

综述

特征模在超宽带和多输入多输出天线设计中的应用

王辉, 杨雪松

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

摘要: 特征模理论通过分析天线的特征值, 把表面电流分解成相应的特征电流, 并可进一步得到天线的特征方向图。它可以从物理本质上研究天线的辐射机理, 从而有效指导天线设计。在简要介绍了特征模理论之后, 详细说明了它在超宽带天线和多输入多输出天线的分析设计方面的应用, 并指出了它的应用前景。

关键词: 特征模理论; 超宽带天线; MIMO 天线; 多天线

中图分类号: TN820 文献标识码: A 文章编号: 1673-5692(2012)05-477-06

Application of Eigenmode Theory in Design of Ultra-Wideband (UWB) and Multi-Input Multi-Output (MIMO) Antennas

WANG Hui, YANG Xue-song

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: By analyzing the eigenvalues of antenna, the eigenmode theory decomposes the surface current of antenna into a series of orthotropic eigencurrents, and further provides the eigenpattern. Thus, this theory can provide physical insights into the radiation mechanism of antennas and guidance to the antenna design. In this paper, a review of eigenmode theory is described. Then, a detail introduction to the application of eigenmode theory in the analysis and design of ultra-wideband (UWB) antennas and multi-input multi-output (MIMO) antennas is provided. The future of this method in the analysis and design of antennas is indicated.

Key words: eigenmode theory; ultra-wideband antenna; MIMO antenna; multiple-antenna

0 引言

不断提高通信系统的通信容量和质量, 是无线通信的永恒主题。根据香农定理, 通信容量与信道的带宽和信噪比有关。因此要实现高的数据传输率, 可以从展宽频带和提高信噪比这两方面考虑。采用超宽带(UWB)技术和多输入多输出(MIMO)技术在提高数据传输率方面, 具有极大的潜力, 因此近年来得到了快速发展。超宽带技术的工作频带

非常宽(美国联邦通信委员会定义的民用带宽为3.1 GHz ~ 10.6 GHz), 它不但能够充分地利用频谱资源, 而且还具有对其他通信设备影响低、保密性好等优点^[1]; MIMO 技术能有效提高通信系统的信噪比, 提高信道容量及抑制信道衰落^[2]。

高性能的天线是保障通信系统整体质量的基本要求, 不同的通信系统对天线性能的要求并不相同。UWB 通信一般要求天线具有较宽的阻抗带宽, 且在工作频率范围内保持良好的线性相位, 具有稳定的辐射方向图, 保持较高的工作效率, 在手持设备中还要

求具有较小的体积,某些场合还要实现陷波(进一步降低对其他通信设备的干扰)功能^[3,4]。而MIMO天线由多个天线单元构成,要求单元之间的互耦较低,以此来实现各路信号之间的低相关性。对于移动设备来说,需要多单元集成在一起,以减小整个天线的尺寸,因此设计中重点考虑的是在保证天线性能的同时提高天线之间的隔离度及设计高集成的天线系统^[5,6]。

为了设计出性能优良的UWB天线和MIMO天线,首先要选用恰当的方法来分析天线的表面电流。天线分析方法主要有解析法和数值法。解析法包括分离变量法、正交函数展开法、镜像法、格林函数法等,它们具有明确的物理图景,能得出精确解,但只能求解比较简单的问题。数值法包括差分法、时域有限差分法(FDTD)、矩量法(MOM)、有限元法(FEM)等,这类方法不但能解决复杂形状求解域的电磁问题,而且计算速度快,适用范围广,能对工程问题给出足够精确的解^[7],但是却不能从物理机理上对研究对象进行解释,即知其然不知其所以然,因此不适合于根据特定需求来进行天线设计。

