

介质谐振器天线的研究进展

于晓乐 倪大宁 张福顺

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要 文章全面论述了介质谐振器天线的最新研究成果。首先介绍了介质谐振器天线的工作原理、优点及其应用;进而归纳了该天线的理论分析方法;最后详细讨论了介质谐振器天线的研究热点和发展趋势。

主题词 介质谐振器天线 圆极化天线 宽频带天线 双极化天线 天线阵

1 引言

随着无线通信事业的飞速发展,对于天线的小型化、宽频带、低损耗等性能提出了更高的要求。虽然各种各样的微带天线因其低轮廓、质量轻等优点,已经得到了深入的研究和广泛的应用,但由于在高频段金属欧姆损耗高和在低频段天线几何尺寸大这两个关键性技术瓶颈的存在,其发展和应用受到了一定的限制。近年来,一种新型天线——介质谐振器天线由于良好的性能而受到了广泛的关注和研究^[1~17]。

介质谐振器已广泛应用于滤波器、振荡器等多种微波元器件中,但直到1983年,S.A.Long等人的研究结果才表明^[2~3],在选择适当形状、介电常数以及馈电方式的情况下,介质谐振器可以作为天线来使用。两种常见的介质谐振器天线结构如图1所示。

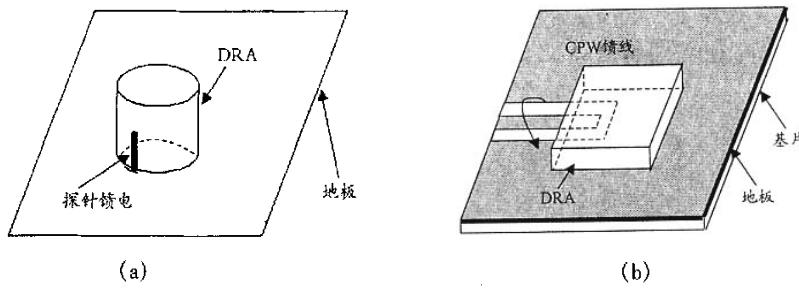


图1 两种常见的介质谐振器天线(a)探针馈电(b)CPW馈电

通过介质谐振器和金属腔体谐振器的对比,可以理解介质谐振器天线的工作原理。对于金属腔体谐振器,由于理想电壁的存在,不向外辐射能量;而处于自由空间中的介质谐振器,当工作于辐射模式时,向外辐射电磁波,因而可以作为天线单元来使用。

介质谐振器天线(DRA)的优点包括:

- 可以采用多种激励方式(探针、微带线、微带缝隙、共面波导、波导缝隙等),并可以设计成各种形状(矩形、圆柱形、球形、环形等),因此适用于平面集成电路,且设计灵活。
- 天线尺寸较小,大约为 $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 数量级(λ_0 是自由空间的波长, ϵ_r 是谐振器材料的相对介电常数)

数),因此其尺寸会随着材料介电常数的增高而大大减小。但值得注意的是,其Q值会随着材料介电常数的增大而增大,这相应的会减小天线的带宽。

·由于不存在导体损耗和表面波损耗,其辐射效率很高(可达95%以上),且在DRA阵列中单元间的互耦较小。

·每种DRA模式都有特定的内部和相应的外部场分布,通过激励起不同的模式可以获得不同的辐射方向图。图2所示为一种C波段圆柱形介质谐振器天线E面、H面归一化场强方向图^[17]。

·通过适当的选择天线几何参数、介电常数和馈电点位置,可以获得宽频带效应。

·功率容量高。

由于以上优点,介质谐振器天线已广泛应用于Bluetooth、PHS、WLAN等通信系统中,并在雷达系统、移动卫星通信、相控阵天线等诸多领域显示出潜在的应用价值。

文章总结了介质谐振器天线的理论分析方法和研究热点,并对其未来的发展趋势进行了展望。

2 理论分析方法

介质谐振器天线的理论分析方法大致可以分为两类:(1)简化分析模型;(2)全波分析方法。

(1)简化分析模型的原理是引入一个或多个有效而合理的近似来简化问题。对于介质谐振器天线,最常用的是谐振腔体模型。S. A. Long等人最初的研究基于磁壁边界条件(magnetic wall boundary condition)^[2]。这种方法假定了一个无限大的地板、进而使用了镜像原理,并假设介质谐振器天线的表面均为理想导磁体,通过计算谐振器表面的等效磁流解析得到天线的远场方向图;随后,又对这种模型进行了修正^[3],将天线的四周仍设为理想导磁体,而上下2个面的切向场连续。这种模型能够比较简单粗略地计算天线方向图,但在计算阻抗和谐振频率时能力有限。

