

小型 RFID 偶极子天线设计与优化 *

张亚平，陶波，陈显才，吴光华

(华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验, 湖北 武汉 430074)

摘要：无源 RFID 标签的读写性能主要取决于其天线和芯片的性能，其中超高频 RFID 标签通常采用偶极子天线。从理论-仿真-实验的角度详细介绍了偶极子天线的设计和优化方法，并制作了 4 款小型超高频 RFID 标签样品。测试结果表明，4 款样品标签的性能与仿真的优化结果高度一致，该设计和优化方法可行。

关键词：射频识别；电子标签；偶极子天线；优化

中图分类号：TN911

文献标识码：A

文章编号：0258-7998(2012)03-0117-03

Design and optimization of small RFID dipole antennas

Zhang Yaping, Tao Bo, Chen Xiancai, Wu Guanghua

(State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The read range of passive RFID tags is decided by the properties of the antenna and the IC used by the tag. In UHF RFID systems, the dipole antenna is one of the most used. Based on theoretically analysis, electromagnetic simulation and experiment, this paper presents the design and optimization methods of a small dipole antenna in details. Four prototypes were fabricated. The test results show that the performance of the four tags is in good agreement with the simulation. The design and optimization method is effective.

Key words: RFID; tag; dipole antenna; optimization

射频识别 RFID(Radio Frequency Identification)是一种非接触式自动识别技术，它通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据，识别工作无须人工干预，可工作于各种恶劣环境，被广泛应用于物流、防伪等领域。

RFID 系统通常由读写器、标签和服务器组成。标签分有源标签和无源标签，无源标签由天线和芯片构成，结构简单，成本低。在超高频频段，标签天线常采用半波偶极子天线^[1]。偶极子天线具有结构简单、效率高、制造成本低等优点。

1 偶极子天线设计

1.1 天线结构设计

由半波偶极子天线的定义，天线的总长度为工作频率下电磁波波长的 1/2。结合电磁波在电介质中传播的波长公式，半波偶极子天线的长度 L_a 为：

$$L_a = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}f} \quad (1)$$

* 基金项目：国家自然科学基金项目(50805060)；武汉市青年科技晨光计划项目(201150431119)和工信部电子产业发展基金招标项目(HGTX0911)

其中， ϵ_r 为电介质的相对介电常数， c 为电磁波的传播速度， f 为工作频率。

在实际 RFID 标签应用中，天线通常制作在 PET 等电介质基板表面，式(1)中电介质的相对介电常数 ϵ_r 须用有效相对介电常数 ϵ_{eff} 来表示^[2]：

$$\epsilon_{eff} = \frac{\alpha\epsilon_r + \beta\epsilon_{air}}{2} \quad (2)$$

其中， ϵ_r 为基板材料的相对介电常数， ϵ_{air} 为空气相对介电常数(约等于 1)。 α 、 β 是由基板厚度等因素决定的权重因数，需通过仿真确定。

为了缩减标签尺寸，本文采用弯折偶极子天线。由于弯折偶极子天线的弯折线之间相互耦合影响，导致用式(1)计算的天线长度有较大误差。在设计中，本文先用式(1)估算天线长度，再通过仿真分析进行优化计算。

常用超高频 RFID 标签芯片的阻抗为复数，并具有较大的虚部。为使标签的功率传输系数 τ 达到最优值，要求设计天线的阻抗与芯片阻抗共轭匹配。为此，需要在偶极子天线上加入阻抗匹配的结构，本文使用 T 型阻

抗匹配的方法^[3]。

本文设计的标签采用 Impinj Monza 4 芯片，其阻抗为 $11-j143\Omega$ ，读取的门限功率为 -17.4 dBm 。文中采用矩量法仿真，仿真软件为 Zeland IE3D。通过初步的计算和仿真，得到如图 1 所示的偶极子天线。天线材料为铝（电导率 $\sigma=38\text{ MS/m}$ ），厚度为 0.01 mm ；基板材料为 PET（相对介电常数 $\epsilon_r=3.5$ ），厚度为 0.05 mm 。该天线的基本结构尺寸如表 1 所示，仿真得到其阻抗为 $1.98+j144.3\Omega$ ，共轭匹配增益为 -3.17 dBi 。

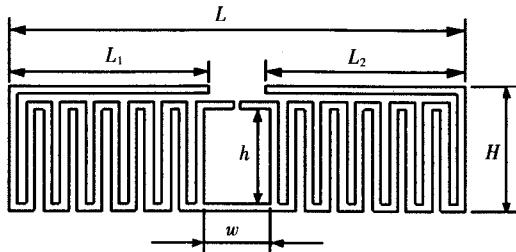


图 1 天线结构

1.2 天线结构优化

RFID 标签的性能通常以读写距离 d 为判断依据， d 可用自由空间的 Friis 公式估算^[4-5]：

$$d = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{\frac{P_r G_r G_t \rho \tau}{P_{th}}} \quad (3)$$

