



国际先进通信技术译丛

# 超宽带 (UWB) 天线原理与设计

## The Art and Science of Ultrawideband Antennas

【美】Hans Schantz 著  
吕文俊 译

国际先进通信技术译丛

# 超宽带 (UWB) 天线原理与设计

The Art and Science of  
Ultrawideband Antennas

【美】Hans Schantz 著

吕文俊 译

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

超宽带(UWB)天线原理与设计 / (美) 尚茨  
(Schantz, H.) 著; 吕文俊译. — 北京: 人民邮电出版  
社, 2012. 1

(国际先进通信技术译丛)  
ISBN 978-7-115-26211-0

I. ①超… II. ①尚… ②吕… III. ①宽波段天线  
IV. ①TN822

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第189355号

## 版权声明

Schantz, Hans

The art and science of ultrawideband antennas

Copyright © 2005 by ARTECH HOUSE, INC.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by ARTECH HOUSE, INC..

本书中文简体字版由 ARTECH HOUSE, INC. 公司授权人民邮电出版社出版, 专有出版属于人民邮电出版社。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2011-4469 号

国际先进通信技术译丛

### 超宽带(UWB)天线原理与设计

- 
- ◆ 著 [美] Hans Schantz
  - 译 吕文俊
  - 责任编辑 杨凌
  - ◆ 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>  
北京鑫正大印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 14.75  
字数: 349千字 2012年1月第1版  
印数: 1-2000册 2012年1月北京第1次印刷  
著作权合同登记号 图字: 01-2011-4469号  
ISBN 978-7-115-26211-0
- 

定价: 49.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

---

# 内容提要

本书从不同角度将天线分别等效成传感器、阻抗变换器、辐射器、换能器进行了分析，然后对超宽带天线进行了分类，最后讨论超宽带天线与系统设计的关系。全书在“部件性能”、“部件—系统”的深度和广度上，向读者全面介绍了超宽带天线的基本原理和设计技术。

本书可供从事 UWB 通信和 UWB 天线研究的学者，从事 UWB 系统设计的工程技术人员，以及高等院校相关专业的博士生和硕士生阅读参考。

# 译者序

本书是美国 Q-track 公司首席科学家 Hans Schantz 的作品，也是国际上迄今为止不多见的从基本物理概念着手诠释超宽带天线设计原理的专著之一。全书共分 8 章，分别从不同的角度将天线等效成传感器 (transducer)、阻抗变换器 (transformer)、辐射器 (radiator)、换能器 (energy converter) 等进行分析，然后对超宽带天线进行了分类，最后讨论超宽带天线与系统设计的关系。全书通过简单的理论分析和丰富的工程实例，向读者全面介绍了超宽带天线的基本原理和工程设计技术。

由于作者早年曾从事核物理学的研究，故全书试图从现代物理学的基本概念出发，逐步阐明超宽带天线的工作机理，这也是导致本书与常规天线工具书、教科书显著不同的原因所在。全书最突出的观点在于根据电磁能量分布的情况来诠释天线的设计，这一思想不仅为超宽带天线单元的设计与优化提供了理论依据，还有助于读者理解超宽带天线的工作原理，更有助于深入挖掘天线输入阻抗的含义和天线辐射的机理。除了提出很多极具启发性和新意的理论观点之外，作者还图文并茂地向读者介绍了大量的工程实例，包括早期无线电技术中出现的超宽带天线设计专利 (双锥天线、同轴喇叭天线等) 和作者亲自制作的大量超宽带天线及其实验结果。

必须承认，书中也存在个别不完美的观点，比如作者认为不平衡传输线的表皮电流是边界条件的不连续性所造成的，实际上这种现象应该是边界条件的非理想性造成的；作者认为天线具有“高通滤波”特性，严格来说应该是“带通特性”；书中也存在若干文字和公式错误等排版问题。对此，译者已尽可能做了勘误并加以标注说明。然而，瑕不掩瑜，这些疏漏并不影响全书的价值。

全书各章节的翻译安排如下：第 1、2、3、4、5、7、8 章和第 6 章的后两节由吕文俊副教授翻译，第 6 章的前两节由程勇副教授翻译。南京邮电大学研究生张晶、孙伟、赵强、董洁、施维恭、王莉和本科生李雷、曾志伟、李晶晶等同学为前言、附录、索引和参考文献的整理及录入做了大量的工作，译者对此致以衷心感谢。全书译稿由吕文俊统一校对和整理。本书的翻译工作先后受到国家自然科学基金 (61001079)、江苏省“青蓝工程”、教育部博士点基金 (20093223120005)、东南大学毫米波国家重点实验室开放课题 (K201202)、江苏省高校自然科学基金 (10KJB510007) 和南京邮电大学“攀登计划项目” (NY210003, 07) 的资助，特此表示感谢。由于译者的理论水平有限、实践经验尚浅，虽经数年不懈努力和反复斟酌，译文中仍难免存在错漏和不足之处，敬请读者批评指正。

