

13.56 MHz RFID 读写器天线的设计与仿真

戴彩艳，蔡坚勇，陈银燕，朱雨，林李金，黄永亮，晏曼
(福建师范大学 光电与信息工程学院，福建 福州 350007)

摘要 为提高 13.56 MHz RFID 读写器天线的发射效率，并使其天线在实验室易于研发和试制，对 13.56 MHz RFID 天线系统的工作原理进行了简要介绍，在此基础上，把 13.56 MHz RFID 读写器天线线圈等效为 PCB 平面螺旋电感，利用 HFSS 软件建立模型并仿真得出电感值 L 、品质因子 Q 值等参数。其仿真结果得到的电感值与理论计算值相差 0.03 μH ，在可接受的范围内。考虑到实际天线产生的寄生电容，提出了在天线末端加开路补偿线圈的方法，避免因寄生电容产生地电流而使天线线圈的磁场强度降低，仿真结果证实了该方法的可行性。

关键词 RFID；天线线圈；品质因子；平面螺旋电感；HFSS

中图分类号 TN827 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2013)01-0042-04

Design and HFSS Simulation of 13.56 MHz RFID Reader Antenna

DAI Cai-yan, CAI Jian-yong, CHEN Yin-yan, ZHU Yu, LIN Li-jin, HUANG Yong-liang, YAN Man
(College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350007, China)

Abstract To improve the emission efficiency of 13.56 MHz RFID reader antenna and to research and make that antenna much easier in laboratory, the paper is based on the working principle of 13.56 MHz RFID antenna system, and deals with 13.56 MHz RFID reader antenna as the PCB planar spiral inductors, and gets the Inductance value L and the quality factor Q etc. by HFSS simulation. The result of HFSS simulation shows that the difference between the inductance value and the theory value is about 0.03 μH , which is accepted. Considering the parasitic capacitance generated by the actual antenna, this paper refers to add an open-loop coil at the end of the antenna coil so as to avoiding decreasing the magnetic field strength, which is caused by ground current because of parasitic capacitance, yet the result of simulation for the method has been proved feasible.

Key words RFID; antenna coil; quality factor; planar spiral inductor; HFSS

0 引言

射频识别(RFID)技术是一项利用射频信号进行非接触式双向通信，自动识别目标对象并获取相关数据的无线通信技术。在众多自动识别技术中，它具有精度高、适应环境能力强、阅读速度快、抗干扰能力强、便于应用等优点，实现了非接触式操作，无机械磨损，寿命长，支持读/写数据，可重复使用，使用了防冲撞技术，能同时识别多个高速运动物体。目前，RFID 技术在国内外发展非常迅速，在物流、仓储、零售、制造业、军事、交通、电力、食品和环境等行业已经有了广泛应用，其实现的主要功能有身份识别、物品防伪、资产管理、人员定位、图书、档案管理和汽车防盗等，其应用前景十分可观。

RFID 天线系统包括读写器天线和标签天线。基于 13.56 MHz 的被动式 RFID 系统，电子标签与读写器采用电感耦合方式进行能量传递与通信。读写器的天线线圈产生高频强电磁场，磁场穿过线圈的横截面和线圈周围空间，使得靠近读写器天线线

圈的标签天线在交变磁场中产生感应电压。工作于 13.56 MHz 的 RFID 天线系统采用变压器原理，遵循法拉第电磁感应定律，天线线圈在功能上等效于电感，其实际电感值取决于天线的结构、导线的厚度、线圈之间的距离、天线的尺寸以及天线绕制的圈数等。下面基于射频芯片 MF RC500，对 13.56 MHz RFID 读写器的天线设计的方法进行了探究。

