

# 矩形片式环形磁感应天线近场互感特性研究

曹磊, 王鲁豫, 李凤

(电子科技大学 微电子与固体电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 提出了一种新的矩形片式环形磁感应天线, 并对这种天线的近场互感特性进行了研究, 得到互感效率随天线的周长大小以及导带宽度的变化规律。最后通过计算机仿真及实验对天线的波瓣图进行了研究。

**关键词** 片式环形天线; 磁感应; 近场; 互感效率; 波瓣图

中图分类号 TN015

## The Near Field Inter-inductive Characters of the Rectangular Plate Magnetic Loop Antenna

Cao Lei, Wang Luyu, Li Feng

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** A new rectangular plate magnetic inductive loop antenna is designed. By studying the near field inter-inductive characters, the relationship of the inductive efficiency to the perimeter and the conductor width of the antenna is found out. Finally the lobe of the antenna is verified by emulation and experiments.

**Keywords** plate loop antenna; magnetic inductive; near field; inductive efficiency; lobe

### 1 引言

环天线以其成本低, 体积小, 易于设计等优点在高频频段得到了广泛应用。随着现代信息技术的发展, 对环天线也提出了更高的要求。在国内外文献中, 对环天线的远场特性进行的研究较多<sup>[1, 2]</sup>, 对近场特性分析的文献相对比较少。然而在一些近场的应用中, 例如无源 RFID 系统中利用环天线传输能量等, 在这些系统中, 环天线的近场感应性能将决定整个系统性能。本文中提出了一种新型的矩形片式环形磁感应天线, 在对这种天线近场互感特性的研究中, 提出了一种简单实用的数学模型, 通过计算环天线磁通量的方法, 得出了矩形片式环形磁感应天线的周长大小和导带宽度对互感效率的影响, 并通过仿真和试验对环天线的波瓣图进行了研究。

### 2 理论分析

#### 2.1 分析公式推导

图 1 示出了矩环片状环天线及互感结构。中心位于坐标原点的天线  $l$  为源天线, 天线  $L$  为感应天线。两天线由长宽分别为  $a, b$ , 导带宽度为  $w$  的平面导体构成。其中  $(x, y, z)$  为感应环  $L$  导带上任意一点的坐标,  $(x', y', z')$  为源天线导带上任意一点的坐标。源天线在长边  $a$  中点处由同轴线馈电。在近场工作时, 天线通过磁场耦合传输, 因此也可以称为互感天线。

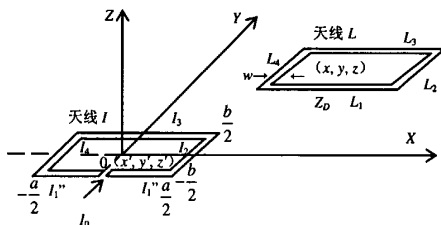


图 1 矩形片状环形磁感应天线及其互感结构

在互感系统中, 环路所包含的磁通量与环路感应电压成正比, 求出在近场空间各处穿过环天线的

收稿日期: 2006-01-09

作者简介: 曹磊 (1980—) 男, 硕士研究生。研究方向: 射频微波电路、大容量无线 IC 卡和 CTCS 大容量点式应答器系统信息传输关键技术的研究。

磁通量便可得出其互感特性。而直接通过求解空间各点的磁场分布将涉及到较为复杂的电磁场计算公式和繁琐的计算过程,本文中应用矢量磁量 $A$ ,使近场互感的计算得到简化。由斯托克司定理<sup>[3]</sup>,得到

$$\Phi_L = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{L} \quad (1)$$

显然,式(1)的处理省去了求磁场分布的复杂性,使感应磁通量的计算大大简化。

因为感应天线为矩形,则可将感应天线 $L$ 分为四段,分别计算每段对 $L$ 天线磁通量的贡献。

$$\Phi_L = \Phi_{L1} + \Phi_{L2} + \Phi_{L3} + \Phi_{L4} = \oint_{L1} \mathbf{A}_l \cdot d\mathbf{L} + \oint_{L2} \mathbf{A}_l \cdot d\mathbf{L} + \oint_{L3} \mathbf{A}_l \cdot d\mathbf{L} + \oint_{L4} \mathbf{A}_l \cdot d\mathbf{L} \quad (2)$$