北阿拉巴马州到处可见大酒商、拖拉机厂、钢铁公司、共和党人、教授和其他没啥背景的人。

——哈波·李，枪打反舌鸟，1961

# 序 言

本书可谓我近 15 年来的人生历程之顶点：从学校毕业到教书，再到更多的学校进行独立研究，最后来到北阿拉巴马州的青山之间。传统上的“序”应该介绍该书所涵盖的内容，为主要内容设置写作背景并阐述作者的写作意图。本书介绍性的章节已经完成了这些任务，序言似乎就有点多余。为解决这一问题，在序言中我主要回顾自己从事超宽带研究的经历。如果读者对一位理论物理学家是如何被培养成为一位专业的超宽带天线设计者这一特殊故事不感兴趣的话，我强烈建议你跳过序言直接进入第 1 章。

1990 年，我进入位于奥斯汀的田纳西州立大学开始物理专业的学习，主要钻研核物质理论。不是因为核物质的状态方程和核天体物理学的课程本身没有魅力，而是我实在难以想象，我该如何把这种理论应用于更实际的问题中。因此，我决定改学引力学理论和广义相对论。由此我对“跳出狼窝，又进虎穴”这一谚语赋予了新的含义。在我的反对者看来，我希望制造出抗引力机的理想（确切地说，应该是“狂想”）图景，比设计并建造属于我自己的中子星要稍微实际一点。幸运的是，我的学位论文指导老师乔治·苏达山善意地告诉我，尽管广义相对论中已经合理地从数学上证明了地球引力，但并没有人真正明白引力是如何起作用的，也没有人真正明白引力场的能量是如何从一个地方传递到另一个地方的。如果我想弄明白引力和引力能的作用机理，他建议我首先去了解电磁能的传输机理。于是，我从此就跟“电磁能量”这东西铆上了，并义无反顾地开始了对它的研究。

我发现 19 世纪 80 年代由约翰·亨利·坡印廷和奥利弗·亥维赛介绍的电磁能传播理论的确是一种更全面的理论。然而，坡印廷—亥维赛理论变得寂寂无声有两方面原因，一方面是物理学的原因，另一方面是哲学上的原因：首先，有人指出它存在许多问题、包含自相矛盾的观点以及模糊不清的公式；其次，坡印廷—亥维赛理论暗示电磁现象包含更多基本的物理过程和实体——“无论电磁现象是什么”，它都按照麦克斯韦理论和坡印廷—亥维赛理论在自由空间存储能量，并将能量从一个地方传播到另一个地方。这样，坡印廷—亥维赛理论直接与主导一个世纪的主流物理思想——即物理学是度量和观测实验的数学预测——这一观点相对立。

物理上的障碍相对容易克服。当我研究坡印廷—亥维赛理论的困惑时，我重走了其他研究者的道路，这些研究者成功解决并解释了该理论中已被指出的自相矛盾的观点。我找不出任何反对这一理论的证据，相反，我发现坡印廷—亥维赛理论全面解释了许多其他问题，包括电磁场的驱动力和角度驱动力。

哲学上的障碍是最难克服的。大多数哲学家习惯谈论真空能量、真空极化、光在真空中

的速度、真空电导率和真空磁导率，他们习惯于将特性归纳到“真空”，简单地说，“一无所有”就是某种东西；他们嘲笑那些愿意对“以太”进行思考的人，也嘲笑那些对隐藏在电磁场中更多的基本现象进行思考的人。

当然，“以太”的概念来自于它本身的哲学含义，它散发着 19 世纪那些木轮、齿轮、凝胶剂以及“自旋弹性物质理论”（由麦克斯韦和他的同时代人解决电磁问题而引入）的发霉气息。这些老掉牙的错误模型，却令麦克斯韦及其同事深信：电磁能是以某种方式存储在自由空间中的（我相信这个结果是正确的）。我很高兴能与我的特聘实验顾问约翰·阿卡法德·维勒讨论这些与物理有关的哲学问题。尽管我们谁都无法说服对方接受自己的哲学观点，维勒教授还是帮我理解了当代物理学思想背后所隐藏的思考和假设。我花了较长的篇幅来陈述自己的哲学观点，并将它放在坡印廷定理的应用之前，这有助于理解由电偶极子形成的静态电磁场的能量是如何减弱、如何辐射出去的。