1 天线结构的选择与等效电路

高频 RFID 读写器天线可以采用空心电感线圈或者铁氧体磁芯线圈，也可由印刷 PCB 板或其他介质基材的导电线路构成^[1]，常见的天线线圈形式有短圆柱形、环形、方形和矩形。对工作于高频(13.56 MHz)的 RFID 系统，由于其电磁波的波长远大于识别距离，读写器和应答器之间可等效为变压器耦合方式，采用电流分布基本一致的小型环形或方形天线为其最佳选择^[2]，这里选用方形形状的线圈。

收稿日期：2012-10-10

读写器的天线线圈可以用图 1 的等效电路表示。

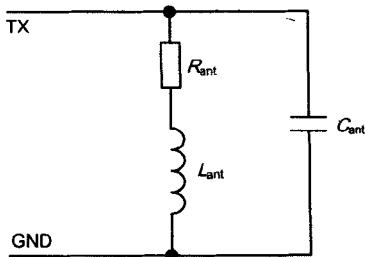


图 1 天线线圈等效电路

线圈的电感为 L_{ant} , R_{ant} 为线圈的电阻损耗, C_{ant} 为线圈之间和连接器之间的电容损耗。将 C_{ant} 电容与天线线圈并联或者串联起来组成 LC 谐振电路, 通过此谐振电路, 读写器可将能量传输至射频卡, 并与卡进行通信, 谐振电路的谐振频率可调谐到读写器的工作频率 13.56 MHz, 其值由汤姆逊公式^[4]得出:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{ant}} C_{\text{ant}}}}. \quad (1)$$

可知天线的频率与 $\sqrt{L_{\text{ant}} C_{\text{ant}}}$ 有关, 而天线尺寸越大, 线圈的电感 L_{ant} 就越大, 相对的电容 C_{ant} 则需减小。线圈电感与电容在谐振频率为 13.56 MHz 时的关系变化如图 2 所示, 由图可知, 天线当天线的电感超过 5 μH 时, 电容 C_{ant} 的取值很小, 这使得电容的匹配变得很困难, 电感的取值范围在 0.8 ~ 1.8 μH, 电容匹配较容易实现。

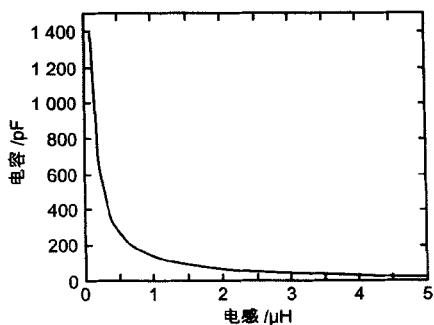


图 2 电容与电感关系曲线

2 天线的设计

2.1 天线最佳尺寸设计的理论依据

安培定理指出, 当电流流过一个导体时, 在此导体的周围产生磁场, 磁场的磁感应强度与流经导体的电流 i_1 成正比, 与距导体的距离成反比。根据毕奥—萨伐尔定律得, 距环形或方形线圈中心垂直距

离为 x 处的点的磁感应强度 B_z 的大小^[3] 为:

$$B_z = \frac{\mu_0 i_1 N_1 a^2}{2 (a^2 + x^2)^{3/2}} = \mu_0 H_z. \quad (2)$$

式中, i_1 为电流; N_1 为线圈匝数; a 为线圈边长; x 为离线圈中心的垂直距离; μ_0 为真空磁导率。当 $x \ll a$ 时, 由式(2)可知, 在 $x \ll a$ 范围内磁感应强度几乎不变。当 $x = 0$ 时, 公式简化为:

$$B_z = \mu_0 \frac{i_1 N_1}{2a}. \quad (3)$$

当 $x \gg a$ 时, 式(2)可化为:

$$B_z = \mu_0 \frac{i_1 N_1 a^2}{2x^3} = \mu_0 H_z. \quad (4)$$

式(4)表明, 当 $x \gg a$ 时, 磁感应强度的衰减和距离 x 的 3 次方成正比。由上可知, 从线圈中心到一定距离的磁场强度几乎不变, 而后急剧下降。这就意味着: 对于每种 RFID 系统的可识别距离都对应有一个最佳的天线边长 a 。最佳天线线圈边长 a 求解如下^[4], 假定天线线圈中电流不变, 设 x 为常数, 式(2)可改写为:

$$B_z = \frac{\mu_0 i_1 N_1}{2} \frac{a^2}{(a^2 + x^2)^{3/2}} = k \sqrt{\frac{a^4}{(a^2 + x^2)^3}}. \quad (5)$$