其中， c 为电磁波的传播速度， f 为系统工作频率， P_r 为读写器的发射功率， G_r 为读写器天线的增益， G_t 为标签天线的增益， ρ 为读写器天线与标签天线之间的极化损失， P_{th} 为标签芯片的门限功率， τ 为标签天线与芯片之间的功率传输系数，表征天线与芯片之间的能量传输。其定义如下：

$$\tau = \frac{4R_d R_c}{|Z_a + Z_c|^2} \quad (4)$$

其中， $Z_a = R_a + jX_a$ ， $Z_c = R_c + jX_c$ 分别为天线和芯片的阻抗。当天线与芯片阻抗匹配，即 $Z_a = Z_c^*$ 时， τ 取最大值 1。

本文使用的读写器为圆极化天线，而偶极子为线极化，所以 $p=0.5$ 。芯片的门限功率 P_{th} 由芯片的设计和制造工艺决定，芯片一经选定， P_{th} 即确定，因而标签的天线设计是决定标签性能的关键。在读写器参数确定的情况下，当标签天线增益 G_t 和功率传输系数 τ 达到最大值时，标签的读写距离最大。

标签天线设计的目的是在标签尺寸等限制条件下，使得标签天线的增益 G_t 和功率传输系数 τ 最大。

在图 1 所示天线的基本结构中天线由弯折线和臂 L_1 、 L_2 组成，以达到所要求的长度。由天线长度的计算公式(1)可知，调节天线的总长度能够调节天线本身的谐振频率和阻抗。图 2 为其他参数不变，改变 L_1 、 L_2 的长度时所得到的阻抗曲线。由图可见，增大 L_1 和 L_2 的长

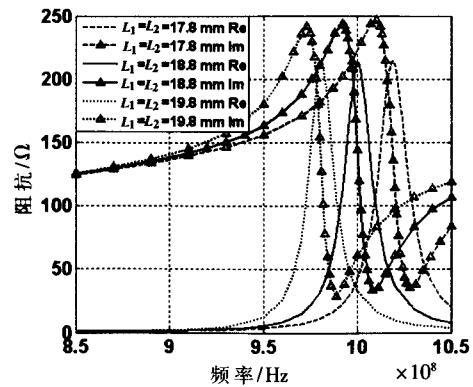


图 2 减小 L_1 、 L_2 后天线的阻抗

度，阻抗曲线整体向左移，天线谐振频率减小，阻抗实部最大值增大，虚部最大值减小。

因此，可以通过调节天线长度来优化天线性能。图 3 为 L_1 和 L_2 的值与标签在 915 MHz 的增益的关系曲线，随着 L_1 和 L_2 增大，标签的增益也增大。图 4 为 L_1 和 L_2 的值与标签在 915 MHz 的功率传输系数的关系曲线，随着 L_1 和 L_2 增大，功率传输系数先增大后减小，在 $L_1=L_2=19.8\text{ mm}$ 时达到最大值，此时天线与芯片阻抗匹配达到最佳。图 5 是根据式(3)计算的标签读写距离与 L_1 和 L_2 的值的关系曲线，读写器发射功率 P_r 为 28 dBm ，天线为圆极化，增益 G_r 为 3 dBi 。

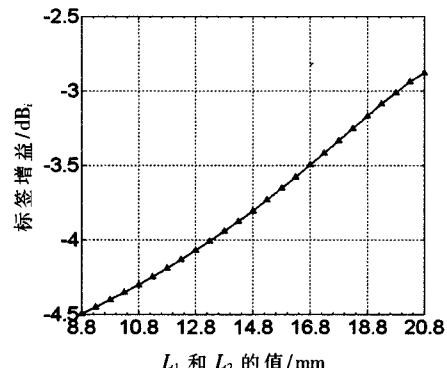


图 3 L_1 和 L_2 的值与标签增益的关系

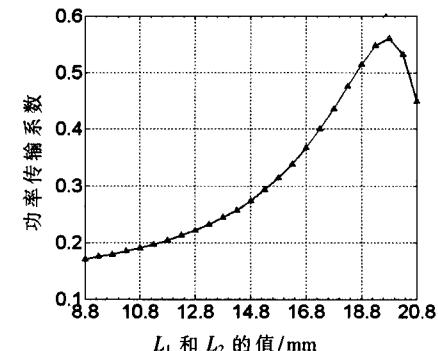
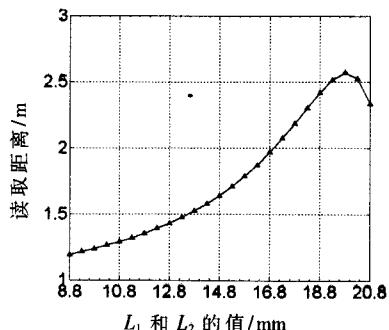