我发现的东西让我很吃惊。我暗暗接受了加速电荷是能量辐射之源的概念，在我的整个物理学教育中，这一概念不断让我思考。我研究过量子力学，看到了费曼图案是如何将电磁理论的数学表示中的求和变成一种更方便、更容易解决的形式。费曼图案通常将电磁的相互作用看成另一种过程，该过程我称之为“原子和空穴电磁学”：点电荷发射并吸收点光子，从而在宏观上产生电磁现象。尽管费曼图案提出了一种更加方便的数学解释，但仅从字面上理解，它会引起我们对物理学概念的误解。

我发现一定条件下，静态电磁能存储在远场区，它与加速电荷的衰减、辐射能量的转换以及能量的传播无关。我也发现电磁能可以按因果关系分成不同区域，只要找到净能流为零的表面就可以分析这种因果关系。我称这种表面为“因果面”，并用它们来分析电偶极子周围的电磁能。我将这一结论发表在一篇科技论文以及我的讲稿中。

1995 年毕业后，我开始从事教学和研究工作。我在位于奥斯汀的田纳西州立大学 ITT 技术研究所谋得一个职位，通过教授数学、物理和电子技术谋生。在一所只招收“天才”的四年制学院我也得到一个职位，该学院由能力选择委员会来评定教师的教学能力。我发现我想去的单位在某种程度上都不愿意雇佣一个刚从学校毕业的理论物理学家来从事电磁学研究。最后，我决定返回学校接受一些更实际的电子工程的培训。经过艰难的努力，我才找到了一个愿意接收物理学博士作为研究生的研究所。1998 年春季，我终于在位于哥伦布市的俄亥俄州立大学电子科学实验室登记注册。

回顾所学课程和学位要求，我认为身体完全可以承受在两年时间内获得电子工程博士学位的压力，这也是我准备实现的目标。我学习了大量天线工程的实际知识并积累了有价值的第一手实验经验。我在俄亥俄州州立大学学习生涯的最精彩部分就是选修了本·蒙克教授的天线课程。

在我的第二学年（1990 年）的夏季，我的办公室同事（整个电磁信号分析和处理领域的权威）Soumya Nag，飞到阿拉巴马去会见他的未来雇主。几个星期之后，他回到我们共用的办公室，发现我正在上网，就问我在做什么。

“我要开始找工作了，”我解释，“我正在寻找我的下家雇主。”

“你想找什么样的工作呢？”Soumya 问。

因为拥有 Time Domain 电磁学和宽带天线的设计背景，我决定从事超宽带天线设计。我已经被 Time Domain 公司的外在条件所吸引，这类公司是我的首选。

“我想找一份超宽带天线设计师的工作，”我告诉 Soumya，“最好和 Time Domain 公司拥有相似的工作条件。”

“Time Domain 公司？”Soumya 难以置信地问，“你听说过 Time Domain 公司？”

“怎么了？我的确听说过，”我回答，“他们是超宽带天线技术应用领域的领导者之一啊。”

“哦，”Soumya 停顿了一会后说，“我得到了他们的工作邀请。”

他的考察之旅的目的地就是 Time Domain 公司。他以为我从没听说过 Time Domain 公司，怕解释起来太麻烦，就没告诉我。实际上，在同 Time Domain 公司签合同同时，Soumya 已经将我考虑进去了。在 1999 年 9 月 Time Domain 公司发起的一个会议上，我提交了一篇论文，同时进行了一次考察之旅，最终我收到了 Time Domain 公司的工作邀请。

是继续留在学校还是去 Time Domain 公司，我徘徊不定。与电子科学研究所的主任商量之后，我了解到虽然政策和课程分布允许一个人在两年内取得博士学位，至今为止还是有一个重要的不成文的附加规定，即必须在俄亥俄州州立大学至少呆 3 个学年或者更长时间，我才能拿到博士学位。于是，1999 年 11 月，我离开俄亥俄州，来到位于阿拉巴马州 Huntsville 市的 Time Domain 公司开始工作。很快我就发现、特别是在我追求并迎娶到一位令人喜爱的南方女孩巴巴拉·麦考利的时候——北阿拉巴马州有她独特的魅力，并不像哈波·李描述的那样令人失落。

2002 年 2 月 14 日出台的报告和规定，要求展开商用超宽带天线的设计，我的知识终于派上用场了——而在此之前，能得到带薪的 3 年时间进行超宽带天线的设计和构造工作，对我来说简直是一种奢侈。起步阶段的艰辛经历，让我在后来能够克服许多困难，并有能力去解决一些现在仍令大家头疼的超宽带天线设计中的细微概念的问题。更难得的是，这段经历让我有机会去犯一些同时代超宽带天线设计者普遍会犯的错误，并且有充足的时间去认识并纠正这些错误的操作和对概念的错误理解。