(2)全波分析方法,即以严格方法计人介质基板影响而得到天线的全波解。这种方法又可以分为频域分析和时域分析两种。频域方法主要包括矩量法^[4]和有限元法^[5];时域方法则包括时域有限差分法^[6]和时域传输线矩阵分析法^[7]等。

矩量法是一种经典的全波分析方法。这种方法通常采用镜像法,假定基片在横向尺寸上为无穷大,并在介质与介质界面上加上了适当的边界条件,对介质基板使用精确的Green函数,因此考虑了空间辐射、表面波模式、介质损耗以及外部单元的互耦,具有准确性、完整性、通用性的特点。对于Green函数,通常采用模式匹配法进行求解,进而采用Galerkin法求出电流分布。而K. W. Leung等人采用了新的递推关系来简化运算,有效地解决了奇点问题并减少了计算时间。

尽管矩量法能够精确地计算出介质谐振器天线的方向图和阻抗特性,但这种算法在处理矩形、三角形等结构上运算复杂。而FDTD算法从描述电磁场普遍原理的Maxwell方程出发,以差分原理为基础,依时间步采用蛙跳算法进行迭代计算,在每一个时间步交替地计算空间每一个离散点的电场和磁场,数值模拟电磁波的传播与媒质的相互作用。因此,它是对电磁场问题最原始、最本质、最完备的数值模拟,具有最广泛的适用性。随着计算机硬件性能的提升和理想匹配层(PML)等吸收边界条件(ABC)的出现,该方法作为一种典型的时域全波分析方法开始在复杂结构天线的计算和复杂电磁问

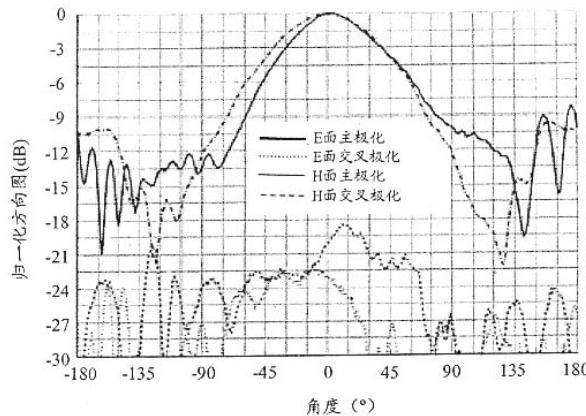


图2 一种C波段圆柱形介质谐振器天线的E面、H面方向图

题的分析上得到广泛应用,已用于 DRA 天线单元的设计和阵列单元间互耦的计算。

虽然有限元方法在文献中出现较少,但 Ansoft HFSS 软件这一成熟的商用软件包就是以有限元方法为核心的。近几年在介质谐振器天线的研究工作中,大部分文献都是采用 Ansoft HFSS 软件来进行仿真分析的。

3 介质谐振器天线领域的研究热点

3.1 圆极化介质谐振器天线

由于圆极化波入射到金属导体面(平面、球面等)时具有旋向逆转的反射特性,在移动通信和 GPS 定位系统中被广泛采用;同时圆极化天线可以接收任意极化的来波,而其辐射波也能被任意极化的天线收到,该特性在电子侦察和电子干扰中也被普遍使用。而在通信、雷达的极化分集工作和电子对抗等领域中,圆极化天线的旋向正交性也被广泛采用。获得圆极化的关键是激励起 2 个极化方向正交、幅度相等、相位相差 90° 的线极化波。

对于介质谐振器天线,为了实现圆极化,通常采用两点馈电的方式。但由于这种方式使得系统结构复杂而又插入损耗高,因此又提出了单点馈电圆极化天线。图 3 为两种单点馈电圆极化 DRA 的实现方式^[8~9]。图 3(a)中 2 个共形加载贴片相距 180° ,而微带线和其中一个共形贴片相距 45° ,通过合理设计可激励起 2 个相位相差 90° 的正交模式,从而实现圆极化;对于矩形 DRA,可以在其顶部添加加载贴片产生圆极化电磁波。图 3(b)采用了十字交叉缝隙馈电,合理设置馈电缝隙的轴比,可以产生左旋或右旋圆极化波。采用 2 个线极化天线单元实现圆极化的研究工作也可见于文献[10],其关键在于馈电网络的设计,让 2 个天线单元得到幅度相等、相位相差 $\pm 90^\circ$ 的激励信号,获得左旋/右旋圆极化。