如果有一种方法,既能够给出物理图像,又能够解决比较复杂的电磁问题,那么它将有利于指导天线的设计。R. J. Garbacz和R. F. Harrington等人在矩量法的基础上提出用特征模理论(characteristic modes theory, eigenmode theory)来分析物体的散射、辐射性质^[8~13]。特征模理论兼顾了解析法和数值法的优点:既能给电磁问题以物理解释,又能求解复杂边界的电磁问题并给出高精度的解。虽然特征模法脱胎于矩量法,但又不同于矩量法把全域基或者分域基作为展开函数,它以物体的本征模作为展开函数来对待求问题进行处理。这样处理的方便之处在于,物体的特征模直接反映了其自然谐振本性,该参数只与物体的几何特性有关,和激励源及工作频率无关,这使得特征模法非常灵活,在天线分析设计等方面有着独特的优势。

1 特征模理论

虽然Garbacz等最先提出特征模理论^[8,9],但Harrington等对其完善及推广做出了重大的贡献^[10],本节内容主要参考后者的论文。

对于理想导体系统,其表面电流及入射电场满足式(1)。

$$[L(\mathbf{J}) - \mathbf{E}^i] \times \mathbf{n} = 0 \quad (1)$$

式中, \mathbf{J} 表示导体表面电流分布; \mathbf{E}^i 为入射电场; \mathbf{n} 表

示导体表面外法线方向。算子 $L(\cdot)$ 为

$$L(\mathbf{J}) = j\omega A(\mathbf{J}) + \nabla \Phi(\mathbf{J}) \quad (2)$$

式中, $A(\mathbf{J})$, $\Phi(\mathbf{J})$ 分别为待求体系的磁矢势及电位势。

令 $Z(\mathbf{J}) = \mathbf{n} \times L(\mathbf{J})$, 根据互易定理可知 $Z(\cdot)$ 为对称算子但不是厄尔米特算子。按式(2)对 $Z(\cdot)$ 分解,

$$Z(\cdot) = R(\cdot) + jX(\cdot) \quad (3)$$

则可得到如下的两个实对称算子,

$$R(\cdot) = \frac{Z(\cdot) + Z^*(\cdot)}{2}$$

$$X(\cdot) = \frac{Z(\cdot) - Z^*(\cdot)}{2j} \quad (4)$$

为了确定 $Z(\cdot)$, 定义本征值方程为

$$Z(\mathbf{J}_n) = v_n M(\mathbf{J}_n) \quad (5)$$

式中, v_n 为特征值; $M(\cdot)$ 为待确定的加权算子, 取 $Z(\cdot) = M(\cdot)$ 。下面可以看到这样选取可使不同特征电流的方向图相互正交。将式(5)进一步化为

$$[R(\cdot) + jX(\cdot)](\mathbf{J}_n) = v_n R(\mathbf{J}_n) \quad (6)$$

令 $v_n = 1 + j\lambda_n$, 代入式(6)得

$$X(\mathbf{J}_n) = \lambda_n R(\mathbf{J}_n) \quad (7)$$

$R(\cdot)$ 和 $X(\cdot)$ 均为实对称算子, 所以 λ_n, \mathbf{J}_n 均为实数, 且不同的特征向量 \mathbf{J}_n 相互正交。由式(7)也可看出 λ_n 的物理意义为物体储能和辐射能量的比值, 其值越小, 代表导体辐射能力越强, 反之越弱。再定义特征角 α_n ,

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (8)$$

可见, α_n 等于或接近 180° 时, 导体辐射能力最强, 等于或接近 90° 或 270° 时辐射能力最弱。

“定义向量 \mathbf{A}, \mathbf{B} 的对称积为化处理,” $\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \oint_s \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \, ds$, 且令 $\langle \mathbf{J}_n^*, R \mathbf{J}_n \rangle = 1$, 进行归一化处理,

$$\begin{cases} \langle \mathbf{J}_m^*, R \mathbf{J}_n \rangle = \langle \mathbf{J}_m^*, R \mathbf{J}_n \rangle = \delta_{mn} \\ \langle \mathbf{J}_m^*, X \mathbf{J}_n \rangle = \langle \mathbf{J}_m^*, X \mathbf{J}_n \rangle = \lambda_n \delta_{mn} \\ \langle \mathbf{J}_m^*, Z \mathbf{J}_n \rangle = \langle \mathbf{J}_m^*, Z \mathbf{J}_n \rangle = (1 + j\lambda_n) \delta_{mn} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中 } \delta_{mn} = \begin{cases} 1, m = n \\ 0, m \neq n \end{cases}$$