我很高兴能发明大量超宽带天线——美中不足的是只有一小部分是全新的设计。通过很多案例，我后来才发现自己并不是第一个实现某一特殊优点或某一特殊设计的人。从某方面来说，我希望这本书能涵盖自己从事超宽带天线研究工作以来的所有方面的内容——一本可以帮我们避免重蹈覆辙、让我们发现天线之艺术的书，而不是强调自己成就的书。

我学习了大量的有关天线和射频原理的资料，这些都来自于 Time Domain 公司的高素质工程师团队，特别要提到的是（按字母先后顺序排列）马克·博纳、鲍勃·德皮尔斯、大卫·狄更斯、道格·费兹巴菲克、海博·佛鲁纳、奈瑞·佛鲁特、查理·吉尔伯特、Soumya Nag、Kai Siwiak、丹尼斯·赛特门以及吉勒·沃伦斯——他们都会在本书中看到自己的成果。

2002 年 4 月，我离开 Time Domain 公司开始做独立顾问。现在我有两个头衔，我的正职是 Q-Track 公司的首席科学家。Q-Track 是研究超宽带抗极化技术的先驱，Q-Track 公司的近场电磁分布（NFER<sup>TM</sup>）技术是一种低频（使用典型的调幅（AM）广播带宽）、窄带、高精度、射频追踪技术。NFER<sup>TM</sup> 跟踪系统可以实现室外 70m 范围内、精度为 30cm 的信号跟踪，以及室内 1m 范围内的信号跟踪。我也在 Huntsville-based Next-RF 公司兼职，担任咨询工程师和物理学家。我的咨询范围很广，近的有阿拉巴马州、田纳西州、佛罗里达州、马里兰州和加利福尼亚州的相关公司，远的有芬兰、韩国和日本。这些工作让我接触到更多有趣的事物，也让我面临更多的挑战。在本书中，我将与大家共同分享工作中的经验和教训。

2004 年 2 月，我在芬兰 Oulu（奥卢）无线通信中心开设了一个短期课程，本书就是在该



课程的基础上完成的。在 2004 年 IEEE 组织的天线与传播国际研讨会上，我对短期课程的材料进行了集中修订与扩展。我衷心感谢赞助者们支持，也感谢我的学生们对我提出的诚恳建议和批评。

很高兴能在 [h.schantz@ieee.org](mailto:h.schantz@ieee.org) 邮件中看到读者的反馈意见，这有助于我准备更完善的第 2 版（如果第 1 版产生了足够的影响力）。我尽力挖掘出一些古老的专利和天线方面的论文，但在查找过程中还是会不可避免地遗漏一些有趣的天线实例。对于我没有提到的超宽带天线，如果你认为值得讨论的话，请主动推荐给我。还有，本书还应该添加什么内容？本书的重点和缺陷有哪些？也请及时反馈给我。此外，我最近的工作和与本书相关的一系列活动可以随时在我的网站 [www.uwbantenna.com](http://www.uwbantenna.com) 上获得。

---

# 致 谢

我很感激我的合作伙伴鲍勃·德皮尔斯、詹尼·戈比和大卫·朗福，他们对我长年花费精力写这本书给予了包容和支持。事业的起步阶段是一个充满诸多挑战和挫折的冒险时期，但有幸与一个如此杰出的团队合作，我觉得所有的努力都是值得的。

我也很感谢伊恩·奥普曼给我们机会提出本书的粗略草稿，这一材料作为一个短期课程，于2004年1月为芬兰奥卢无线通信中心的研究人员开设。我永远忘不了罗瓦涅米的冰雪展，在 Iso-Syote 滑雪的场景，以及为拟定这本书的开始章节在奥卢公共图书馆——背景是看似永恒的黄昏笼罩的结冰的波罗的海——工作的经历。还要感谢 Ryuji Kohno 的支持，他提交了一篇论文，该论文得到了2004年5月在日本京都举行的超宽带系统国际工作组 (IWUWBS) 研讨会的邀请；感谢郭燮瓊 (Kyung Sup Kwak) 的支持，使我有幸在2005年6月在韩国仁川举行的超宽带无线电技术国际工作组研讨会上宣读了会议的特邀论文。

我非常感谢本书的早期读者：俄亥俄州州立大学的本·蒙克，Time Domain 公司的马克·博纳以及 Time Derivative 公司的凯·斯韦克，你们富有见地的分析和评论深化了这本书的内涵。特别荣幸地要提到 Time Domain 公司的海博·佛鲁纳，他不仅浏览了本书，还为本书配写索引。

