量的状态,本设计还改造了一个二维近场扫描平台。

多模式协同改善方向图特性。本论文设计了两款三维全向天线,其中一款侧重提升工作带宽,另一款侧重减小不圆度指标。这两款天线均能在整个三维空间较均匀地辐射能量。为了实现上半球面圆极化波覆盖,本论文首次提出通过在水平辐射模式和天顶辐射模式之间切换,使两个辐射方向图在上半球面互补。通过控制两个模式的馈电信号,该设计还可以在上半球面实现三维零点扫描。

此外,针对移动终端天线这一特殊场景,本设计利用多模式协同分析法设计了三款天线。前两款天线侧重天线性能的提升,一款在 $15\text{ m}\times 60\text{ m}$ 空间内覆盖了4G标准的所有八个频段,另一款在 $8\text{ m}\times 60\text{ m}$ 空间内覆盖

了七个频段。基于本征模理论,第三款天线利用金属中框与手机地板构造了多个谐振频率低于 1 GHz 的本征模式,首次实现了三个本征模的协同工作。

关键词: 小型天线; 多模式协同; 宽带天线; MIMO 天线; 移动终端天线