由于物体辐射能量不能为负值, 故 $R(\cdot)$ 为半正定算子, 无谐振现象时为正定算子。在导体表面应用复功率守恒定理可得

$$\begin{aligned} P &= \langle \mathbf{J}^*, Z \mathbf{J} \rangle = \\ &\quad \langle \mathbf{J}^*, R \mathbf{J} \rangle + j \langle \mathbf{J}^*, X \mathbf{J} \rangle = \\ &\quad \oint_s \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{s} + \\ &\quad j\omega \iint_r (\mu \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* - \epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) d\tau \end{aligned} \quad (10)$$

以本征电流代替式(10)中的真实电流,并定义每个本征电流产生的电场(磁场)为本征电场(本征磁场),则可得

$$\oint_S \mathbf{E}_m \times \mathbf{H}_n^* \cdot d\mathbf{s} + j\omega \iiint_{\tau'} (\mu \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{H}_n^* - \epsilon \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{E}_n^*) d\tau = (1 + j\lambda_n) \delta_{mn} \quad (11)$$

对于式(11)的实部,在远场,代入电、磁场的关系,则有

$$\frac{1}{\eta} \oint_{S_\infty} \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{E}_n^* ds = \delta_{mn} \quad (12)$$

式(12)的物理意义很明确:特征电流产生的特征电场(磁场)及特征方向图在无穷远处正交。以上是经典的特征模理论,随后 Inagaki 对其进行了推广^[12],该理论计算出的特征电流在源区相互正交,对应的特征电场在任意区域正交。Liu 进一步提出广义特征模^[13],该特征模同 Inagaki 模具有相同的物理意义,但是计算量更小,物理意义更明确。

2 特征模理论在天线分析设计中的应用

特征模理论的物理图像很明确,在天线分析设计中有着独特的优势。早期它主要应用于设计形状简单的天线^[14],选择天线在基底的放置位置^[15],优化简单天线的方向图,如半波长偶极子天线等^[16]。随着研究的深入,特征模理论在天线设计中的应用越来越广泛。

首先,特征模理论在优化天线方向图上有了更深入的应用,如设计车载天线^[17]。在设计车载天线时,把天线和车身统一研究,分析出车载天线在垂直于车辆顶部方向的辐射性能最佳。其次,应用特征模理论来拓展天线带宽,如设计宽带的平面单极子天线、旋转对称天线、线天线及双臂螺旋天线^[18~21]。第三,用于精确获得圆极化天线的极化方向和轴比等参数^[18]。第四,用来优化输入阻抗,如双臂螺旋天线、多元球形天线等^[20,21]。此外,在印刷电路板(PCB)与天线集成设计^[22],电大天线分析和设计^[23],超宽带天线设计^[23~26],以及平面分形天线研究^[27]等方面也有不少应用。

鉴于 UWB 和 MIMO 技术在未来通信领域的重要地位,下文主要介绍特征模理论在 UWB 天线和 MIMO 天线分析和设计中的应用。

2.1 特征模理论在 UWB 天线分析设计中的应用

文献[24]采用特征模法设计宽带平面单极子天线,首先分析了方形、正立三角形、倒立三角形、圆形单极子这四种天线三个模最小的特征值对应的特征电流,在所研究的频带内,这三个模式占支配地位。图 1 (b)~(d)所示为方形单极子的这三个特征电流分布示意图。

