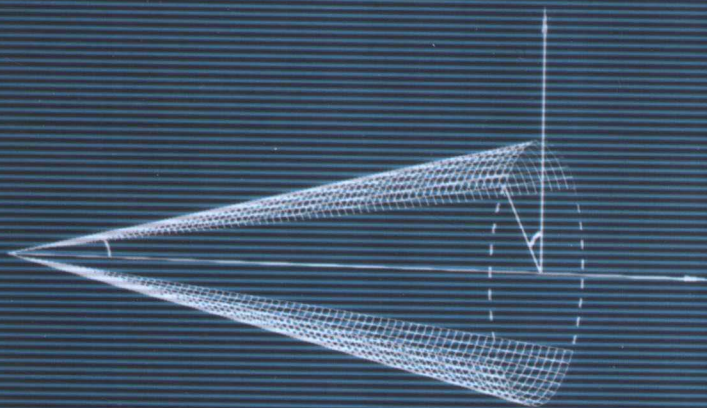


信息与通信技术



超宽带天线理论与技术

阮成礼 著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著



国防科工委“十五”规划专著·信息与通信技术

超宽带天线理论与技术

阮成礼 著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是第一部分系统论述超宽带(UWB)天线的专著。主要讲述圆锥天线、V锥天线、TEM喇叭天线、对数周期天线、螺旋天线、波纹喇叭天线、微带天线、新型天线以及电小天线。给出了电小天线的传输线模型;借助于圆锥天线和椭圆V锥天线等普遍化模型,给出了圆锥天线、V锥天线、TEM喇叭天线、对数周期天线、螺旋天线等超宽带天线结构上的演变关系;首次使UWB天线理论系统化,有助于深刻理解和设计性能优良的UWB天线。

本书的读者对象主要是从事UWB通信、UWB雷达、UWB电磁学和UWB天线研究的学者和从事UWB系统设计的工程技术人员,还可以作为高等学校相关专业的博士生和硕士生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超宽带天线理论与技术/阮成礼著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006. 11

ISBN 7-5603-2155-0

I. 超… II. 阮… III. 宽带通信系统 - 无线电通信 - 天线 - 通信技术 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第119396号

超宽带天线理论与技术

著 者 阮成礼

责任编辑 杨 桦 康云霞

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 850 mm × 1168 mm 1/32 印张 20 字数 520 千字

版 次 2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

书 号 ISBN 7-5603-2155-0

印 数 1~3 000

定 价 29.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转



移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研、高技术研究难题和生产当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各



单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,当人类社会跨入 21 世纪的时候,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创



新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

超宽带电磁学研究是从 Hertz 开始,他于 1886 至 1889 年做的实验不仅证明了 Maxwell 理论的正确性,同时也建立了第一部瞬态脉冲辐射和接收系统。在 Hertz 以后的二十多年里,他所用的火花放电仍然是产生电磁波的主要方法。此后,一方面由于正弦电磁理论飞速发展,另一方面由于理论分析的困难和关键技术尚未突破,超宽带电磁学研究基本上处于停滞状态。到了 20 世纪 80 年代,随着电子科学技术的进步,通信、雷达等无线电系统的频带越来越宽,信号脉冲越来越窄,电磁频谱越来越拥挤,人们才又重新重视和研究超宽带电磁学。

1990 年前后,人们用新的数学方法得到了 Maxwell 方程的严格瞬态解,从而为超宽带电磁学奠定了坚实的理论基础。超宽带脉冲源、超宽带天线和超宽带接收技术都有了突破,极大地促进了超宽带电磁学的研究。1992 年各国开始了慢衰减电磁波的系统应用研究,超宽带通信、超宽带雷达等应运而生,超宽带电磁学在成像、目标特性、反隐身技术、微波时域测量技术、微波定向能传输等方面都得到了广泛应用。从开拓时域电磁波资源方面来讲,超宽带技术的意义不亚于晶体管和因特网的发明。

目前,超宽带电磁学、超宽带通信、超宽带雷达等超宽带技术成为国内外研究的前沿课题,已经列入各种类



型的国家级研究计划。各种类型的超宽带电子系统中必不可少的部件就是超宽带天线。从基本功能上来讲,超宽带天线和常规天线相比,并没有本质区别。但频带宽度的极度扩展(超宽带通信 3.1~10.6 GHz,软件无线电 1 MHz~2 GHz,慢衰减电磁波 0.2~30 GHz 等),带来许多新问题需要研究。在低频端,频率很低,波长非常长,天线电尺寸很小;到高频端,频率很高,波长非常短,天线电尺寸则很大;在全频段内还必须具有良好的辐射特性,这就对天线提出了非常严格的要求。

