

一种基于特征模理论设计的嵌入式全向共形天线

何其洪^{①②} 龚子平^{*①} 柯亨玉^① 万显荣^①

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

^②(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 特征模理论能够为天线设计者展现关于天线工作原理的清晰物理景象。该文基于特征模理论,分析了从金属腔中简单环结构到“组合倒 L”结构等多种结构形式的特征模参数以及相应模式的辐射特性,确定了适宜作为所需天线的结构形式,并研究了有效的激励方式。通过参数优化设计了一种工作于 UHF 频段、结构紧凑的嵌入式全向共形天线,并制作了天线样机。天线样机直径为中心频率的 $0.26\lambda_0$, 高度为 $0.08\lambda_0$, 测量电压驻波比小于 2:1 的带宽为 1.8%, 测试结果与仿真结果吻合。验证了采用特征模理论进行天线设计的方法之有效性。

关键词: 全向共形天线; 特征模理论; 组合倒 L 天线

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)11-2977-05

DOI: 10.11999/JEIT160089

An Embedded Omnidirectional Conformal Antenna Based on Theory of Characteristic Modes

HE Qihong^{①②} GONG Ziping^① KE Hengyu^① WAN Xianrong^①

^①(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^②(The 54th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The Theory of Characteristic Modes (TCM) provides the antenna designer with physical insight regarding the antenna operating principles. Based on TCM, this paper analyzes in detail the characteristic modes properties of the several transfigurations of metal ring in a cylinder cavity. These properties give information about the radiation ability of every structure. It is very helpful to choose the very right structure as the desired antenna. This paper also gives an effective feed for the combined Inverse-L mode. The manufactured antenna is measured. The measured results show that the band width is 1.8% for $VSWR < 2$, the diameter is $0.26\lambda_0$, the height is $0.08\lambda_0$, and the measured results agree well with the simulated ones. It is verified that the design method based on TCM is very effective.

Key words: Omnidirectional conformal antenna; Theory of Characteristic Modes (TCM); Combined inverse-L antenna

1 引言

通信、导航、电子侦察等领域往往要求天线能够与移动载体平台实现表面共形,从而获得良好的空气动力学性能,并达到减小雷达散射截面(RCS)的目的。尤其在隐身飞机设计中,往往需要低 RCS 的全向天线,而可安装于飞机水平部位(机背或机腹部)的全向共形天线是一个较好的选择,是共形天线设计的一个难点,已经受到了越来越多研究人员的关注。

在文献报道中,主要有 3 种形式的全向共形天

线。第 1 种形式是环缝天线^[1-4]: 其电压驻波比小于 2 的带宽可达 18%、天线的直径约为 $0.72\lambda \sim 1.04\lambda$ 。第 2 种形式是单极贴片天线^[5-10]: 其电压驻波比小于 2 的带宽可达 32.4%, 其最大尺寸约为 $0.72\lambda \sim 1.00\lambda$ 。第 3 种形式是单极或盘锥天线的变形^[11]: 其电压驻波比小于 2 的带宽为 43%, 其直径约为 0.76λ 。以上 3 种天线形式有一个共同的缺点,即天线直径电尺寸较大,难以应用于超短波(UHF)频段。

特征模理论最早由 Garbacz 在 1971 年首次提出^[12], 由 Harrington 等人^[13,14]整理完善,并在近年来重新兴起的一种分析方法,它与应用较为广泛的矩量法结合解析本征模理论求解电磁问题。虽然特征模理论在解决电磁问题过程并不比矩量法快速,但具有更为清晰的物理景象,特征模理论的应用之

收稿日期: 2016-01-19; 改回日期: 2016-08-01; 网络出版: 2016-09-30

*通信作者: 龚子平 zpgong@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61331012, 61371197, 41333106)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61331012, 61371197, 41333106)