本书的部分材料来自于我先前的许多会议论文和期刊文献。感谢 IEEE、克鲁尔学术出版社以及 CMP 媒体，他们允许我引用自己先前的工作成果，而这些成果的版权归他们所有。戴瑞·爱默生、刘国锋和吉勒·史密斯也大度地允许我从他们已经发表的成果中引用一些关键图表和结论。最后还要感谢地球图片杂志和福布斯的特殊帮助，他们允许我引用1945年福布斯封面上刊出的主题为林登布拉德的著名的超宽带电视天线插图，收费极其低廉。在收集本书写作材料的过程中对我有过帮助或合作的所有同事和杂志社，我也很高兴能在此说声谢谢，他们包括 Aetherwire and Location 公司无线通信中心、俄亥俄州州立大学电子科学实验室、新兴无线通信技术公司、LLC 公司、Next-RF 公司、Pulse-Link 公司和 Time Derivative 公司。我特别要感谢我的前任雇主——Time Domain 公司，它慷慨地允许我采用和援引我在该公司工作时的成果。

我还要特别感谢盖伦·沃勒莱特，他无偿制作了本书中介绍的大量有趣天线。盖伦也曾帮我关注了一些可用于业余无线电的天线设计。

最重要的是，我要感谢我的妻子巴巴拉·麦考利·施切尔兹，为了让我潜心完成本书的写作，她肩负了绝大部分的照顾孩子的工作。感谢你成为我的第一位读者和最细致的编辑，你的信任是我的动力，你的爱是我灵感的源泉。

---

## 作者简介

Hans Schantz 博士是 Next-RF 公司的顾问物理学家和工程师。他的研究领域涵盖了时域电磁学和高性能天线，尤其是在超宽带天线方面。作为一名很受欢迎且颇具魅力的名师，他主讲的关于超宽带（UWB）天线的短期课程已成为 IEEE 天线和传播领域国际讨论会中正式的特色课程，同时他还是 IEEE 的高级会员。关于 Hans Schantz 博士在超宽带（UWB）方面工作研究的更多信息，可以在他的网站（[www.UWBAntenna.com](http://www.UWBAntenna.com)）中获取。

Schantz 博士已经在美国物理学报、IEEE 宇航空间和电子系统会刊与 IEEE 天线和传播杂志上公布了他的工作成果。他已经完成了超过 12 篇的会议论文，拥有 10 项美国专利并有几项申请中的专利。Schantz 博士也是 Q-Track 公司的首席科学家，该公司是一家研究发展近场电磁测距技术的新兴公司。采用窄带低频技术，近场电磁测距可以得到非常精确的位置。该公司的更多信息可以浏览 [www.q-track.com](http://www.q-track.com)。

Schantz 博士在普度大学获得了工业工程学士学位和物理学课程荣誉学士学位。求学期间，他已在位于美国弗吉尼亚州马纳萨斯的 IBM 公司和位于加利福尼亚州利弗莫尔的劳伦斯利弗莫尔国家试验室实习过。在 E.C.G. 苏达山和约翰·A·惠勒的指导下，他获得了田纳西大学理论物理学博士学位。Schantz 博士的博士学位论文讨论了在电子和磁偶极子周围的电磁能量流，以及电抗性能量转换成辐射能量的过程。

Schantz 博士目前和他的妻子以及两个刚出生的女儿 Greta 和 Cora 居住在阿拉巴马的汉茨维尔。在科研工作以外的空闲时间里，他的爱好包括帮女儿换尿布、喂食和打饱嗝，但最大的嗜好还是蒙头大睡。

---

## 译者简介

吕文俊，1978年生，广东江门人。2006年10月毕业于南京邮电大学电磁场与微波技术专业，获工学博士学位，2008年江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象，2009年曾短期担任香港大学电气与电子工程系助理研究员，现为南京邮电大学通信技术研究所副教授、研究生导师；博士学位论文《小型平面超宽带天线的理论与设计》被评为2008年江苏省优秀博士学位论文，并获得2009年全国优秀博士学位论文提名。目前主持和完成各类教学和科研项目8项，另外作为技术骨干参与和完成“973”、国家自然科学基金等项目十余项；申请国家专利14项，其中已授权发明专利2项、实用新型专利1项；在IEEE Trans. Antennas & Propagation、IEEE Microwave & Wireless Component Letters、IET Microwaves, Antennas & Propagation、Electronics Letters等国内外刊物和会议上发表（录用）论文60余篇，SCI检索（源）17篇次，已见他人引用超过340次，单篇论文他引最高达65次；担任Electronics Letters、IET Communications、IET Microwaves, Antennas & Propagation、Journal of Electromagnetic Waves & Applications、International Journal of Electronics and Communications等刊物的审稿人；一直从事微波和天馈技术的教学和科研工作，主讲《电磁场数学方法》、《电磁场与电磁波理论》、《微波电路EDA》、《移动通信中的天线与电波传播》等课程，对小型超宽带天线有深入的研究。