式中, $k = \mu_0 i_1 N_1 / 2$ 为常数。令式(5)两端同时对 a 求导, 并令 $dB_z/d a = 0$, 可解得 B_z 具有极大值时的条件, 即 $a = \sqrt{2}x$, 此时可获得最大磁场强度。由此可知, 读写器天线的最佳边长值等于最大期望阅读作用距离的 $\sqrt{2}$ 倍。

2.2 天线电感值与 Q 值的计算

天线线圈的电感一般采用阻抗分析仪测量得到, 在条件不允许的情况下, 也可由公式估算。环形和方形天线电感值可由如下公式估算^[5]:

$$L(\text{nH}) = 2 \times l_1 [\text{cm}] \times [\ln(\frac{l_1}{D_1}) - K] \times N^{1.8}. \quad (6)$$

式中, l_1 为一圈(匝)导线环的长度(cm); D_1 为线圈导线的宽度(mm); $K = 1.07$ (环形天线)/1.47(方形天线); N 为线圈的匝数; \ln 为自然对数函数。由式(6)可知, 天线线圈电感 L 与线圈匝数 N 的 1.8 次方成正比, 增加匝数 N 会使得线圈的电感 L 增大, 而根据式(1)可知, 线圈的电感过大, 将导致匹配电容难以取值为 1.6 μH, 一圈导线环的长度 $l_1 = 16$ cm、线圈形式为方形(K 为 1.47), 可根据式(1)和式(6)求出线圈匝数与与线宽的变化关系如图 3 所示, 其中, 线宽一般取值为 0.5 ~ 1.5 mm。

品质因子 Q_L 值表示电感线圈的损耗性能, Q_L 值越高, 天线的输出能量越高, 然而太高的 Q_L 值会干扰读写器的带通特性。天线的品质因子由下面的

公式定义^[6]:

$$Q_L = \frac{w_R L_{\text{ant}}}{R_{\text{ant}}}。 \quad (7)$$

式中, $w_R = 2\pi f_R$, f_R 为谐振频率; R_{ant} 为天线等效电阻; L_{ant} 为天线的等效电感。一般 RFID 系统的品质因子在 10 ~ 30 取值, 最大不要超过 60^[2,7], 以保证足够的带宽, 使得读写器无失真地传送用于数据调制的副载波信号^[8]。在实际测量天线线圈的电感量和品质因子时, 以频带宽、精度高的阻抗分析仪为最佳测量仪器。