矢量磁位 $A$ 方向与源天线 $l$ 中电流方向同相。

通常在对环形电小天线进行分析时,往往不考虑电流在环上各点的相位变化,即认为天线上电流

相位是一致的。但是为了分析环天线的一般特性,本文中考虑了天线上电流相位的滞后效应。假设天线上电流分布为一均匀分布的行波电流,其总电流波归一化值为 $I = \cos(-\beta l)$ ,设在馈点处电流相位为0。根据图1所示的直角坐标系,有公式<sup>[4]</sup>:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I}{R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\cos(-\beta l)}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} dl \quad (3)$$

由于天线为矩形,由矢量磁位的性质可知,只有源天线 $l$ 和感应天线 $L$ 相互平行的线段对式(2)的积分才有贡献。例如在对 $L_1$ 段进行积分的时候,环1中, $l_2$ 和 $l_4$ 段的矢量磁位沿 $L_1$ 积分为零,只有和 $L_1$ 平行的线段 $l_1'$ ,  $l_1''$ 和 $l_3$ 积分不为零,分别为

$$\Phi_{x11} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot c} \int_0^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{a}{2}+c+D}^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{a}{2}-c+D} \frac{\cos(-\beta \cdot x_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2 + z^2 + w^2}} dx_1 \cdot dx \cdot dw \quad (4)$$

$$\Phi_{x12} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot c} \int_0^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{a}{2}+c+D}^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{a}{2}-c+D} \frac{\cos[-\beta \cdot (a+2b+\frac{a}{2}) - \beta \cdot (\frac{a}{2} + x_1)]}{\sqrt{(x-x_1)^2 + z^2 + w^2}} dx_1 \cdot dx \cdot dw \quad (5)$$

$$\Phi_{x13} = -\frac{\mu_0}{4 \cdot \pi \cdot c} \int_0^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{a}{2}+c+D}^{\frac{a}{2}} \int_0^{\frac{a}{2}-c+D} \frac{\cos[-\beta \cdot (b+\frac{a}{2}) - \beta \cdot (\frac{a}{2} - x_1)]}{\sqrt{(x-x_1)^2 + z^2 + (b+w-2c)^2}} dx_1 \cdot dx \cdot dw \quad (6)$$

$$\Phi_{L1} = \Phi_{x11} + \Phi_{x12} + \Phi_{x13} \quad (7)$$

式中 $D$ 为两天线中心距离, $c$ 为导带宽度。

同理可以求出其他各边的积分,带入式(3)便可得到 $\Phi_L$ 。

## 2.2 互感效率分析

互感效率的定义:感应天线在正对于源天线某一位置处所穿过的磁通量 $\Phi$ 与穿过感应天线的最大磁通量 $\Phi_{\max}$ 之比的平方。通常采用dB表示,及 $\eta = 10 \cdot \lg(\Phi^2 / \Phi_{\max}^2)$ 。

为了分析环的大小和导带宽度对互感效率的影响。本文中选取了3种不同周长尺寸的环天线,对其导带宽度和互感效率的关系进行了分析。以下结果均在两环天线之间距离为 $z_0 = 0.5$ 米的情况下计算所得,如图2所示。

图2中横坐标为导带宽度 $w$ 与天线外周长 $P$ 的比值,纵坐标为互感效率比值。

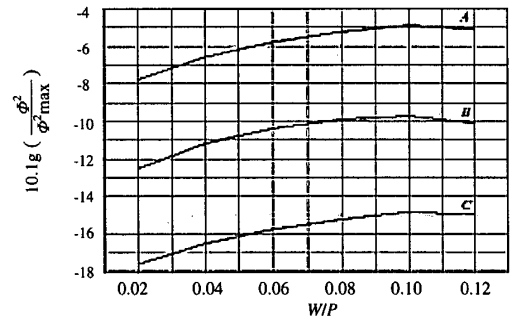


图2 三种不同外周长大小的环天线辐射效率图

曲线A、B、C分别为环天线周长 $P=0.05\lambda$  ( $a=0.013\lambda$ ,  $b=0.012\lambda$ ),  $P=0.117\lambda$  ( $a=0.036\lambda$ ,  $b=0.023\lambda$ )以及 $P=0.45\lambda$  ( $a=0.128\lambda$ ,  $b=0.09\lambda$ )时,辐射效率随导带宽度变化曲线。