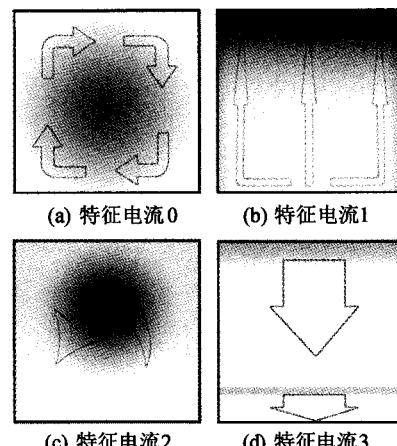


图 1 微带馈电的方形单极子前四个特征电流示意图

综合分析了这四种天线的三种特征模对应的特征角和电压驻波比,发现方形单极子在驻波比及带宽上更能满足要求,故选择方形单极子天线作为设计原型。为了实现陷波功能,在天线辐射贴片上刻蚀了倒 U 形缝隙,此时增加了一种新的谐振模式,它对天线性能的影响较大。最终设计的天线工作在 0.9~1.7 GHz 频段,在 1.3 GHz 附近有陷波特性。

文献[25]对[24]的方形贴片天线进一步进行分析,发现它还有特征模式 0(图 1(a)),但由于该模式的特征角在 90°附近波动,不辐射能量,因此文献[24]的分析并不影响结果。该文对方形贴片的底部进行倾角化处理,并采用准方形环实现陷波特性。贴片的倾角化处理避免了电流变化过于剧烈,提高了天线的超宽带性能。最终设计的天线在 3.1 GHz~10.6 GHz 频段内驻波比满足要求,具有良好的全向性。

文献[26]对共面波导馈电的方形平面单极子天线进行分析。为了增加天线带宽,辐射贴片底部也有一定的倾角。由于共面波导对天线表面电流分

布影响比微带线显著,该天线的特征电流明显异于文献[25]的结果,其前五种特征电流分布如图2所示。

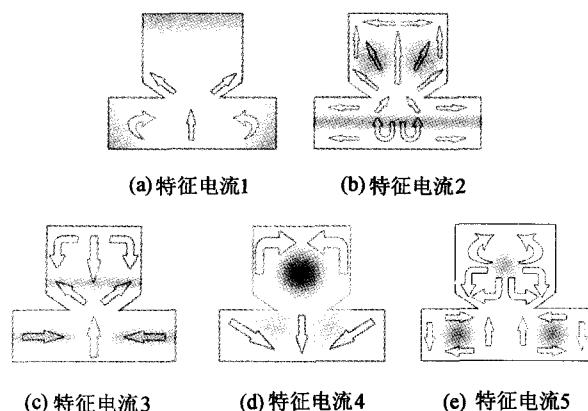


图2 共面波导馈电的方形单极子
前五个特征电流分布示意图

分析了各模式对应的驻波比,发现特征电流1在3~6 GHz频段对输入阻抗及驻波比的影响最显著,而特征电流2~4在6~10 GHz频段的影响更大,特征电流5主要影响天线在10 GHz附近性能。在进一步分析了共面波导对天线性能的影响后,发现共面波导长度对各特征模影响较大,且长度在天线工作波长的1/4至1/2之间时,天线匹配特性较好;研究了不同共面波导地板宽度时各特征模的驻波比,发现宽度减小,天线在该频带两端的驻波比变差,因此得出结论:地板宽度应大于单极子天线宽度。基于这些分析,设计出了性能良好的超宽带天线。

此外,还在该天线贴片上开槽,并分析了开槽前后的特征模及天线驻波比等性能。结果发现,开槽对前5个特征模都有影响,不同模式起作用的频段发生变化,此外,在10.0 GHz附近出现第6个特征模,各特征电流在槽缝附近变化最明显。最后,根据特征电流分布及该天线形状的高度对称性,在天线对称面上用短路面接地,将天线尺寸减小了一半,此时主要有4个特征模影响天线性能。最后设计的天线尺寸约为 $39.5 \times 17 \text{ mm}^2$, 2.0~12.0 GHz内驻波比小于2。