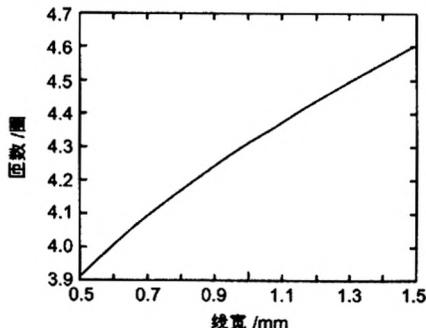


图 3 电感值为 1.6 μH 时线宽与匝数的关系

3 建模与结果分析

根据上述的天线设计方法, 采用业界公认的三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 进行建模仿真以验证方法的可行性。为更好地模拟实际印刷电路板制作天线, 天线的基板选用具有较高机械性能和介电性能的玻璃布基板 FR-4, 基板厚度为 1 mm, 电感线圈的厚度设为 0.035 mm, 电感材质选用导电性能良好的铜箔, 以减少天线线圈的电阻损耗, 若选定线宽为 0.8 mm, 由图 3 可知, 电感匝数为约为 4 匝。考虑到实际制作天线时线间距越小, 加工精度要求越高, 加工成本也越高, 所以设线间距为 0.3 mm。根据需要, 要使得 $x = 30$ mm, 根据 B_z 取得极大值时的条件, 即 $a = \sqrt{2}x$, L 约为 42 mm, 即取方形面积为 42 mm × 42 mm, 模型中采用单端集总端口激励, 将上述参数值代入式(6)可算出天线线圈电感值为 1 579.63 nH, 约为 1.58 μH 。据此, 用 HFSS 软件建立 PCB 平面方形结构螺旋式电感的模型, 设置中心频率为 13.56 MHz, 采用快速扫描方式, 扫描范围为 11 ~ 15 MHz, 输入功率设为 1 W。利用 HFSS 自带分析工具进行分析后, 可得到电感值在这个频段内随频率变化的关系, 仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知, 在频率为 13.56 MHz 时, 电感值约为

1.55 μH , 与理论计算值相差 0.03 μH 。考虑到天线的寄生电容, 本次设计在天线线圈末端加开路的补偿线圈, 避免产生地电流而降低天线线圈的磁场强度^[1]。

图 5 和图 6 分别是加补偿线圈前和加补偿线圈后的磁场强度标量图。图中, 白色区域表示磁场覆盖区, 白色区越大表示磁场覆盖区越广, 白色块越集中表示磁场强度越大。

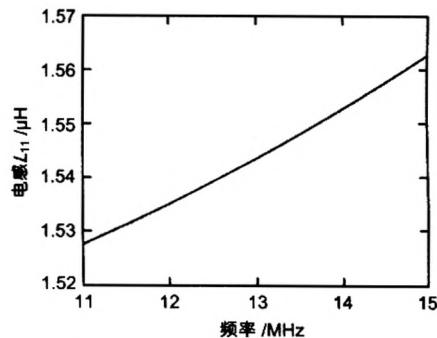


图 4 电感随频率变化关系曲线

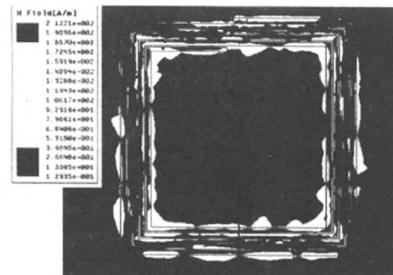


图 5 无补偿线圈时的磁场强度标量

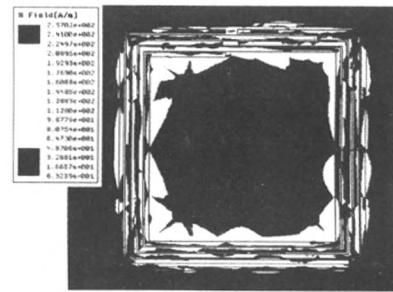


图 6 有补偿线圈时的磁场强度标量

比较图 5 和图 6 可知, 加补偿线圈后电感线圈表面的磁场强度有所加强。原因分析: 电感线圈存在寄生电容, 在末端加上开路线圈后, 开环的感应电流与电感线圈里寄生电容的电流大小几乎相等, 但方向相反, 这样就抵消了电感线圈的寄生电容所产生的电流, 相当于避免地电流的产生, 减小了电感线圈的功

率损耗,从而相对提高了电感的磁场强度。

4 结束语

根据 13.56 MHz RFID 系统的工作原理,探讨了 RFID 读写器天线的设计方法,并模拟实际制作 PCB 平面电感的方法,采用业界公认的三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS 建立一个方形结构螺旋式的平面电感模型,仿真所得的电感值与理论计算值相差 0.03 μH。此外,仿真所得的电感磁场标量图表明,在电感线圈末端加开路的补偿线圈有利于增强天线磁场强度。对 13.56 MHz RFID 读写器天线的最佳尺寸设计方法所进行的探索,对实际制作 PCB 平面 RFID 读写器天线具有较好的参考价值。