一,就是根据特征模分析得到的模式辐射能力信息指导天线设计^[15,16]。其设计过程有别于传统的天线设计过程,分为两个阶段:模式分析阶段和激励阶段,模式分析阶段不考虑如何馈电而只考虑特定结构的模式及模式辐射特性;馈电设计在激励阶段进行。这种方式有助于深入地理解天线的工作原理,有利于设计新的天线形式。

本文基于特征模理论,在天线尺寸严格限制的前提下,设计了一种工作于UHF频段、形式新颖且结构紧凑的嵌入式全向共形天线。

2 特征模分析

2.1 单环(加腔)的特征模分析

为了实现全向天线共形,根据电磁场理论的对偶原理,首先考虑与偶极子天线对偶的环形天线。但环天线直接用作共形天线,易受到平台内临近天线的其它设备影响,不宜直接用作共形天线,故将环放入金属腔体内,如图1(a)所示。

为了考察该结构能否成为一个全向天线,分析计算了单环(加腔)结构6个主要模式(图2(a)),限于文章的篇幅,本文只给出了具有全向辐射的模式(模式3和模式4)远场图,如图2(b)所示。

从图2可以看出,单环(加腔)结构存在2个具有水平全向辐射的模式(模式3和模式4),但其MS值都远小于1,表明这两个模式难以形成有效辐射,故这种结构不宜作为全向天线形式。

2.2 单环(加腔)加短路钉的特征模分析

考虑单环(加腔)结构的电尺寸仍较大,为进一

步减小谐振所需尺寸,在环与腔底部之间加入短路钉,并进行特征模分析,图3给出了典型模式电流、模式远场和MS分析曲线。

实际上,在环和腔底部之间加上短路钉(包括后文的双环加短路钉),在特征模分析结果中包含两种全向模:其中一个全向模的电流主要分布在环上,称之为“环模”。但因“环模”的结构尺寸(即环周长)并没有变化,所以图3(c)中“环模”MS曲线几乎不变:保持远小于1,难以形成有效辐射;另一个全向模的典型电流分布如图3(b)所示,其电流分布特点为:

(1)模式电流主要分布在环和短路钉上(图3(b)中,箭头长度和方向分别表示电流的大小和方向)。

(2)短路钉上电流和环上电流形成一个倒L形电流分布,整个模式电流分布形成一个组合倒L结构,故称其为“组合倒L模”,简称为“倒L模”。

从图3(d)看出,“倒L模”的MS值随短路钉有增大的趋势,所以在后面的设计过程中,重点关注“倒L模”。但值得注意的是,当单环的短路钉由2个增加到4个的时候,其相应的MS值由0.35左右减少到0.1左右,这说明:在一个环上加2个短路钉较为合适。

2.3 双环(加腔)加短路钉的特征模分析

为了进一步提高“倒L模”的MS幅度,在原来单环的内部,再增加一个环,并保持每个环只有2个短路钉,如图1(d)所示。计算得到的典型模方向图、模电流分布与图3(a)、图3(b)相似。

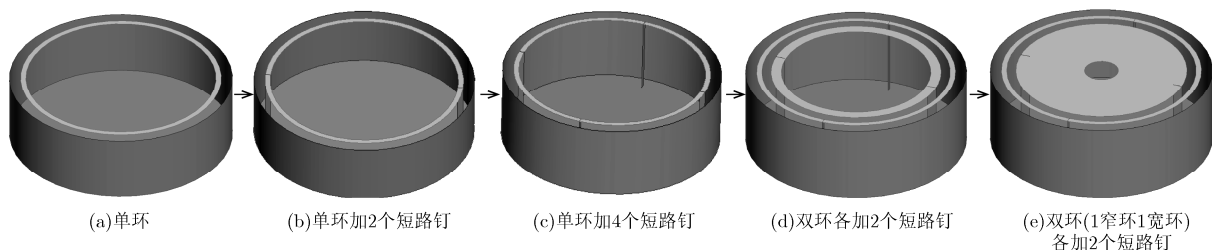
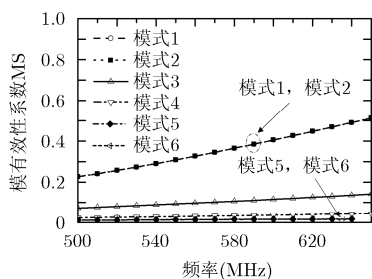
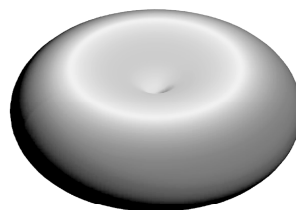