2.2 特征模理论在多天线分析设计中的应用

在多天线分析设计方面,特征模理论更是有着先天的优势。因为特征模理论把天线看作一系列相互正交的特征电流进行辐射,而相互正交的特征电流激发出相互正交的方向图,恰好可以用

来实现多天线的方向图相互正交,因此无需添加额外的天线单元隔离结构就能实现单元间的高隔离度^[6]。

文献[28]在分析手机天线和机身相互影响时,讨论了特征模理论在多天线-底盘集成设计中的潜在应用。Paulraj等首先设计出一种金属环形多模天线^[6, 29],该天线外径为31 mm,内径21 mm,工作频率为4.1 GHz,如图3所示。该天线有4个相互垂直的激励端口(各圆环段连接部分),激励不同端口,可使天线工作在不同的模式。首先对辐射性能影响最显著的5个特征模进行分析,其中特征模式0在研究频段主要呈感性(图3(a));特征模1和2是简并模,二者特征电流相互垂直,在2.1 GHz附近能有效辐射[图3(b),3(c)];特征模式3和4的有效辐射频率分别为3.5 GHz(图3(d))和4.0 GHz(图3(e)),但由于天线形状的影响,模式4无法激励。所以只需要分析特征模0~3,可得到三种工作模式(特征模1和2本质上相同)。为了使不同特征模式能够工作在同一频带,对天线进行电容加载,最终在4.1 GHz激励出三种不同的工作模式,它们的方向图相互垂直。

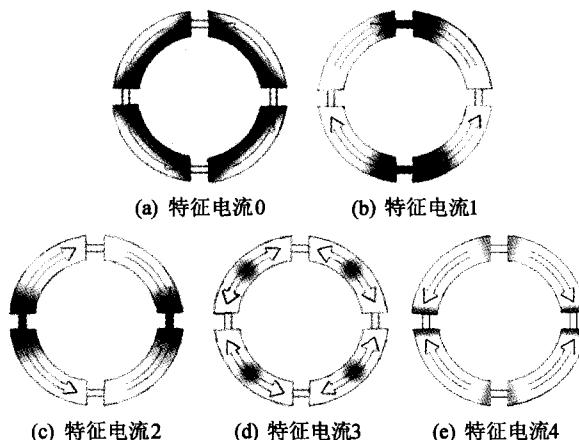


图3 环形多模天线的前五个特征电流分布示意图

文献[30]基于正六边形贴片设计出2.4 GHz的双端口天线。该天线的结构具有对称性,同一频率存在多个简并模,能激励出多个极化模式,因此可实现多模式工作。通过分析天线的前两个特征模,发现天线两平行边之间的距离为半个谐振波长,由此可确定天线尺寸。然后采用有限元法分析天线的特征电流,并结合贴片天线理论确定激励位置。设计的天线端口隔离度高达40 dB,理论工作效率约为95%。

文献[31]采用特征模理论分析了工作在900 MHz

的单极子天线、平面倒 F 天线和手持移动设备之间的相互影响。首先分析了在天线工作频段内底盘的前五个特征模,由于第二个特征模的绝对值远小于其它四个,它对应的特征角接近于 180° ,所以它对底盘影响占主导作用;安装天线后,底盘的最低谐振频率从 1.35 GHz 偏移到 1.06 GHz,而电流分布变化不大。然后分析了单极子天线和平面倒 F 天线工作时对底盘电流分布的影响,发现天线放置在底盘边缘时,对底盘电流分布影响最小,处于底盘中间的平面倒 F 天线对底盘电流分布影响最大,从而找到了两种天线在底盘上的最佳位置。最后,研究了两种天线的三种组合下底盘的电流分布及天线间的隔离度,发现单极子-平面倒 F 天线组合的隔离度最高。设计的双频双天线在无隔离结构时,隔离度高于 10 dB。