参考文献

- [1] 刘英,龚书喜.移动通信系统中的天线[M].北京:电子工业出版社,2011:252-254.
- [2] 李宝山.无源高频 RFID 系统读写器天线的设计[J].无线工程,2008,38(5):35-38.
- [3] LEE Y. Antenna Circuit Design. AN710-Application Note-

(上接第 32 页)

4 结束语

上述立足于现代化卫星导航系统的顶层设计,在对国外 GPS、Galileo 以及 GLONASS 等系统民用信号设计进行充分分析的基础上,从全球卫星导航系统用户需求和现代化升级建设等方面,分析了卫星导航系统民用信号设计需求。研究结论为卫星导航系统信号体制的现代化设计提供分析思路和设计依据。

参考文献

- [1] INTERFACE SPECIFICATION. IS-GPS-200E, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces [S], 2010.
- [2] INTERFACE CONTROL DOCUMENT. ICD-GPS-705, Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces [S], 2005.
- [3] INTERFACE SPECIFICATION. IS-GPS-800A, Navstar GPS Spaces Segment/User Segment L1C Interfaces [S], 2010.
- [4] GAL OS SIS ICD. European GNSS (Galileo) Open Service Signal in Space Interface Control Document [S], 2010.
- [5] GLONASS ICD. Glonass Interface Control Document

micro ID 13.56 MHz-RFID System Designguide [M]. Microchip, 2004:93-139.

- [4] 单承赣,单玉峰,姚磊,等.射频识别(RFID)原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2008:32-34.
- [5] 黄冕,罗志祥.基于 13.56 MHz RFID 阅读器的天线设计与实现[J].计算机与数字工程,2007,35(7):151-153.
- [6] CHENG Da, WANG Zhong, ZHOU Quan. Analysis of Distance of RFID System Working Under 13.56 MHz [C]// IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 219-230.
- [7] 郑洁,徐晶.RFID 读写器天线的研究与设计[J].微计算机信息(嵌入式与 SOC),2007,23(8-2):228-229.
- [8] 朱轶,王刚,王洪金.13.56 MHz RFID 阅读器天线的设计[J].微波学报,2008,24(5):22-26.

作者简介

戴彩艳 女,(1987—),硕士。主要研究方向:嵌入式终端设计。

黎坚勇 男,(1962—),副教授。主要研究方向:图像处理、嵌入式终端设计。

[S], 2002.

- [6] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS Principles and Applications (Second Edition) [M]. American: Artech House, 2006:194-199.
- [7] 王梦丽,王飞雪.三种电离层延迟多频修正算法的比较[J].测绘科学,2008,33(4):58-60.
- [8] 王梦丽,王飞雪.三频电离层延迟改正中多路径效应和观测噪声的削弱算法[J].测绘学报,2008:37(3),418-422.
- [9] JUNG J. Optimization of Cascade Integer Resolution with Three Civil GPS Frequencies [C]// Proceedings of ION GPS-2000, Salt Lake City, 2000:2 191-2 200.
- [10] SJOBERG L E. Unbiased vs Biased Estimation of GPS Phase Ambiguities From Dual Frequency Code and Phase Observables [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73:118-124.
- [11] HOREMUZ M, SJOBERG L E. Rapid GPS Ambiguity Resolution for Short and Long Baselines [J]. Journal of Geodesy, 2002, 76:381-391.

作者简介

王梦丽 女,(1978—),博士,工程师。主要研究方向:卫星导航系统总体技术论证、卫星导航系统及分系统测试技术以及卫星导航信号体制等。

金国平 男,(1978—),博士,工程师。主要研究方向:卫星导航系统上行注入信号体制、卫星导航系统平稳过渡等。

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>