从 1889 年至今的一百多年里,有大量的超宽带天线研究成果发表,最早的超宽带天线是双锥天线和蝴蝶结天线(1898 年),后来又研究了包括 TEM 喇叭天线、对数周期天线、螺旋天线、V 锥天线等各种类型的超宽带天线。早期的研究并非是从超宽带观点出发,只是在 20 世纪 80 年代,“超宽带”成为普遍接受的专用术语之后,超宽带天线才成为一个明确的研究方向。迄今为止,超宽带天线研究成果散见于各种学术刊物,尚未见到一本系统论述超宽带天线的专门著作。本书一方面是对国内外超宽带天线研究成果(其中包括作者及其学生的研究成果)做一个粗略总结;另一方面为从事超宽带技术工作的学者和研究生提供一个研究基础,试图起到一个抛砖引玉的作用。

本书共分十章。第一章介绍超宽带天线的原理,特别是天线带宽(本书采用的超宽带天线带宽定义为 $(f_h - f_l)/(f_h + f_l) > 1/3$)着重论述天线的传输线模型,以



及自补结构、自相似结构、角形结构等超宽带天线的基本原理。第二章讨论电小天线的分析方法、电偶极子和磁偶极子天线、电小天线频带展宽技术,着重讨论了分布加载实现宽带单极子天线。之所以要讨论电小天线,因为真正的超宽带天线原则上都是电小天线。第三章用共形变换方法讨论了新型的V锥天线,无限长V锥天线是一种理论模型,工程应用的天线尺寸总是有限长。椭圆V锥天线是一个更为普遍的模式,随着其几何参数的变化,可以导出三角板天线、Bowtie天线等超宽带天线。第四章讨论最古老的双圆锥天线,包括无限长和有限长圆锥天线。双锥天线是少数可以严格分析的天线类型之一,根据King的有限长圆锥天线的基本公式,特别给出了有限长圆锥天线的等效电路和输入电抗完全补偿方法。还研究了有用的非对称双圆锥天线、多波束双圆锥天线、线结构双锥天线和椭圆锥天线。第五章讨论TEM喇叭天线。TEM喇叭可以看成是由V锥天线演变而来,因此可以用共形变换方法分析。有限长度TEM喇叭天线则用FDTD等数值方法分析比较好。对TEM喇叭天线做电阻加载和介质加载,主要是改善天线的驻波特性和辐射方向图。TEM喇叭阵列天线有特别优良的低频特性,结构非常简单。第六章和第七章分别讨论对数周期天线和螺旋天线,文献上常称之为与频率无关天线。从天线小型化方面来讲,这两类天线还有许多工作要做。第八章讨论波纹喇叭。波纹喇叭的电尺寸比较大,适用于微波频段。第九章研究平面集成天线之一的微带天线。一般说来,



微带天线是窄带天线。实际上可以采用多回路、分层结构、刻槽等多种技术展宽微带天线的频带宽度。现在,最好指标达到一个倍频程。还讨论了小尺寸宽带微带天线设计问题。第十章介绍了四种新型天线:分形天线、超导及超方向性天线、方向回溯天线和微波光子晶体天线。严格说来,除分形天线外,其他三类天线并不是超宽带天线。这里一方面是介绍几种新型天线,另一方面指出展宽这三类天线的频带宽度是我们的一个充满挑战性的任务。

王琪博士撰写了本书第六章的6.1和6.2节,王洪裕硕士撰写了第二章的2.1~2.3节和10.2节,其余章节由阮成礼完成。

超宽带天线的性能还不能完全满足超宽带电子系统的要求,还有许多课题需要研究。可以预料,今后会有更多的学者投入到超宽带天线的研究中来,为我国的超宽带技术作出更大贡献。

阮成礼
电子科技大学
2006.1

目 录

第一章 超宽带天线原理	1
1.1 天线的传输线模型	1
1.2 天线类型	3
1.3 天线的电磁理论基础	9
1.4 Maxwell 方程的时域解	14
1.5 Hertz 电偶极子	16
1.6 天线性能参数	19
1.7 辐射方向图	22
1.8 方向性系数和天线增益	29
1.9 天线输入阻抗和辐射效率	31
1.10 天线的极化	32
1.11 天线带宽定义	36
1.12 超宽带天线结构原理	41
1.13 超宽带天线简史	47
参考文献	55
第二章 电小天线	59
2.1 基本概念	59
2.2 电小天线的分析方法	65
2.3 电小偶极子天线	84
2.4 电小环天线	87
2.5 电小天线的宽带技术	90
2.6 加载线天线	93
参考文献	110
第三章 V 锥天线	117
3.1 无限长 V 锥天线	117
3.2 有限长 V 锥天线的辐射场	132



3.3 椭圆 V 锥天线	141
3.4 三角板天线分析	151
3.5 超宽带 SBH 天线	159
3.6 线结构 Bowtie 天线	171
参考文献	189
第四章 双圆锥天线	195
4.1 无限长双圆锥天线	195
4.2 有限长圆锥天线	197
4.3 非对称双圆锥天线	217
4.4 椭圆锥天线	238
4.5 多波束双圆锥天线	241
4.6 线结构双锥天线	245
参考文献	252
第五章 TEM 喇叭天线	259
5.1 TEM 喇叭天线的共形变换	259
5.2 TEM 喇叭天线的 FDTD 分析	267
5.3 电阻加载 TEM 喇叭天线	283
5.4 TEM 喇叭阵列天线	298
5.5 加载介质劈的 TEM 喇叭天线	309
参考文献	324
第六章 对数周期天线	331
6.1 平面对数周期天线	331
6.2 对数周期偶极子天线	336
6.3 圆极化 LPDA	345
6.4 地平面之上的 LPDA	356
6.5 LPDA 扇形阵	363
参考文献	369
第七章 螺旋天线	375
7.1 平面等角螺旋天线	376
7.2 阿基米德螺旋天线	380
7.3 锥形等角螺旋天线	383