图1 天线结构的演变过程



(a)单环前6个模的MS曲线



(b)模式3和模式4远场辐射图

图2 单环(加腔)的特征模分析结果

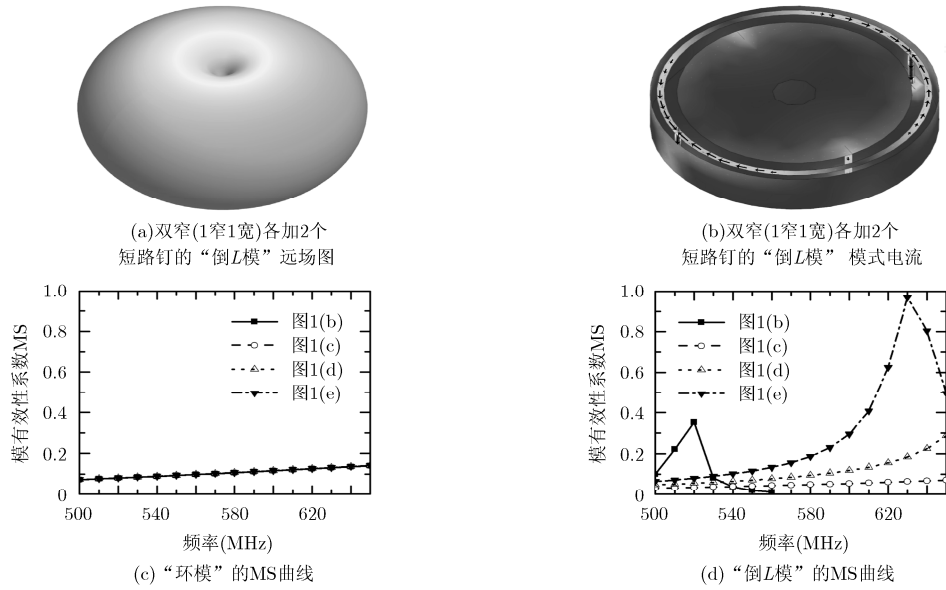


图 3 环加短路钉结构的特征模分析结果

同时，从图 3(d)的“倒 L 模” MS 曲线可以看出：当两个环都为窄环，“倒 L 模”的 MS 幅度约为 0.35 左右，仍然小于 1(难以形成有效辐射)；当尝试将内环宽度逐渐增加(如图 1(e)所示)，“倒 L 模”的 MS 幅度随之增加(如图 3(d)所示)，最终在 630 MHz 达到约 0.97，说明此时“倒 L 模”处于谐振状态，适宜作为水平全向天线的结构形式。

3 模式激励

通常情况下，选择在模式电流最大点激励。但通过计算发现，在模式最大点激励时的端口阻抗很低(如图 4(a))，难以阻抗匹配。故尝试在腔体内部中心用探针以耦合方式激励，即通过电场的相互作用实现耦合馈电，调整腔高度 h 和环周长来改变谐振频率到所需频率。采用的探针结构形式为倒锥结构，其高度为 h 、顶部半径为 r 、锥底部与腔底部间隙为 δ ，探针结构如图 5 所示。