3 结语

综上所述,采用特征模理论进行超宽带天线和多天线的分析和综合设计是一种行之有效的方法。在超宽带天线的设计中,采用该理论把天线的表面电流分解成一系列正交的特征电流,然后分析不同特征电流与天线结构之间的关系,从而有目的的调整天线的结构参数,改变天线的特征电流分布,以实现需要的超宽的阻抗带宽、方向图特性等。对于多天线设计,通过将多天线系统作为整体进行分析,研究合适的天线结构和激励位置,以激发出相互正交的特征模式,从而实现具有高隔离度的多天线系统。

随着无线通信技术的发展,UWB 技术和 MIMO 技术在未来具有极大的发展潜力,而且若将二者相结合,可以进一步提升系统的性能^[32]。因此对结构紧凑、具有超宽带特性的多天线的需求必将进一步增加。而要能够有效地设计此类天线,没有理论的指导将极其困难,特征模理论的独特优势将在这类天线的设计中得到充分的发挥。不可否认的是,特征模理论也有一定的局限性,比如并未考虑激励源对天线的影响,这可能造成收敛速度慢甚至结果不可靠;另外,特征值也依赖于频率,用于超宽带天线分析时,计算量很大,因此很有必要进一步对其进行研究和改善,以克服这些缺点^[33]。

参考文献:

[1] REED J. Introduction to Ultra Wideband Communication

- Systems [M]. First. New Jersey: Prentice Hall Press. 2005.
- [2] PAULRAJ A J, GORE D A, NABAR R U, et al. An Overview of MIMO Communications-a Key to Gigabit Wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 198-218.
- [3] TANG M-C, XIAO S Q, DENG T W, et al. Compact UWB Antenna With Multiple Band-Notches for WiMAX and WLAN [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(4): 1 372-1 376.
- [4] RYU K S, KISHK A A. UWB Dielectric Resonator Antenna Having Consistent Omnidirectional Pattern and Low Cross-Polarization Characteristics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(4): 1 403-1 408.
- [5] CHUNG K, YOON J H. Integrated MIMO Antenna with High Isolation Characteristic [J]. Electronics Letters, 2007, 43(4): 199-201.
- [6] ANTONINO-DAVIU E, CABEDO-FABRES M, CALLO M, ET AL. Design of a Multimode MIMO Antenna Using Characteristic Modes [C]//The 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Washington: IEEE Press, 2009: 1 840-1 844.
- [7] GARG R. Analytical and Computational Methods in Electromagnetics [M]. First: Massachusetts: Artech House Publishers. 2008.
- [8] GARBACZ R. Modal Expansions for Resonance Scattering Phenomena [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8): 856-864.
- [9] GARBACZ R, TURPIN R. A generalized Expansion for Radiated and Scattered Fields [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(3): 348-358.
- [10] HARRINGTON R F, MAUTZ J. Theory of Characteristic Modes for Conducting Bodies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(5): 622-628.
- [11] HARRINGTON R F, MAUTZ J, CHANG Y. Characteristic Modes for Dielectric and Magnetic Bodies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1972, 20(2): 194-198.
- [12] INAGAKI N, GARBACZ R. Eigenfunctions of Composite Hermitian Operators with Application to Discrete and Continuous Radiating Systems [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(4): 571-575.
- [13] LIU D X, GARBACZ R J, POZAR D M. Antenna Synthesis and Optimization Using Generalized Characteristic Modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(6): 862-868.
- [14] GARBACZ R, POZAR D M. Antenna Shape Synthesis Using Characteristic Modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 340-350.

