

文章编号：1005-0388(2000)01-0097-04

# 世纪之交的天线技术<sup>\*</sup>

章文勋

(东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘要：**文中就线天线、面天线、阵列天线三条发展轨迹,介绍和评述天线技术面临廿世纪/廿一世纪之交的发展状况和趋势。

**关键词：**天线技术; 微带天线; 反射面天线; 智能天线阵; 移动通信天线

**中图分类号：**TN820      **文献标识码：**A

## The antenna technology faced to the 21-th century

ZHANG Wen-xun

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The recent progress and trend of antenna technology faced to the 21-th century are briefly reviewed in this article, according to three loci of wire antennas, aperture antennas, and array antennas respectively.

**Key words:** Antenna technology; Microstrip antenna; Reflector antenna; Smart antenna array; Mobile antenna

## 1 引言

近代电磁学经历了三百多年的发展过程。十九世纪到二十世纪初相继建立了电场高斯定理(1913)、磁通连续性原理和安培环路定律(1825)、以及法拉弟电磁感应定律(1831),经麦克斯韦方程组的数学归纳预示了电磁波的存在(1864),后被赫兹的著名实验所证实(1886),二十世纪由于马可尼试验越洋通信的成功而开创了无线电技术的新纪元。天线作为实现无线电应用的关键设备,顺应着通信、广播、雷达、制导等无线电应用系统在不同阶段的需要而不断发展,形式多样、性能各异,组成了庞大的天线家族,并突现出“线天线”、“面天线”、“阵列天线”三条平行的发展轨迹。

面临新千年的又一次世纪之交,昔今对比,天线的功能已从单纯的电磁波能量转换器件发展成兼事信号处理的系统;天线的设计已从用机械结构来实现其电气性能发展为机电一体化设计;天线的制造已从常规的机械加工发展成印刷和集成工艺。天线

学科与其它学科的交叉、渗透和结合将成为廿一世纪的发展特色。然而,要预测天线技术发展轨迹面向新世纪的延伸并非易事,笔者只是摘选近年来 IEEE 天线与传播国际会议的学术动态,应命编撰此文,供天线界同行参考和讨论。

## 2 无线通信全面地推动着天线技术的发展

无线通信作为信息社会的主要技术手段正日显重要。其信道容量的扩充、传输速率的提高、运行体制的兼容、服务方式的灵活等,促使其工作频段一再上拓,设备结构日趋小型,台站设施从点对点、一点对多点发展到移动和全球漫游。无线通信在本世纪九十年代的蓬勃发展,使以往始见于广播、导航、雷达、射电天文等“广义通信”领域中的天线专用技术,如今汇集于“狭义通信”系统,发挥其特殊的作用,使行业界限逐渐模糊。

在地面移动通信系统中,频谱利用正从 VHF、UHF 上升到微波和毫米波,网站结构有宏区、微区、

微微区、以及屋内通信。固定基台的天线设计已引进了电视广播天线的波束下倾和零点填充、以及辐射方向性图赋形等技术;其实现智能化(Smart Antenna)的研究被融入了测向跟踪、自适应置零抗干扰、数字波束形成空分多址等起源于导航、雷达、电子对抗的专门技术。移动手机的天线面临着更严峻的挑战,要求以低轮廓加载的小型化结构实现天线的基本功能;在紧凑空间内设计抗衰落的分集天线;实现双频段、双极化、双工作模式等多功能天线;符合能避免对人体辐射伤害的环保标准等等。

在卫星移动通信系统中,频谱利用正由 C—频段、Ku—频段提升至 Ka—频段(上行 30GHz/下行 20GHz)和 V/Q—频段(上行 49GHz/下行 39GHz),后者已有十几家外国公司向 ITU(国际电信联盟)提交了电波频道和卫星轨道的申请书。星载天线要求有极窄的“点波束”(十分之一度)群实施时序控制以覆盖指定的服务地区,其性能指标类同于射电望远镜或超分辨率雷达。地面车载天线是当前各国竞相开发的热点,多采取固态有源阵的空间功率合成和波束扫描跟踪技术,类似于对雷达天线的要求。地面手机或便携机天线则要求按“卫星/地面—通信”或“卫星—通信/全球定位”实现双模工作。

通信天线的这些发展趋势从一个侧面指出了廿一世纪初叶天线研究与开发的前景。

### 3 全方位开发的微带贴片天线独占鳌头

作为小型化、集成化的线天线主角,微带贴片天线以其三维结构的灵活性受到各种不同设计目标的全方位开发。它既被单独用于手机天线、医用辐射器等场合,也被广泛用作各种阵列天线的单元;既在工程设计中以型式多样而取胜,又多见于被电磁场数值分析用作典型实例。连年来在会议交流的以天线为主题的论文中,涉及微带贴片天线者约占四成之多。