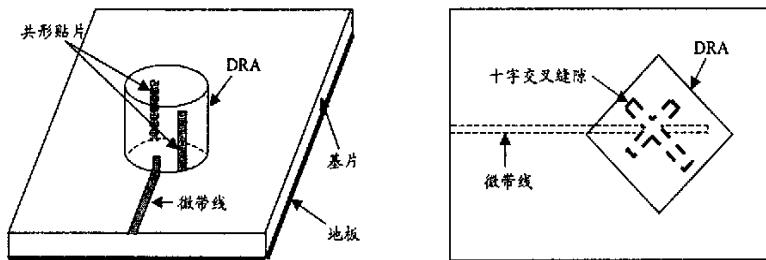


图 3 圆极化 DRA 的实现方式(a)采用共形贴片(b)十字交叉缝隙耦合馈电

3.2 宽频带介质谐振器天线

图 4(a)所示天线由环形介质谐振器和单极子天线组合而成^[11]。单极子天线工作在低频段,既是辐射体,又相当于负载单元;而介质谐振器天线工作于高频段。通过选择适当的天线尺寸,该天线可以达到 3:1 的带宽。图 4(b)为一种使用了负载贴片的宽频带天线^[12]。由于负载贴片自身产生的分布电感以及负载贴片之间和与地板产生的分布电容,使得介质谐振器天线工作于双谐振模式,从而产生了宽频带效应。

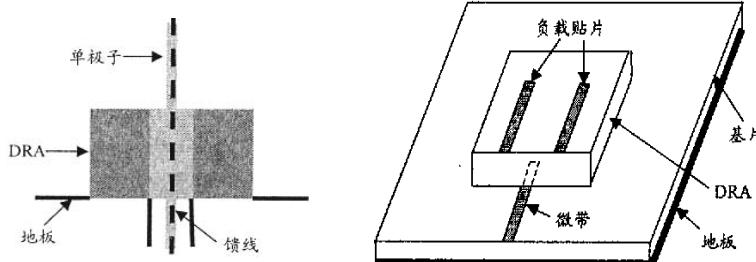


图 4 宽频带 DRA 示意图(a)DRA/单极子混合型天线(b)添加负载贴片的 DRA 天线

通过附加寄生天线单元,也可以提高 DRA 天线的频带特性。通常的方法是在介质谐振器天线旁边放置 2 个寄生 DRA。通过调节寄生谐振器天线的尺寸和单元间距,使寄生 DRA 通过单元间的互耦效应工作于不同的谐振模式(谐振频率),起到展宽频带的效果。

3.3 双极化介质谐振器天线

双极化天线能够接收和发射 2 个正交极化的电磁波,因此在同一频带内,天线可以发射或接收两种信号,从而有利于频率复用和收发同时工作。在移动通信中采用双极化天线($\pm 45^\circ$ 极化),可以抗多径传输;在卫星通信与 GPS 系统中使用双极化天线,可以实现地面/卫星通信双模工作。

文献[13]介绍了两种微带线馈电的双极化天线,但 2 个输入端口的带内隔离度只有 20dB。图 5 所示为一种高隔离度双极化介质谐振器天线^[14]。两条馈线处于正交方向上,从而可以激励起 2 个正交的线极化波(正交极化工作模式)。这种天线的带内隔离度大于 35dB,交叉极化大于 20dB,增益为 5.5dB,性能良好。

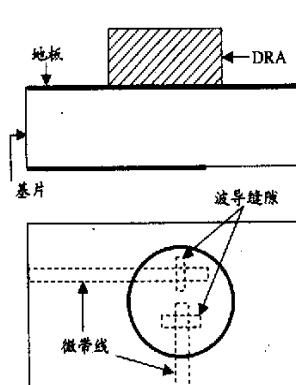


图 5 一种微带缝隙馈电双极化 DRA

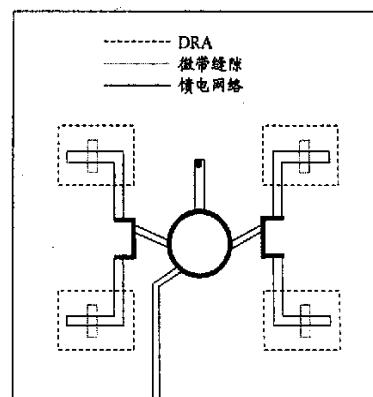


图 6 一种微带缝隙馈电 DRA 平面阵列

3.4 介质谐振器天线阵列

目前,大量的研究工作是针对介质谐振器天线单元开展的。但单个天线的增益只有 5dB 左右,在很多应用中需要更高的天线增益,而介质谐振器天线因其尺寸小而适于组阵。天线阵列的研究集中于直线阵列和平面阵列。平面阵列的研究大多集中于 2×2 的子阵列^[15],如图 6 所示为一种微带缝隙馈电 DRA 平面阵列。该阵列的增益可达 10dB 左右,比单个天线的增益提高了大约 5dB。通过排列成更大的天线阵列,可以获得更高的增益。还可将天线单元通过微带或缝隙串联馈电的方式排列成直线阵列获取高增益全频带性能,并将该直线阵列排列成平面阵列,加入移相器和低噪声放大器,构成低剖面有源相控阵天线^[16]。