# 目 录

## 第 1 章 超宽带 (UWB) 天线

### 简介 ..... 1

- 1.1 历史介绍 ..... 2
  - 1.1.1 火花间隙的先驱们 ..... 3
  - 1.1.2 短波与电视时代 ..... 10
  - 1.1.3 更近期的进展 ..... 13
- 1.2 天线是什么? ..... 19
  - 1.2.1 作为传感器的天线 ..... 19
  - 1.2.2 作为变换器的天线 ..... 20
  - 1.2.3 作为辐射器的天线 ..... 20
  - 1.2.4 作为换能器的天线 ..... 20
- 1.3 超宽带天线 ..... 21
  - 1.3.1 如何辨别超宽带天线 ..... 21
  - 1.3.2 超宽带天线的分类 ..... 22
  - 1.3.3 超宽带设备和系统 ..... 23
- 1.4 结论 ..... 23
- 参考文献 ..... 23

## 第 2 章 作为传感器的天线 ..... 27

- 2.1 带宽 ..... 28
  - 2.1.1 带宽的计算 ..... 28
  - 2.1.2 天线带宽的确定 ..... 29
  - 2.1.3 辐射带宽 ..... 29
- 2.2 色散 ..... 30
  - 2.2.1 色散天线的例子 ..... 30
  - 2.2.2 非色散天线的例子 ..... 31
  - 2.2.3 角度色散 ..... 32
- 2.3 能量向何处传播 ..... 33

- 2.3.1 天线方向图 ..... 34
- 2.3.2 天线的方向性系数、增益和孔径 ..... 36
- 2.3.3 方向图、增益和超宽带天线 ..... 39
- 2.4 极化 ..... 42
- 2.5 天线的匹配 ..... 43
- 2.6 作为传感器的天线 ..... 44
- 参考文献 ..... 44

## 第 3 章 作为变换器的天线 ..... 46

- 3.1 天线阻抗 ..... 46
  - 3.1.1 超宽带与窄带天线的阻抗 ..... 46
  - 3.1.2 天线阻抗的控制技术 ..... 47
- 3.2 传输线 ..... 49
- 3.3 从馈线过渡到自由空间 ..... 50
  - 3.3.1 双线过渡 ..... 50
  - 3.3.2 同轴线过渡 ..... 51
  - 3.3.3 平面传输线过渡 ..... 51
- 3.4 阻抗变换和匹配 ..... 54
  - 3.4.1 匹配 ..... 55
  - 3.4.2 阻抗变换 ..... 56
- 3.5 平衡线与不平衡线的连接 ..... 60
  - 3.5.1 扼流圈 ..... 61
  - 3.5.2 平衡—不平衡转换器 ..... 62
  - 3.5.3 兼容性 ..... 63
- 3.6 作为变换器的天线 ..... 64
- 参考文献 ..... 64

<b>第 4 章 作为辐射器的天线</b> ..... 66	
4.1 时域与频域.....66	
4.1.1 脉冲与正弦波.....66	
4.1.2 时域和频域的基本原理...67	
4.1.3 时域信号.....68	
4.1.4 时域与频域.....74	
4.2 麦克斯韦方程组.....74	
4.2.1 全局坐标系与滞后形式...75	
4.2.2 毕奥—沙伐定律与库仑定律的杰费明各 (Jefimenko) 形式.....75	
4.2.3 辐射的右手法则.....76	
4.3 线天线.....77	
4.3.1 线天线的行为.....77	
4.3.2 实例.....79	
4.3.3 小结.....84	
4.4 偶极场.....84	
4.4.1 电偶极场.....85	
4.4.2 磁偶极场.....86	
4.4.3 偶极子的行为.....86	
4.5 作为辐射器的天线.....91	
参考文献.....92	
<b>第 5 章 作为换能器的天线</b> ..... 94	
5.1 本章的动机.....94	
5.1.1 模型与现实.....94	
5.1.2 纽绞场线观点的谬误.....95	
5.2 电磁能量的存在位置.....96	
5.2.1 电磁能量简史.....96	
5.2.2 关于电磁能量的困惑和悖论.....98	
5.2.3 举例: 加速电荷.....100	
5.2.4 因果面.....101	
5.3 偶极场的能量.....102	
5.3.1 指数规律衰减的偶极子.....103	
5.3.2 阻尼时谐偶极子.....104	
5.3.3 时谐偶极子.....107	
5.3.4 时域激励..... 110	
5.4 最佳天线单元的设计..... 114	
5.4.1 “粗胖者佳”原则..... 115	
5.4.2 最佳的偶极子形状..... 116	
5.4.3 最佳的环形状..... 116	
5.5 天线尺寸的基准极限..... 117	
5.5.1 朱—哈林登极限..... 117	
5.5.2 麦克林极限..... 118	
5.5.3 超宽带情况下还有 $Q$ 值吗?..... 118	
5.5.4 超宽带实践中基于 $Q$ 值的天线极限..... 122	
5.5.5 基于能流的天线特性极限..... 125	
5.6 作为换能器的天线..... 129	
参考文献..... 130	
<b>第 6 章 UWB 天线的分类</b> .....133	
6.1 非频变天线..... 133	
6.2 电小天线..... 134	
6.2.1 锥形天线..... 134	
6.2.2 平面锥型天线..... 136	
6.2.3 球天线..... 139	
6.2.4 平面圆形天线..... 141	
6.2.5 小单元天线的一般设计原则..... 152	
6.2.6 小单元电型天线的总结..... 156	
6.3 小单元磁型天线..... 157	
6.3.1 大电流辐射器天线..... 157	
6.3.2 单环天线..... 158	
6.3.3 环形天线..... 160	
6.3.4 超宽带缝隙天线..... 162	
6.3.5 小单元磁型天线的总结..... 165	
6.4 电小天线..... 165	
6.4.1 天线的尺度缩放..... 165	
6.4.2 介质加载..... 166	
6.4.3 导体壳天线..... 166	