微带贴片天线素以低轮廓、印刷工艺、便于与电路集成等优点著称,但又有频带窄和效率低的缺陷。另一方面,为了适合 VHF/UHF 频段的应用以及实现与微波毫米波单片电路的集成一体化,还需要进一步使结构小型化。再者,极化特性的多样化、适应宽角域波束扫描的要求,以及采用新型传输线馈电的可行性等,也都在探索之中。

#### 3.1 频带特性

近年来所开发并经优化设计的双层贴片和 U

型槽贴片无论在探针或槽孔耦合的馈电方式下都获得高达 40% 的阻抗匹配频带,使制约贴片频带的因素转化为辐射方向性和极化特性(仅达 20% 以上)。此外,微带贴片结构可实现(较窄频带的)双频或多频工作,其下一步目标是获得大频率比和可控频率比的双宽频带特性。

#### 3.2 极化特性

各种利用贴片形状微扰、切槽加载、多馈点组合等技术实现的圆极化天线在固定波束的角域内可提供宽频带、高极化纯度的性能。困难的是在宽频带、宽角域内保持高极化纯度,以适应固态有源相控阵辐射单元的要求。此外,为了用于极化分集或收发极化隔离的系统,已制成多种型式的双馈双(正交)极化微带贴片单元,但性能受制于阵列环境和馈线布局,其极化隔离度还有待改进。

#### 3.3 小型化

在较低频段(VHF/UHF)采用加短路片(或销)、切曲折槽、介质谐振器加载等技术措施,可做到 1 : 4 的缩尺率,但频带较窄、辐射性能有所降低。在微波毫米波单片集成系统中,高介电常数的基片迫使贴片的几何尺寸进一步缩小,困难转化为如何抑制相对电厚的基片中存在的表面波效应。将贴片嵌入导体腔或是给贴片围上短路销栅的措施不仅结构复杂、而且效果有限。近年来出现的“光电子带隙”PGB(Photonic Band-Gap)基片材料可以有效地抑制表面波,解除了用较厚基片的限制,兼奏提高天线增益、减弱阵元间互耦之效。

#### 3.4 馈线网络

采用探针或槽孔耦合的背馈方式将辐射部分与馈线部分借接地板隔开,是优先考虑的结构方案。微带线馈线网络会引入明显的导电损耗和色散性;非色散的带状线不便与电路集成一体;介质波导馈电的方案则另辟蹊径而受重视。空间功率合成的有源阵将各辐射单元直接与 T/R 组件连接,减少了馈线长度,接收通道的放大器还可补偿其传输损耗,将成为大规模阵列系统的发展主流。

### 4 经济大国竞相研制空间大型反射面天线

廿一世纪空间星载天线的主角将是可展式(Deployable)大型反射面天线,美、日两经济大国研制的样品即将陆续发射升空,其机电一体化设计达到非常高的水平。

#### 4.1 美国的可展式反射面天线

预定在2000年启用的地球同步轨道航天飞机将装载 $\phi 6m$ 以上的可展式天线,采用周向环箍结构取代传统的径向肋条结构,使表面精度(均方根)达到0.1mm。为先进射电干涉仪(ARISE)设计的 $\phi 25m$ 可展式天线采用双偏置的格利高里式,阵列馈源补偿加副面校正技术,表面精度达0.25mm,工作在8~86GHz。另一种膨胀可展式天线,其 $\phi 25m$ 的反射面在充气成形过程中存在分片接缝和负荷等设计难点,为此开发解“反问题”的FEM专用软片求得充气前的初始外形,其理论表面精度为1mm(经优化后可提高到0.2~0.05mm)。

#### 4.2 日本的可展式反射面天线

预定在2002年发射的工程试验卫星(ETS-8)将装载 $\phi 13m$ 的可展式天线,其表面精度为2.4mm,指向精度0.83°,工作在S波段。研制中的空—地长基线干涉仪(VLBI)工作于22/5/1.6GHz,将采用 $\phi 11m$ 的可展式天线。此外计划中的太阳能卫星(SPS 2000)的发射天线,离地高度1000km,在2450MHz点频工作,要求:半功率波束0.057°(有效照射区 $\phi 1km$ ),指向精度0.0057°,拟采用由57个单元组成的可展式反射面天线阵,总口径为132m×132m。