计算得到的特征模式相关结果如图 6 所示。从图 6 看出：当用探针耦合方式馈电时，“倒 L 模”处于谐振状态，MS 在 556 MHz 时取值约为 1，表明

该模式在 556 MHz 谐振效果最好；此时整个天线上激励的电流几乎只由“倒 L 模”构成，图中模式 3 为“倒 L 模”。所以，采用探针耦合馈电的方式能够有效地激励“倒 L 模”。同时计算了探针耦合馈电的宽口阻抗，如图 4(b)所示。从该图看出，天线端口阻抗已被有效提高，易于实现天线阻抗匹配。

4 天线设计与测试结果

4.1 天线设计

根据前述分析结果，采用探针耦合馈电的方式，设计的天线尺寸为： $D = 139 \text{ mm}$ (为 $0.26 \lambda_0$)。 $h = 45 \text{ mm}$ (为 $0.08 \lambda_0$)， $r = 5 \text{ mm}$ ， $\delta = 1.5 \text{ mm}$ ，短路钉采用半径为 2 mm 金属圆柱。所有的金属环用厚度为 1 mm 的环氧玻璃钢(FR4)单面印制板刻蚀而成。加工的天线样机如图 7(a)所示。

4.2 测试结果

在没有金属底板的情况下，本文设计的天线的远场辐射方向图与一个标准的半波对称振子天线相似。为了验证所设计的天线作为共形天线的能力，

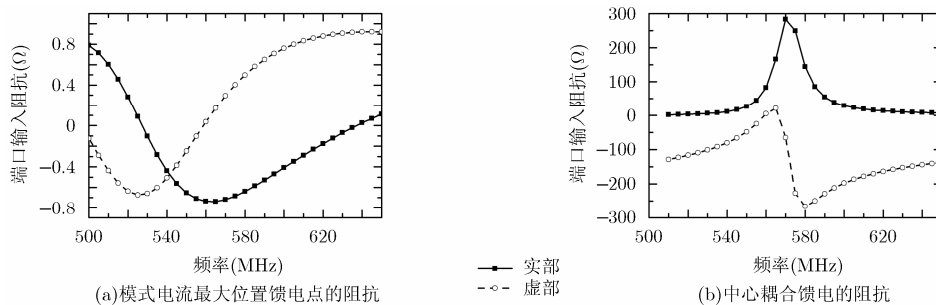


图 4 天线端口输入阻抗

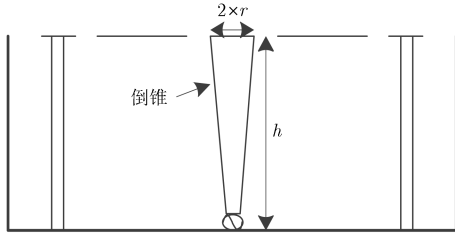


图5 探针馈电示意图

加工制作了天线样机,如图7(a)所示。并将天线样机嵌入式安装在尺寸为1 m×1 m的方形铝板中心,测试了天线的电压驻波比和远场辐射方向图,如图7(b)~图7(d)。

从图7可以看出,天线的测试结果与仿真结果相吻合,且天线嵌入共形安装后,具有较好的水平全向辐射能力,方位面不圆度小于2 dB;天线 S_{11} 参数小于-10 dB的百分比带宽为1.8%(覆盖了546~556 MHz)。

5 结束语

本文基于特征模理论,分析计算了几种位于金属腔内部的环加短路钉结构的模式谐振情况,设计出一种形式新颖的全向共形天线,加工制作了样机并进行了性能测试,其测试结果与仿真结果一致性较好。所设计的天线尺寸:直径为 $0.26\lambda_0$,高度为 $0.08\lambda_0$,匹配带宽为1.8%。因此,本文设计的全向共形天线适合于严格限制天线尺寸且带宽窄的机载、弹载平台。

特征模特性只与研究对象的形状、大小、频率有关,而与激励无关;特征模理论分析的结果揭示不同结构的辐射能力信息,有助于天线的研发工作。利用特征模理论进行天线设计的过程有别于传统的天线设计过程:在模式分析阶段不考虑馈电而专注于结构形式;在模式激励阶段再考虑馈电。本文正是基于特征模理论分析的信息,先找出适合作为全