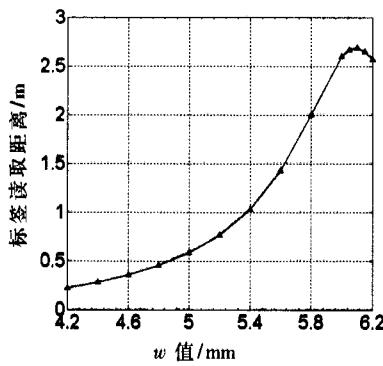
图 4 L_1 和 L_2 的值与标签功率传输系数的关系

由图 5 可见， $L_1=L_2=19.8\text{ mm}$ 时，标签理论读写距离达到最大值 2.56 m ，天线的阻抗仿真值为 $2.83+j148.6\Omega$ ，功率传输系数为 0.56 。

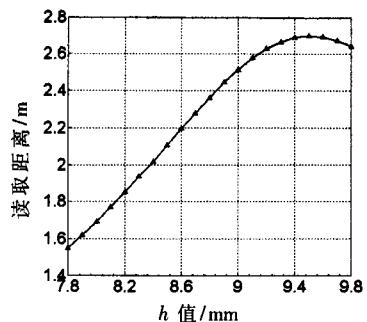
图 5 L_1 和 L_2 的值与标签读取距离的关系

通过调整 T 型阻抗匹配结构，即调节 w 和 h 的大小，能够进一步优化天线阻抗，使天线阻抗与芯片阻抗匹配得更好。按照改变天线长度的方法，可以得到改变 T 型阻抗匹配时天线的性能参数，并最终计算得到标签的理论读取距离。

图 6 为 $L_1=L_2=19.8$ mm, $h=9.8$ mm 时，改变 w 的值，得到的标签理论读取距离与 w 的关系曲线。标签增益随 w 增大而增大，功率传输系数在 $w=6.1$ mm 时达到最大值，理论读取距离在 $w=6.1$ mm 时达到最大值 2.68 m。

图 6 标签读取距离与 w 值的关系曲线

改变 h 的值，取得的效果与改变 w 值相同。图 7 为 $L_1=L_2=19.8$ mm, $w=6.1$ mm 时，改变 h 的值，得到的标签理论读取距离与 h 的关系曲线。标签增益随 h 增大而增大，功率传输系数在 $h=9.5$ mm 时达到最大值，理论读取距离在 $h=9.5$ mm 时达到最大值 2.7 m。

图 7 标签读取距离与 h 值的关系曲线

通过上述优化过程，得到了天线结构参数的较优值，如表 2 所示。

表 2 天线结构参数较优值

| 参数 | 数值/mm |
|-----------|-------|
| L | 43 |
| H | 13 |
| $L_1=L_2$ | 19.8 |
| w | 6.1 |
| h | 9.5 |

2 样品制作与测试

根据仿真结果，制作了 4 款天线以作比较，4 款天线的结构参数如表 3 所示。

表 3 样品天线尺寸 (mm)

| 天线型号 | L | H | $L_1=L_2$ | w | h |
|------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| 773 | 43 | 13 | 18.3 | 6.2 | 9.8 |
| 774 | 43 | 13 | 18.8 | 6.2 | 9.8 |
| 775 | 43 | 13 | 19.8 | 6.2 | 9.8 |
| 776 | 43 | 13 | 19.8 | 6.1 | 9.5 |

对于样品天线，本文使用 Agilent ENA5071C 矢量网络分析仪测试了阻抗，并用 Atid-570 手持式读写器(圆极化天线, $EIRP=31$ dBm) 测试了相应标签的读写距离。考虑到制造误差等因素的影响，每个型号的样品天线都测试了 5 组数据，然后取平均值。表 4 是样品天线 915 MHz 的阻抗和读取距离的仿真与测试结果对比，其中理论读取距离用式(3)计算。在读写距离的计算中，由于忽略了环境干扰、读写器内部的能量传输损耗以及标签的能量损耗等因素，理论值大于实测值。阻抗测试因缺少微波暗室，得到的结果与仿真结果有偏差，其中虚部与仿真结果接近，而实部偏大。

表 4 天线测试结果数据

| 天线 | 阻抗/ Ω | 读取距离/m |
|-----|--------------|-------------|
| 773 | 仿真 | 1.76+j143.0 |
| | 测试 | 46.0+j146.4 |
| 774 | 仿真 | 1.98+j144.3 |
| | 测试 | 53.0+j151.4 |
| 775 | 仿真 | 2.83+j148.6 |
| | 测试 | 43.6+j140.2 |
| 776 | 仿真 | 2.64+j143.5 |
| | 测试 | 46.5+j146.7 |