#### 4.3 建设中的大型反射面天线之最

美国国立射电天文台(NRAO)计划于1999年底建成世界上最大的整体式反射面天线(由2004片铝板拼接而成)Green Bank Telescope,口径面积为100m×110m(截割自 $\phi 208m/F60m$ 的抛物面),表面精度0.6mm;指向范围±270°方位/(5~95)°俯仰;口径效率45%~69%,系统噪声20~70K;副瓣电平-30dB,交叉极化电平-40dB;工作频段分为0.29~1.20GHz主焦式/1.15~100GHz格利高里式。美国麻省大学与墨西哥合建世界上最精密的大型毫米波射电望远镜(LMT)采用了 $\phi 50m$ 的卡塞格伦式反射面天线,表面精度达 $69\mu m$ ,指向精度0.7arcsec;工作频段的上限达300GHz,口径效率65%,副瓣电平-20dB。美国研制的超宽频带(70:1)同轴波导馈源按四层套装,将0.60~42.0GHz分成四个子频段。此外,美国喷气推进实验室(JPL)开发了在并行超级机上运行的“毫米波光学设计软件”(MOD Tool),可根据输入的结构和热环境的数据自动分析多重反射面天线系统。

#### 5 智能化是阵列天线发展的必然趋势

天经阵各单元的馈点幅相激励是控制其辐射方向性的可变参数。当天线阵处于复杂而变化中的环境时,要求其幅相激励作相应的实时调整,以保持最合理的辐射特性:主波束瞄准并跟踪目标波源、干扰波源方向的辐射最弱、获得最大可能的信号/干扰及噪声比值等。如何确定各种波源的方向或位置、如何据此确定应调整的幅相分布、又如何(在射频电路或最好在数字信号处理器中)实现这样的调整?这就需要动态的自适应技术。为了服务于多个目标波源、并提高对目标方向的增益和分辨率,又需要多波束形成技术。随着通信信道的快速增加、以及通信方式的多媒体化,对天线阵还提出了宽频带自适应和宽频带多波束形成的技术要求。目前,自适应和数字多波束形成技术各自在雷达和某些军事通信系统中已得到成功的应用;在民用移动通信系统中的应用尚处于实验开发阶段,主要受限于结构小型化的技术困难和成本过高。然而,这种未及成熟的状况所提供的机遇吸引了广泛的研究兴趣,形成天线技术发展的热点之一。其中包括:用空间谱估计的MUSIC算法测定来波方向,空间—时间自适应处理,神经网络法测向技术,遗传算法用于最优幅相控制,共轭梯度法用于自适应波束形成,极化自适应技术等等。

#### 6 快速计算和优化设计是数值方法的两个支点

天线性能的理论分析所依赖的电磁场数值方法仍以积分方程的矩量法为主,对于含介质基片的印刷天线则辅以谱域技术,对于宽频段或辐射瞬变脉冲信号的天线可采用时域有限差分法。对常规结构的天线已有较充分的分析,并有多种商品化软件可资利用。对复杂的非常规结构以及电大尺寸的有限阵列天线,其计算量过于庞大,由此促进了各种快速算法的兴起。快速多极子法(FMM)异军突起,并结合其它算法相继发展了多层次FMM、并行FMM、最陡下降FMM、共轭梯度FMM等。此外,小波变换用于较小电尺寸的情况,阻抗矩阵局域化适合光滑表面的结构,各种迭代技术也频频应用。

尽管各种以“模拟器”或“引擎”命名的电磁场分析软件可以算出特定结构尺寸的天线性能;然而为了达到所要求的性能,对选定的天线结构设计出优化的尺寸仍需要冗长而枯燥的计算过程,还可能达不到真正的最优化目标。近年来遗传算法的引入使

实现全局优化的目标有了通用的程式,结合矩量法的分域基处理,使优化的效果甚至超出了人工选定结构的约束。更有甚者,还可借助人工神经网络的自学功能来加速遗传算法的优化收敛性。对此,连年来国际会议都设有专题分组,吸引众多代表听讲和讨论。

## 7 结束语

综上国际学术动态,对比国内的研究进展和开发利用,原先存在的差距似有拉大的趋势。究其原因,研究条件的明显落后表现在:缺乏原版书刊及时提供第一手信息、和计算机网上检索受高价位的限制;缺乏先进的商品化软件、且已有的软件未被充分

利用;测试手段普遍落后于国外的同类单位。对此需要在政策上进行协调,强化开放、资源共享,并增加投入、创造条件。研究队伍的悬殊差距归结为人才流失;一进一出,国内培养的优秀人才大量变成国外的生力军和中坚力量;人才政策中的年龄歧视和不公平竞争不利于调动普遍的积极性,也不利于青年人才的健康成长。