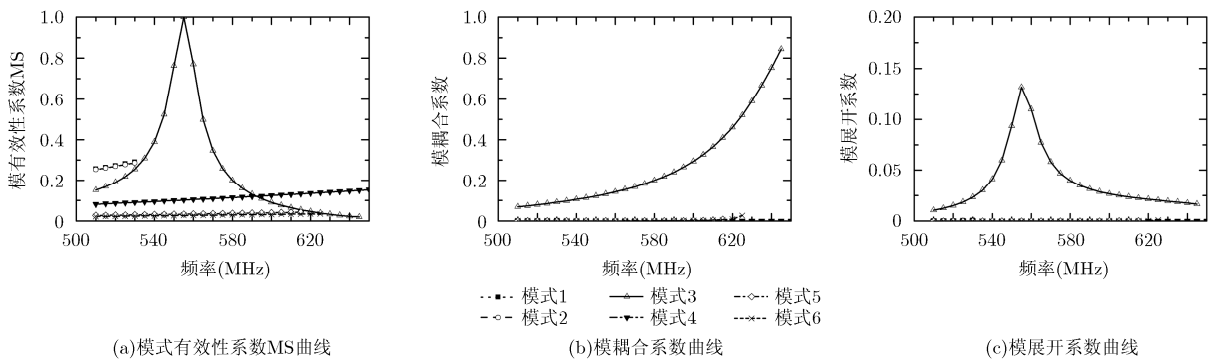


图6 探针耦合馈电激励“倒L模”的特征模分析结果曲线

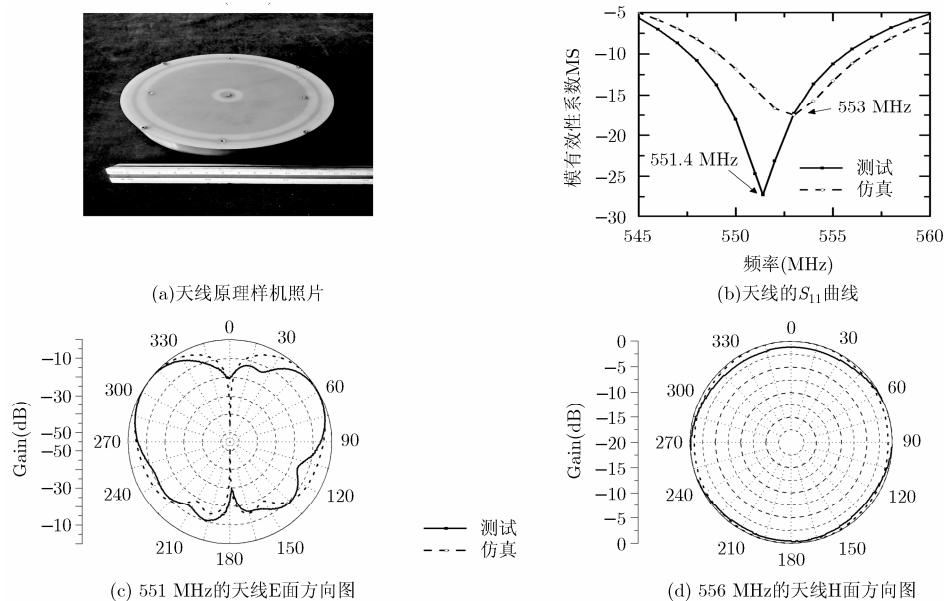


图7 天线样机照片及测试结果

向天线的“组合倒 L 模”，然后设计出有效激励形式进行馈电，最终研制出一种结构紧凑、新颖的全向共形天线，验证了利用特征模式理论设计天线的可行性与有效性。从所设计的天线特征模分析结果来看，天线的远场方向图带宽远大于阻抗匹配带宽，下一步的研究工作将尝试提高该天线的匹配带宽。