6.4.4	电—磁组合天线	167	7.1.3	天线与频谱控制技术	198
6.4.5	电小天线的总结	167	7.2	天线效率	198
6.5	喇叭天线	167	7.2.1	效率理论	199
6.5.1	锥板喇叭天线	168	7.2.2	效率测量	199
6.5.2	喇叭天线终端开口的 处理	170	7.3	天线的方向性	206
6.5.3	平面喇叭天线	171	7.3.1	全向与定向	206
6.5.4	其他喇叭天线	174	7.3.2	通过幅度比较实现方位 确定	207
6.5.5	喇叭天线的小结	175	7.3.3	小孔径超宽带方位确定 技术	208
6.6	反射面天线	175	7.3.4	应用	209
6.6.1	平板反射器天线	175	7.3.5	结论	211
6.6.2	角反射器天线	179	7.4	系统中的超宽带天线	211
6.6.3	抛物柱面反射器	181	参考文献		211
6.6.4	脉冲辐射天线	183	<b>第 8 章 结论</b>		214
6.6.5	反射器天线的小结	183	8.1	总结	214
6.7	本章小结	184	8.2	展望	215
参考文献		184	参考文献		216
<b>第 7 章 系统中的超宽带天线</b>		190	<b>附录 时谐偶极子的能量分布</b>		217
7.1	天线的频谱控制技术	190			
7.1.1	天线的尺度缩放	190			
7.1.2	天线滤波	191			

# 第 1 章

## 超宽带 (UWB) 天线简介

从威廉·克鲁克斯早期的预测，一直时至今日，无线电就以其神秘与魔力，一直让人浮想联翩。无线电的神奇，不禁让人理所当然地联想到要建立一种遍布在我们周围的、即时的无线通信方式。实际上，在我们身处的客观世界中，物质通过波动现象向我们传递着种种信息：语音、图像以及其他种种。无线电的魔力，就在于它能把这些波动现象所承载的信息从空间中采集下来，然后恢复出原始的信息。而天线正是实现这种神奇魔法的那根魔棒！

当然，无线电技术和天线并不是真的魔术。正如亚瑟·C. 克拉克所说，“任何足够先进的技术往往难以与魔术区别开来<sup>[1]</sup>。”无线电技术是电磁场科学应用在通信领域的一个很好的特例，某种程度上说，不理解无线电技术的要诀（或者想当然地仅仅把它作为一种技术），就会觉得它看起来与魔术一样神秘。而从某种角度衡量起来，天线又是无线电技术中最不为人所熟悉、显得最神秘的领域——一如克拉克对“魔术”所做的定义。于是，倘若天线真的如魔术般神秘，那么超宽带天线毫无疑问就是这种“黑色魔术”中最晦涩、最难懂的部分。

本书的目的，就是要用过硬的事实与合理的科学理论，揭开蒙在超宽带天线周围的神秘面纱。天线背后的基本理论是电磁场理论，而电磁场理论又是一种“定量”的科学。奥利弗·亥维赛对数学的定义是“数量的原理”<sup>[2]</sup>，天线特性的定量分析就需要数学的推导。通常这种详细而严格的推导对如何有效使用天线、相对简单地定性了解天线的基本工作原理并不显得很必要，因此本书力求引入尽可能少的数学推导来解释超宽带天线的特性。