图2中选择了3种比较典型的天线尺寸大小,曲线A可以近似为电小天线,曲线B所示的天线外

周长约为  $1/10\lambda$ , 曲线 C 所示的天线外周长略小于  $1/2\lambda$ , 已经可以和  $\lambda$  相比拟。从上面的分析结果中可以看出, 当外周长变大, 即天线面积变大时, 互感效率相应增大, 所以在设计过程中, 应当根据系统不同的需求, 在天线大小和互感效率之间有一个折衷的选择。对于导带宽度  $w$  对辐射效率的影响方面, 可以看到: 当  $w$  较小时, 随着  $w$  的增加, 辐射效率迅速增加, 当  $w$  增加到接近  $b/2$  时, 辐射效率增加速度变慢, 最后达到一个最大值后缓慢下降。这是由于当  $w$  接近  $b/2$  时, 环天线导带内周长所围成的面积急剧减小, 即使此时磁场强度在增加, 也将导致穿过此面积的磁通量下降。

根据上面的分析可知, 在确定了天线外周长的前提下, 可以通过改变导带宽度  $w$  来对天线的互感效率进行优化。

### 2.3 波瓣图仿真与实验分析

波瓣图的定义: 设源天线和感应天线之间的垂直距离为一常数。让感应天线  $L$  在  $z = z_0$  ( $z_0$  为常数) 平面内沿  $x$  轴平移, 计算出平移过程中每一处穿过感应天线  $L$  的磁通量, 与穿过天线  $L$  的最大磁通量之比的平方在  $x$  方向的变化所得到的图形即为我们的波瓣图。

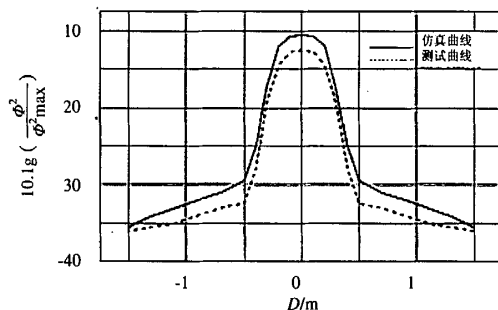


图3 仿真和实验结果

根据前面辐射效率的研究以及系统要求, 设计了一种工作在 27MHz 的天线, 就其辐射效率和方

向性进行了计算机仿真和实验。天线周长  $P=1.3\text{m}$ , 两边分别为  $a=0.4\text{m}$ ,  $b=0.25\text{m}$ , 导带宽度  $w=0.05\text{m}$ , 两天线垂直距离  $z_0=0.5\text{m}$ , 测试频率  $f=27\text{MHz}$ 。结果如图 3 所示。

图 3 中  $D$  为两天线水平方向的距离。在互感效率上, 仿真结果与计算有很好的近似, 实际天线的测试结果与计算结果相差约 2.5dB, 这是由于在实际的测试中, 天线与馈电系统不能达到理想匹配所引入的反射损耗, 以及对天线调谐的电抗元件的损耗所带来的。在天线波瓣图方面, 仿真结果 3dB 宽度为 0.46m, 测试结果 3dB 宽带为 0.44m, 仿真曲线和测试曲线比较接近。

### 3 结论

对一种新的片状环形天线的近场互感特性进行了分析, 得到了互感效率与天线的尺寸, 导带宽度的变化趋势, 结果表明, 在天线外周长不变的情况下, 通过改变导带的宽度, 可以调整和改善这种天线的近场互感效率。根据计算结果设计了一种尺寸的环天线进行仿真和实验, 计算结果与仿真和实验结果比较相吻合。

### 参考文献

- Balirlacy A I, Sharshar H A, Awadalla K H, et al. Radiation Characteridtics Of Open Rectangular Loop Antenna, Radio Science Conference[A]. NRSC' 96, Thirteenth National[C]. [s.l.]:IEEE Conference Proceedings Radio Science Conference, NRSC' 96,1996,183~191.
- Hyeonjin Lee, Hun Nam, Yeongseog Lim. A Design of Printed Square Loop Antenna for Omnidirectional Radiation Patterns, Radio and Wireless Conference[A]. RAWCON' 03. Proceedings[C]. Boston, Massachusetts: RAWCON' 03. Proceedings, 2003, 253~256.
- 傅君眉, 冯恩信. 高等电磁理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- 苏涛, 吴顺君, 李真芳, 等. 高性能 DSP 与高速实时信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- 杜洋, 李宝森. 14 位高精度高速 AD 转换器 AD9244[J]. 国外电子器件, 2003, (10): 35~37.
- 刘敏, 魏玲. MATLAB 通信仿真与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 应用接口编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- 尚涛, 石端伟, 安宁. 工程计算可视化与 MATLAB 实现[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.

(上接第 30 页)

## 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,一直致力和专注于微波、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>