参 考 文 献

- [1] FILIPOVIC D S and VOLAKIS J L. A flush-mounted multifunctional slot aperture (combo-antenna) for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(2): 563–571. doi: 10.1109/TAP.2004.823927.
 - [2] CHEN J S. Dual-frequency annular-ring slot antennas fed by CPW feed and microstrip line feed[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 569–573. doi: 10.1109/TAP.2004.838799.
 - [3] WU C T M, CHOI J H, and LEE Hanseung. Magnetic-current-loop-induced electric dipole antenna based on substrate integrated waveguide cavity[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 519–522. doi: 10.1109/LAWP.2014.2311410.
 - [4] GUAN Dongfang, QIAN Zuping, CAO Wenquan, et al. Compact SIW annular ring slot antenna with multiband multimode characteristics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5918–5922. doi: 10.1109/TAP.2015.2487516.
 - [5] DELAVEAUD C, LEVEQUE P, and JECKO B. New kind of microstrip antenna: The monopolar wire-patch antenna[J]. *Electronics Letters*. 1994, 30(1): 1–2. doi: 10.1049/el:19940057.
 - [6] LIU Juhua, XUE Quan, WONG Hang, et al. Design and analysis of a low-profile and broadband microstrip monopolar patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 11–18. doi: 10.1109/TAP.2012.2214996.
 - [7] WEN Bin, LIU Juhua, ZHOU Wenlong, et al. A low-profile and wideband monopolar circular via-loaded patch antenna coupled with via-loaded ring[C]. 2015 *IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, Shenzhen, 2015: 1–3. doi: 10.1109/IEEE-IWS.2015.7164599.
 - [8] DAI Xiwang, ZHOU Tao, and CUI Guanfeng. Dual-band microstrip circular patch antenna with monopolar radiation pattern[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1004–1007. doi: 10.1109/LAWP.2015.2490079.
 - [9] LIANG Zhixi, LIU Juhua, LI Yuanxin, et al. A dual-frequency broad-band design of coupled-fed stacked microstrip monopolar patch antenna for WLAN applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1289–1292. doi: 10.1109/LAWP.2015.2505091.
 - [10] WONG Hang, KWOK K S, and GAO Xia. Bandwidth enhancement of a monopolar patch antenna with V-shaped slot for car-to-car and WLAN Communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3): 1130–1136. doi: 10.1109/TVT.2015.2409886.
 - [11] CHEN A, JIANG T, CHEN Z, et al. A novel low-profile wideband UHF antenna[J]. *Progress in Electromagnetics Research-Pier*, 2011, 121: 75–88. doi: 10.2528/PIER11081302.
 - [12] GARBACZ R J and TURPIN R. A generalized expansion for radiated and scattered fields[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1971, 19(3): 348–358. doi: 10.1109/TAP.1971.1139935.
 - [13] HARRINGTON R F and MAUTZ J R. Theory of characteristic modes for conducting bodies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1971, 19(5): 622–628. doi: 10.1109/TAP.1971.1139999.
 - [14] HARRINGTON R F, MAUTZ J R, and YU Chang. Characteristic modes for dielectric and magnetic bodies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1972, 20(2): 194–198. doi: 10.1109/TAP.1972.1140154.
 - [15] CHEN Yikai and WANG Chaofu. Synthesis of platform integrated antennas for reconfigurable radiation patterns using the theory of characteristic modes[C]. 2012 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), Xi'an, 2012: 281–285. doi: 10.1109/ISAPE.2012.6408764.
 - [16] CHEN Yikai and WANG Chaofu. Electrically small UAV antenna design using characteristic modes[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(2): 535–545. doi: 10.1109/TAP.2013.2289999.
- 何其洪：男，1974年生，博士生、高级工程师，研究方向为电磁计算和天线设计。
- 龚子平：男，1977年生，讲师，研究方向为天线理论与设计、无线电磁海洋遥感。
- 柯亨玉：男，1957年生，教授、博士生导师，研究方向为电波传播与天线、电磁场理论与应用等。