面对跨世纪的技术挑战、以及在国际学术界的严酷竞争,需要国内天线界齐心协力、勤学奋进;也期待着能有协调的政策、改善的条件、以及更多健康成长的新生力量。

# 世纪之交的天线技术

作者: 章文勋, ZHANG Wen-xun  
作者单位: 东南大学毫米波国家重点实验室,南京,210096  
刊名: 电波科学学报 **ISTIC EI PKU**  
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE  
年,卷(期): 2000, 15(1)  
被引用次数: 33次

## 引证文献(33条)

1. 赵明洋. 雷雪. 张广求. 尚济勇. 杨文君 一种新型宽带圆极化微带反射阵天线设计 [期刊论文]-微波学报 2013(1)
2. 丁东. 陈明清. 肖鹏 微带单极子狭缝天线单向辐射特性分析 [期刊论文]-湖北大学学报(自然科学版) 2013(1)
3. 吴启铎. 张广求. 任帅 堆叠H形多频段微带天线 [期刊论文]-现代雷达 2010(11)
4. 吴启铎. 张广求. 任帅 一种双U形缝隙加载的分形多频天线 [期刊论文]-信息工程大学学报 2010(3)
5. 林炫龙. 姜兴 Ku波段宽频带双极化微带天线阵的设计 [期刊论文]-微计算机信息 2008(7)
6. 林炫龙. 姜兴. 李思敏 一种十字形缝隙耦合的Ku波段宽频带双极化微带天线 [期刊论文]-现代电子技术 2007(17)
7. 汪伟 宽带印刷天线与双极化微带及波导缝隙天线阵 [学位论文]博士 2005
8. 邵世祥. 梅辉. 吴志忠 多波束智能天线改善GSM系统中断率的研究 [期刊论文]-电波科学学报 2003(5)
9. 朱晓维. 何晓晓 用于W-CDMA移动终端的开槽微带双频贴片天线设计 [期刊论文]-无线电工程 2002(12)
10. 曾会勇. 安建. 曾卫东. 马洪远 新型缝隙加载宽频微带天线 [期刊论文]-空间电子技术 2010(1)
11. 冷国俊. 王伟. 白前 天线最佳吻合轴向误差的精确计算方法 [期刊论文]-电波科学学报 2009(5)
12. 王从思. 段宝岩. 仇原鹰. 邵晓东 大型面天线CAE分析与电性能计算的集成 [期刊论文]-电波科学学报 2007(2)
13. 王从思. 段宝岩. 仇原鹰 天线表面误差的精确计算方法及电性能分析 [期刊论文]-电波科学学报 2006(3)
14. 刘波. 金荣洪. 范瑜. 耿军平 用于波束形成的最小二乘广义模值算法研究 [期刊论文]-电波科学学报 2005(3)
15. 戚冬生. 黎滨洪. 刘海涛. 张亚斌 缝隙加载H形双频天线 [期刊论文]-电波科学学报 2004(1)
16. 李颖 均匀圆阵列天线系统性能分析 [学位论文]硕士 2004
17. 冯彬. 廖安谋. 苏东林 一种双频微带天线方案的分析与设计 [期刊论文]-吉林大学学报(信息科学版) 2002(1)
18. 林斌. 林森. 张循. 林庆炜. 刘钰伟. 黄文婷 射频识别系统微带蝙蝠翼天线设计 [期刊论文]-电子产品世界 2013(4)
19. 朱赟恩. 杨明武 一种阶梯型双层微带贴片天线的优化设计 [期刊论文]-合肥工业大学学报(自然科学版) 2012(10)
20. 邱朝生. 朱人杰. 曲仁慧 基于PSO-PTS算法的E形双频微带天线设计 [期刊论文]-吉林大学学报(信息科学版) 2009(5)
21. 葛琳. 赵惠玲. 沈楠 一种新型双频微带天线的设计与仿真 [期刊论文]-电子测量技术 2007(8)
22. 苏力 半孔径天线阵的可实现性理论研究 [期刊论文]-电波科学学报 2004(3)
23. 衡伯军 双锥天线电磁特性分析与计算 [学位论文]硕士 2004
24. 赵旭 第三代移动通信基站天线设计与实现 [学位论文]硕士 2006
25. 程月波. 金荣洪. 耿军平. 刘波 平流层通信系统的收发链路性能研究 [期刊论文]-电波科学学报 2005(5)
26. 寇艳玲 ETS-8卫星相控阵馈电大型可展开天线 [期刊论文]-无线通信技术 2001(2)
27. 李萍 UHF平面直立H形印制天线的研究 [学位论文]博士 2005

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>