

矿用 RFID 标签天线的分析与设计 *

杨汉华, 闫述

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)

摘要

本文提出了一种用于矿井人员定位系统的结构紧凑的 Hilbert 分形倒 F 标签天线。通过 HFSS 软件仿真, 分别给出了普通倒 F 天线和 Hilbert 分形倒 F 天线的回波损耗、方向图及天线增益。仿真结果表明, 这 2 种天线性能相当, 但 Hilbert 分形倒 F 天线具有更小的尺寸, 更符合矿用 RFID 标签天线小尺寸、低功耗的要求。制作的 Hilbert 分形天线经测试, 在 2.425 GHz 的中心频率下, 回波损耗为 -38.28 dB, 带宽为 190 MHz。

关键词 RFID; 矿井定位系统; 倒 F 天线; Hilbert 分形结构

1 引言

近年来煤矿事故频繁发生, 直接威胁着矿工的人身安全。因此, 如何加强安全生产的防范措施, 如何准确、实时、快速履行煤矿安全监测职能, 保证抢险搜救的高效运作, 成为当前迫切需要解决的课题。射频识别 (radio frequency identification, RFID) 技术是 20 世纪 90 年代兴起的一种自动识别技术, 通过无线射频方式进行非接触双向数据通信, 对目标加以识别并获取相关数据。目前该技术已在煤矿安全管理中崭露头角^[1]。

射频识别系统在不同的应用场合下, 对天线有不同的要求。对于矿井人员定位系统来说, 考虑到矿井设备的防爆要求以及 RFID 标签小型化、高度灵活等特点, 设计标签天线时需要考虑功耗低、体积小、重量轻、性能稳定等因素。从这几个角度出发, 印刷于标签芯片所在的 PCB (printed circuit board, 印刷电路板) 上的单极天线应该是最佳选择。本文以印刷倒 F 单极天线为基础, 设计了一款采

用 Hilbert 分形结构的工作于 2.4 GHz 微波区域的矿用 RFID 标签天线。仿真及实测结果表明, 该天线能够很好地满足矿井人员定位系统对射频天线的要求, 如通信距离、结构、稳定性等方面, 其低功耗和小尺寸的特点更引人注意。

2 天线的结构与分析

现在使用的 RFID 标签天线大多数为单极鞭形天线, 其结构简单, 但占用空间较大。现代无线通信领域常采用的天线是倒 F 型单极天线, 它结构紧凑, 带宽适中, 不容易损坏, 而且功耗更低。若在倒 F 结构基础上合理采用 Hilbert 分形结构, 则设计出的天线结构更紧凑, 更适用于矿井人员定位系统。

2.1 平面倒 F 结构

倒 F 天线常用于无线通信系统中^[2], 典型的倒 F 天线结构如图 1 所示。倒 F 天线是在如图 2 所示的倒 L 天线的垂直元末端加一个倒 L 结构而成, 其作用是调整天线和馈电端的匹配, 无需另外的匹配电路, 简化了天线结构。倒 F 天线具有低轮廓结构, 辐射场有水平极化和垂直极化 2 种, 这些特性对于矿用 RFID 标签天线来说是非常重要的。

* 国家自然科学基金资助项目 (No.40674060)

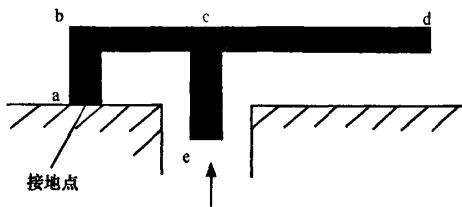


图 1 典型的倒 F 形天线结构

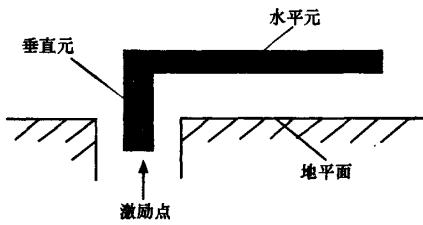


图 2 典型的倒 L 形天线结构

一般来说,倒 F 天线水平单元的尺寸估算值可以由式(1)得到:

$$L_{bc}+L_{cd} \approx \frac{C}{4f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \left(1 + \frac{10h}{w}\right)^{-1/2} \quad (2)$$