4 结 论

虽然介质谐振器天线可以设计成多种形状,如矩形、圆柱形、球形、三角形、金字塔形、十字交叉形等,但由于矩形和圆柱形介质谐振器天线加工简单且馈电形式多样,因此仍然是研究和应用的主流。

而同时值得注意的是,这种天线也有其固有的缺点,诸如:尺寸较小故对加工工艺要求高而且不易调谐,材料介电常数相对较高因此价格较为昂贵等。

本文对介质谐振器天线作了全面的论述,重点介绍了该天线领域内的理论分析方法和研究热点。早期的研究通常采用简化分析模型对天线进行分析,而随着计算机技术的发展和各种数值计算方法的出现,目前主要采用 FDTD 等算法和 Ansoft HFSS 等仿真软件进行研究。由于介质谐振器天线具有尺寸小、频带宽、效率高、结构简单等微带天线所不及的优势,因而具有良好的发展前景。随着研究的

深入和工艺的提高,介质谐振器天线必将取得更加广泛的应用。

参考文献

- 1 Wong Kinlu. Planar antennas for wireless communications. John Wiley & Sons. New York. USA. 2003
- 2 Long S A, McAllister M W, Shen L C. The resonant cylindrical dielectric cavity antenna. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Vol. 31, No. 3: 406 ~ 412, Apr. 1983
- 3 McAllister M W, Long S A, Conway G L. The rectangular dielectric resonator antenna. Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 21: 696 ~ 699, May 1983
- 4 Kishk A A, Zunoubi M R, Kajfez D. A numerical study of a dielectric disk antenna above grounded dielectric substrate. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 41, No. 6, June 1993
- 5 Sheng S Q, Leung K W, etc. Analysis of waveguide - fed dielectric resonator antenna using a hybrid finite element method/moment method. IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol. 151, No. 1: 91 ~ 95, Feb. 2004
- 6 Shum S M, Luk K M. Analysis of aperture coupled rectangular dielectric resonator antenna. Electronics Letters, Vol. 30, Issue. 21, Oct. 1994
- 7 Dhouib A, etc. TLM analysis of rectangular dielectric resonator antennas. Antennas and Propagation Society International Symposium. Vol. 1: 18 ~ 23, June 1995
- 8 Lee M T, Luk K M, Ying E K N, etc. Circularly polarized dielectric resonator antenna with a microstrip feed. Asia Pacific Microwave Conference, Vol. 3: 722 ~ 723, Nov. 1999
- 9 Huang C Y, Wu J Y and Wong K L. Cross-slot-coupled microstrip antenna and dielectric resonator antenna for circular polarization. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 5: 605 ~ 609, Apr. 1999
- 10 Huang C Y, Wong K L, Yang C F, etc. Planar array composed of two linearly polarized dielectric resonator antenna for circular polarization. Microwave Opt. Technol. Lett., Vol. 21: 323 ~ 324, June 1999
- 11 Mapierre L, Antar Y M M, Ittipiboon A ,etc. Ultra wideband monopole/dielectric resonator antenna. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. Vol. 15, No. 1: 7 ~ 9, Jan. 2005
- 12 Hsiao F S, Kuo J S, Chiou T W, etc. A very-high-permittivity broadband dielectric resonator antenna for WLAN applications in the 5.2GHz Band. Microwave Opt. Technol. Lett., Vol. 32: 426 ~ 427, Mar. 2002
- 13 Huang C Y, Chiou T W and Wong K L. Dual-polarized dielectric resonator antennas. Microwave Opt. Technol. Lett., Vol. 31, No. 5: 222 ~ 223, Nov. 2001
- 14 Guo Yongxin and Luk Kwai-Man. Dual - polarized dielectric resonator antennas. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 5: 1120 ~ 1123, May 2003
- 15 Gentili G B, Morini M and Selleri S. Relevance of coupling effects on DRA array design. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 3: 399 ~ 404, Mar. 2003
- 16 Petosa A, Larose R, Ittipiboon A, etc. Active phased array of dielectric resonator antennas. International Symposium on Antenna and Propagation Digest: 690 ~ 693, 1997
- 17 Esselle K P, Bird T S. A hybrid-resonator antenna: experimental results. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 2: 870 ~ 871, Feb. 2005

作者简介

于晓乐 1981年生,2003年毕业于西安电子科技大学电子信息工程专业,现在西安电子科技大学攻读硕士学位。主要研究兴趣为天线分析与设计、无线通信技术。

倪大宁 1981年生,2003年毕业于西安电子科技大学电子信息工程专业,现在西安电子科技大学攻读硕士学位。主要研究兴趣为现代微波滤波器的优化与设计。

张福顺 1960年生,西安电子科技大学教授,博士生导师。主要从事天线和微波技术的研究和教学工作,主要研究方向为天线近、远场测量技术和天线理论与工程。

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)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)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)，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>