7.4 圆锥螺旋天线设计	391
7.5 地面之上的 CSA	410
7.6 PBG 平面螺旋天线	422
参考文献	425
第八章 波纹喇叭	433
8.1 波纹喇叭分类及工作原理	433
8.2 本征模理论	441
8.3 大张角波纹喇叭	454
参考文献	468
第九章 微带天线	474
9.1 微带天线分析方法	474
9.2 微带天线展宽频带技术	488
9.3 宽带分层孔径微带贴片天线的设计	496
9.4 CPW 馈电的分层贴片微带天线	508
9.5 无线通信用的宽带 E 形贴片天线	526
9.6 小尺寸宽带微带天线设计	537
参考文献	551
第十章 新型天线	559
10.1 分形天线	559
10.2 超导及超方向性	575
10.3 方向回溯天线	585
10.4 微波光子晶体天线	602
参考文献	615
作者相关论文	623

第一章 超宽带天线原理

天线是任何无线电系统必不可少的组件,它的功能是辐射或者接收无线电波。在发射系统中它把被导电磁波转变为自由空间的无线电波,或者在接收系统中做相反的变换,从而在任意两点之间实现无线电信号的传递。天线的发明使得电磁频谱成为人类最大的可重复使用的自然资源之一。随着社会的进步和科学技术的发展,无线电频谱不断得到开拓,无线电系统的带宽也不断扩展,这促进了 20 世纪末一门新的学科——超宽带电磁学的诞生。超宽带电磁学表明,时域电磁波也是人类尚待开发的非常重要的自然资源。

天线理论与技术已经有了很长的发展历史,无数的学者研制出了能满足各种无线电系统要求的天线。无论无线电如何发展,天线都是不可替代的。超宽带无线电系统要求超宽带天线来完成超宽带被导电磁波和自由空间无线电波之间的转变工作。超宽带天线与常规的窄带天线在辐射原理上并没有本质区别,超宽带天线是在常规的窄带天线基础上发展起来的,其主要研究内容是探索频带宽度极大扩展之后给天线带来的新理论、新技术和新方法。

1.1 天线的传输线模型

图 1.1(a)给出了开路双线传输线中的电荷、电流、电场和磁场分布。终端开路传输线上没有行波只有驻波,传输线终端以及离开终端 $n\lambda/2$ (n 取整数) 处电流为零。导线上传导电流用箭头标出,相邻 $\lambda/2$ 传输线上电流方向相反。电场用垂直于传输线的箭头表示,磁场用环绕导体的箭头和箭尾表示。特别要注意,两导



线之间的场得到加强,其他地方的场都被削弱。这主要是因为导线之间的距离远远小于波长。如果传输线的末端弯曲成图1.1(b)所示的形状,线之间的场就暴露在自由空间中,这时上下导体垂直段上的电流方向不再相反,远区的场不是互相抵消而是互相叠加,从而产生辐射。还可以举出许多其他类似的情况,例如开路平行板传输线终端张开形成 TEM 喇叭天线;开口矩形波导末端逐渐张开形成角锥喇叭天线;拉开短路传输线末端导线之间的距离形成磁偶极子天线;开路圆锥传输线就是双圆锥天线等。天线和传输线不同,传输线两端都是闭合电路,天线的一端是闭合电路(发射源),另一端是自由空间(负载),但本质上是传输电磁能量,是一种特殊的能量传输形式。由此,可以得出结论:天线是传输线的特殊形式,它起着被导波与辐射波之间能量转换的作用。我们把这种学术思想称为天线的传输线模型。

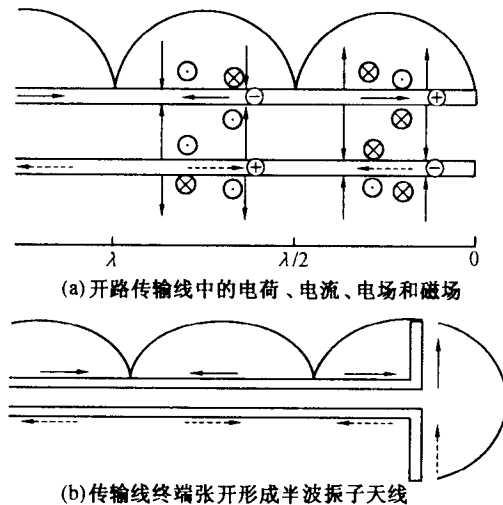


图 1.1 开路传输线演变为电偶极子天线