- [15] NEWMAN E. Small Antenna Location Synthesis Using Characteristic Modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 27(4): 530-531.
- [16] POZAR D. Antenna Synthesis and Optimization Using Weighted Inagaki Modes [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(2): 159-165.
- [17] AUSTIN B A, MURRAY K P. The Application of Characteristic-mode Techniques to Vehicle-mounted NVIS Antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(1): 7-21, 30.
- [18] KAWAKAMI H, SATO G. Broad-band Characteristics of Rotationally Symmetric Antennas and Thin Wire Constructs [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(1): 26-32.
- [19] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. Analysis of Wide Band Planar Monopole Antennas Using Characteristic Modes [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington: IEEE Press, 2003: 733-736.
- [20] OBEIDAT K A, RAINES B D, ROJAS R G. Antenna Design and Analysis Using Characteristic Modes [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington: IEEE Press, 2007: 5 993-5 996.
- [21] OBEIDAT K A, RAINES B D, ROJAS R G. Design and Analysis of a Helical Spherical Antenna Using the Theory of Characteristic Modes [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [22] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. The Theory of Characteristic Modes Revisited: A Contribution to the Design of Antennas for Modern Applications [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(5): 52-68.
- [23] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, ESCUDEROS D S, et al. On the Application of Characteristic Modes for the Analysis of Large Scale Antenna Problems [C]//The Second European Conference on Antennas and Propagation, 2007. Washington: IEEE Press, 2007: 1-7.
- [24] FERRANDO-BATALLER M, ANTONINO-DAVIU E, CABEDO-FABRES M, et al. UWB Antenna Design Based on Modal Analysis [C]//The 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. Washington: IEEE Press, 2009: 3 530-3 534.
- [25] ANTONINO-DAVIU E, CABEDO-FABRES M, FERRANDO-BATALLER M, et al. Modal Analysis and Design of Band-Notched UWB Planar Monopole Antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(5): 1 457-1 467.
- [26] WU W X, ZHANG Y P. Analysis of Ultra-Wideband Printed Planar Quasi-Monopole Antennas Using the Theory of Characteristic Modes [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(6): 67-77.
- [27] WU W X, WANG B-Z, YANG X-S, et al. A Pattern-Reconfigurable Planar Fractal Antenna and its Characteristic-Mode Analysis [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(3): 68-75.
- [28] FAMDIE C T, SCHROEDER W L, SOLBACH K. Numerical Analysis of Characteristic Modes on the Chassis of Mobile Phones [C]//The First European Conference on Antennas and Propagation, 2006, Washington: IEEE Press, 2006: 1-6.
- [29] CABEDO-FABRES M, GALLO M, ANTONINO-DAVIU E, et al. Modal Analysis of a MIMO Antenna for Sensor Networks [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [30] EL-HAJJ A, GALLEE F, PERSON C. Application of Characteristic Modes Analysis in the Design of Multi-access Antennas for an Opportunistic Radio System [C]//2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Washington: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [31] LI H, TAN Y, LAU B K, et al. Characteristic Mode Based Tradeoff Analysis of Antenna-Chassis Interactions for Multiple Antenna Terminals [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 490-502.
- [32] DIMITROV E, KUPFERSCHMIDT C, KAISER T, et al. Design and Implementation of Advanced Algorithms for MIMO-UWB Wireless Communications [C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Washington: IEEE Press, 2011: 288-292.
- [33] CABEDO-FABRES M, VALERO-NOGUEIRA A, HERRANZ-HERRUZO J, et al. A Discussion on the Characteristic Mode Theory Limitations and its Improvement for the Effective Modeling of Antennas and Arrays [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington: IEEE Press, 2004, 1: 121-124.

作者简介



王辉(1987-),男,河南新蔡人,硕士研究生,主要研究方向为天线、计算电磁学;

E-mail: swkwh@163.com

杨雪松(1970-),女,湖北恩施人,副教授、博导,主要研究方向为天线、无线信道。

特征模在超宽带和多输入多输出天线设计中的应用

作者: 王辉, 杨雪松
作者单位: 电子科技大学应用物理研究所, 成都, 610054
刊名: 中国电子科学研究院学报
英文刊名: Journal of China Academy of Electronics and Information Technology
年, 卷(期): 2012, 7(5)

参考文献(33条)