4 款样品天线分别选自天线优化设计的不同阶段，天线从 773~776 依次作了改进。从读取距离的测试结果可见，773~776 的读取距离依次增加，天线 776 的读取距离最远，与仿真结果一致，可见本文所用的优化方法有效。

无源超高频 RFID 标签通常采用偶极子天线，本文采用理论分析和仿真优化相结合的方式设计了一款偶极子天线，并采用 T 型阻抗匹配结构实现与标签芯片的阻抗匹配。通过调节天线长度和阻抗匹配结构的尺寸对偶极子天线进行了优化，并制作了 4 款小型超高频 RFID 标

(下转第 123 页)

(3) 随着成员载波数增加,不仅原始信号的 CM 会逐渐增加,而且通过相位旋转处理获得的增益同样增加。较多的成员载波为相位旋转算法提供了更多的灵活度和可优化空间。

(4) 只根据导频选择旋转因子完全可以得到基于全数据选择达到的效果,并且导频序列提前可以预判,因此不受处理延时的限制。

上行仿真结果如图 7 所示,可以得到与下行类似结论,不过上行随成员载波数的增加 CM 恶化比较严重,这是由于上行导频集中在完整的符号中造成的。从图中可以看出,在 1 个和 2 个 CC(成员载波)的情况下旋转和不旋转情况下的 CM 基本相同(曲线趋于一致),但经过相位旋转以后,即使随着 CC 的增加,最差的情况下 CM 也不会超过 3.6 dB,相比于不作处理的 4.4 dB 得到了很大的优化。

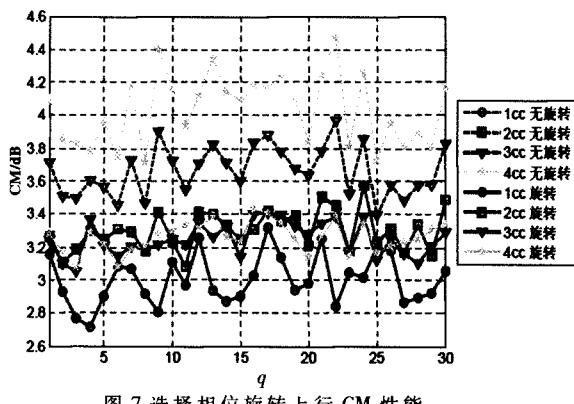


图 7 选择相位旋转上行 CM 性能

本文主要介绍了一种在载波聚合下降低由重复导频引起的 CM 过高问题的方法——选择旋转相位方法。

(上接第 119 页)

签样品。测试结果表明,4 款样品标签的性能与预期的优化结果一致,优化后的标签读写距离达到 1.59 m。

参考文献

- [1] FINKENZELLER K. RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication[M]. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [2] DEAVOURS D. UHF RFID antennas[M]. RFID Systems: Research Trends and Challenges, Bolic M, Simplot-Ryl D, Stojmenovic I, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010, 57–98.
- [3] MARROCCO G. The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008, 50(1): 1–21.

通过仿真实证明,在成员载波数较多的情况下,此方法可以有效降低信号的 CM。

参考文献

- [1] 沈嘉. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008.
- [2] Huawei. 3GPP R1-082448, Carrier aggregation in Advanced E-UTRA Warsaw Poland, June 2008.
- [3] San Francisco. 3GPP R1-091809. Component carrier structures, May 2009.
- [4] Motorola. Cubic Metric in 3GPP-LTE, 3GPP TSG RAN, R1-060023.
- [5] Huawei. DL/UL Asymmetric Carrier aggregation. 3GPP TSG RAN, R1-083706.
- [6] Samsung. DL RS for carrier aggregation with reduced PA-PR. 3GPP TSG RAN, R1-091239.
- [7] 3GPP TR36.211 V10.0.0. Physical Channel and Modulation, Release 10, January, 2011.

(收稿日期:2011-07-21)

作者简介:

王文涛:男,1987 年生,在读硕士研究生,主要研究方向为 LTE-A 载波聚合技术。

史治平:女,1972 年出生,硕士生导师,主要研究方向为无线通信、信号处理、差错控制编码。

曾庆展:男,1986 年出生,在读硕士研究生,主要研究方向为 LTE-A 载波聚合技术。

- [4] RAO K V S, SANDER P V N. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005, 53(12):3870–3876.

- [5] TIKHOV Y. Comments on antenna design for UHF RFID tags a review and a practical application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006, 54(6):1906

(收稿日期:2011-09-27)

作者简介:

张亚平,男,1986 年生,硕士研究生,主要研究方向:RFID 标签设计与应用。

陶波,男,1977 年生,副教授、博士生导师,主要研究方向:电子制造工艺,纳米制造和物联网技术。

陈显才,男,1981 年生,博士研究生,主要研究方向:电子制造装备和工艺。

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>