超宽带天线不仅是一门严谨的科学，同时也具有其创造性的一面——它将基本的科学原理与适当的想象力合理地融合在一起加以提炼、衍生出新颖的单元天线结构。用亚里士多德的说法：所谓艺术，乃是某种思想的真谛在外部形态上的具体表现形式<sup>[3]</sup>。按照这种说法，超宽带天线的设计不仅仅是一门科学，同时也是一门艺术。正因如此，本书图文并茂地向读者展示了：天线设计师是如何将电磁场科学的真谛通过用不同形状的金属曲线和图形实现并表达出来的。

虽然近年来超宽带天线引起了研究人员极大的兴趣，但实际上超宽带天线家族的历史可以追溯到一个多世纪以前、无线电波刚刚被发现的年代。本章的主题，将从回顾历史、追溯超宽带天线的起源开始讨论。

因此，本书回答的第一个基本问题就是：什么是天线？根据提问者的观点不同，可能有 4 种不同的答案。

① 传感器：很多应用场合下，可把天线看作是将传输线上传递的能量转化成空间辐射能量（或实现相反过程）的黑盒子，本书第 2 章将解释这一观点。

② 变换器：然而，在某些情况下，又能把天线看作某种阻抗变换器（或“变压器”），它



将传输线的波阻抗与自由空间的波阻抗耦合起来, 本书第 3 章将解释这一观点。

③ 辐射器: 其他情况下, 经典电磁理论的观点显出了它的价值, 由此可知天线的定义是: 支持某种电流分布、并使之耦合到与之相关的电磁场的特定结构, 本书第 4 章将解释这一观点。

④ 换能器: 最后一种观点, 认为天线是把导波能量转化成辐射能量的装置, 如第 5 章所述。

第 1 章首先纵览上述的 4 种观点, 在接下来的第 2、3、4、5 章内容中依次集中讨论上述各个观点; 接下来, 在本章的开始先提出超宽带天线的简明分类, 这部分内容还将在第 6 章中深入介绍; 第 1 章的最后还将简单提及与超宽带天线应用相关的系统设计要点, 这部分内容将是第 7 章的主题。

读者们都愿意在轻轻松松的情况下, 尽可能根据自己的需要和专长读完本书的全部 8 章内容。在此不妨提出以下建议: 对于管理人员、非专业或者业余水平的超宽带天线设计者, 最好先回顾前两章, 然后浏览第 3~5 章, 直接阅读第 6 章“超宽带天线的分类”; 对于射频或系统工程师, 他们可能更倾向于先回顾前 3 章, 浏览第 4、5 章, 然后转入他们最关心的第 6 章“超宽带天线的分类”、第 7 章“系统设计要点”中去; 而对物理学家而言, 他们可能更为关心的是第 4、5 章中描述的电磁场与能量的传输过程……总之, 不论读者的侧重点如何, 我总是衷心希望: 每个阅读本书的天线工程师和设计师都能从本书所有章节中有所获益!

## 1.1 历史介绍

海恩里克·赫兹首次于 1888 年证实了电磁波的存在<sup>[4]</sup>。接下来的几年中, 克鲁克斯和其他研究人员就已经推测进行无线电报通信的可能性<sup>[5]</sup>。十余年后, 无线电报通信终于诞生了, 现代超宽带无线通信正是这种最简单的早期无线通信的嫡系后裔。因此, 若要追溯超宽带天线的起源, 就必须首先从无线电技术, 特别是天线技术的历史谈起。

要是用现代的标准来评价的话, 早期的无线电设备可谓简陋无比。由于缺少实用化的、能产生某种频率的连续信号波形的装置, 无线电技术的先驱们只能借助谐振回路充放电的现象实现通信, 他们那套简陋设备辐射的就是阻尼衰减的正弦脉冲, 用现代的眼光来看——这也是“超宽带”系统。

从有利于现代无线电通信发展的角度再回顾这段历史, 最早期的“火花放电间隙”式的无线通信方式竟如此诱人。但是, 这种利用火花放电间隙产生阻尼正弦脉冲的发射机的出现, 并不是通过严格设计得到的, 而是完全出自偶然。发射这种超宽带信号, 完全与出于某种意图而故意进行的扩谱技术无关; 相反地, 超宽带脉冲是在射频情况下产生正弦波时不可避免出现的某种“副产品”。窄带工作特性本来是先驱们需要达到的预期目标, 这种宽带信号反而是无意的发射产物——赫兹正是用谐振回路给谐振的窄带天线馈电, 又用另一个同样的窄带天线来检测信号。“窄带”的思想, 最早体现在 1892 年克鲁克斯的著作中: “任意两个居住在接收设备灵敏度最大半径范围内的朋友, 首先商定好他们所用的特定工作波长, 以便他们的接收设备能调谐到相应的频率上, 相互接收到对方的信号, 这样就可以随心所欲地通过控制脉冲持续的时间长短、发送莫尔斯码长短号, 实现他们之间的通信。”