1. REED J Introduction to Ultra Wideband CommunicationSystems 2005
2. PAULRAJ A J;GORE D A;NABAR R U An Over- view of MIMO Communications-a Key to Gigabit Wireless[外文期刊] 2004(02)
3. TANG M-C;XIAO S Q;DENG T W Compact UWB Antenna With Multiple Band-Notches for WiMAX and WLAN 2011(04)
4. RYU K S;KISHK A A UWB Dielectric Resonator Anten- na Having Consistent Omnidirectional Pattern and Low Cross-Polarization Characteristics 2011(g)
5. CHUNG K;YOUN J H Integrated MIMO Antenna with High Isolation Characteristic[外文期刊] 2007(04)
6. ANTONINO-DAVIU E;CABEDO-FABRES M;GALLO M Design of a Muhimode MIMO Antenna Using Characteristic Modes 2009
7. GARG R Analytical and Computational Methods in Elec- tromagnetics 2008
8. GARBACZ R Modal Expansions for Resonance Scattering Phenomena 1965(08)
9. GARBACZ R;Turpin R A generalized Expansion for Radiated and Scattered Fields 1971(03)
10. HARRINGTON R F;MAUTZ J Theory of Characteristic Modes for Conducting Bodies 1971(05)
11. HARRINGTON R F;MAUTZ J;CHANG Y Character- istic Modes for Dielectric and Magnetic Bodies 1972(02)
12. INAGAKI N;GARBACZ R Eigenfunctions of Composite Hermitian Operators with Application to Discrete and Continuous Radiating Systems 1982(04)
13. LIU D X;GARBACZ R J;POZAR D M Antenna Syn- thesis and Optimization Using Generalized Characteristic Modes 1990(06)
14. GARBACZ R;POZAR D M Antenna Shape Synthesis Using Characteristic Modes 1982(03)
15. NEWMAN E Small Antenna location Synthesis Using Char- acteristic Modes 1979(04)
16. POZAR D Antenna Synthesis and Optimization Using Weigh- ted Inagaki Modes 1984(02)
17. AUSTIN B A;MURRAY K P The Application of Charac- teristic-mode Techniques to Vehicle-mounted NVIS Anten- nas 1998(01)
18. KAWAKAMI H;SATO G Broad-band Characteristics of Rotationally Symmetric Antennas and Thin Wire Constructs 1987(01)
19. CABEDO-FABRES M;ANTONINO-DAVIU E;VALERO- NOGUEIRA A Analysis of Wide Band Planar Mono- pole Antennas Using Characteristic Modes 2003
20. OBEIDAT K A;RAINES B D;ROJAS R G Antenna De- sign and Analysis Using Characteristic Modes 2007
21. OBEIDAT K A;RAINES B D;ROJAS R G Design and Analysis of a Helical Spherical Antenna Using the Theory of Characteristic Modes 2008
22. CABEDO-FABRES M;ANTONINO-DAVIU E;VALERO- NOGUEIRA A The Theory of Characteristic Modes Revisited:A Contribution to the Design of Antennas for Modem Applications 2007(05)
23. CABEDO-FABRES M;ANTONINO-DAVIU E;ESCUD- EROS D S On the Application of Characteristic Modes for the Analysis of Large Scale Antenna Problems 2007
24. FERRANDO-BATALLER M;ANTONINO-DAVIU E;CABEDO-FABRES M UWB Antenna Design Based on Modal Analysis 2009
25. ANTONINO-DAVIU E;CABEDO-FABR6S M;FERRAN- DO-BATALLER M Modal Analysis and Design of Band-Notched UWB Planar Monopole Antennas[外文期刊] 2010(05)
26. WU W X;ZHANG Y P Analysis of Ultra-Wideband Prin- ted Planar Quasi-Monopole Antennas Using the Theory of Characteristic Modes 2010(06)
27. WU W X;WANG B-Z;YANG X-S A Pattern-Recon- figurable Planar Fractal Antenna and its Characteristic- Mode Analysis

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>