其中, L_{bc} 表示 bc 段的长度, L_{cd} 为 cd 段的长度, C 为真空中光速, ϵ_r 为介质板的有效介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, h 和 w 分别为介质板的厚度和天线的线宽。

2.2 Hilbert 分形结构

Hilbert 曲线作为一个连续图形不存在任何交叉点, 随着分形阶数的增加, 曲线通过自相似迭代从一维空间逐渐填充到二维空间, 曲线具有严格的自相似性。 n 阶 Hilbert 分形曲线的分数维(D)可以按式(3)计算:

$$D(n) = \frac{\ln[(4^n - 1)/(4^{n-1} - 1)]}{\ln[(2^n - 1)/(2^{n-1} - 1)]} \quad (3)$$

Hilbert 分形曲线的分数维随曲线阶数的增加而增大, 表征了分形曲线占据空间的利用率。由式(3)可知, Hilbert 分形曲线的分数维取值范围为[1,2], 是一种结构简单、空间占有率高的分形结构。

图 3 所示为 0~2 阶的 Hilbert 分形迭代结构, 从中可以看出, Hilbert 是 1/3 等边分形曲线, 若 0 阶 Hilbert 曲线各边长均为 h , 则 n 阶 Hilbert 曲线总长度为:

$$L(n) = \frac{4^{n-1} - 1}{2^{n-1} - 1} h \quad (4)$$

由式(4)可知, 随着 Hilbert 分形迭代次数的增加,

Hilbert 曲线的长度呈指数上升, 趋近于无穷大, 逐渐填充整个轮廓。参考文献[3]中指出当迭代次数为 5 时, $\lambda/4$ 单极天线长度为原来的 65 倍, 受耦合效应的作用, 天线的谐振频率并没有降为原来的 $1/65$, 而是 $1/11$, 但仍然具有很强的尺寸压缩能力。因此, Hilbert 曲线非常适用于小型化分形天线的设计^[4]。

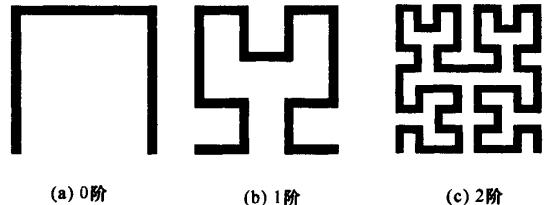


图 3 Hilbert 分形迭代结构

3 天线设计与仿真

本文所设计的矿用 RFID 标签天线的具体技术指标如下: 天线的中心频率为 2.43 GHz, 工作带宽不少于 120 MHz, 输入阻抗 50 Ω, 增益大于 1.5 dB, 方向图接近全向或者半全向, 同时具有水平和垂直极化特性。仿真采用 Ansoft 公司的 HFSS v10.0 软件。

3.1 普通倒 F 单极天线

普通倒 F 单极天线结构如图 1 所示, 印刷在厚度为 1.6 mm、相对介电常数为 4.4 的 FR4 介质板上, 天线线宽 1 mm。根据设计要求, 由式(1)、(2)算出印刷倒 F 单极天线的横向单元长度($L_{bc}+L_{cd}$)应为 17.7 mm。据此取天线的初始横向单元 $L_{bc}=3.5$ mm, $L_{cd}=14.5$ mm。利用 HFSS 的功能项 Optimetrics 对各项参数进行优化和扫描分析, 得到满足设计要求的最佳尺寸如下: $L_{bc}=3.0$ mm, $L_{cd}=15.0$ mm, $L_{ba}=6.2$ mm, $L_{ea}=8.0$ mm。

图 4 是上述普通倒 F 单极天线的回波损耗仿真结果, 从中可以看到, 该天线的谐振频率为 2.42 GHz, 该频率处

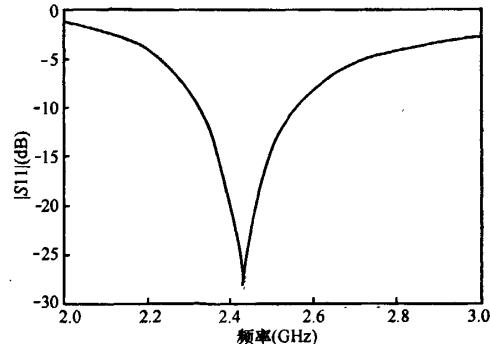


图 4 普通倒 F 单极天线的回波损耗仿真结果

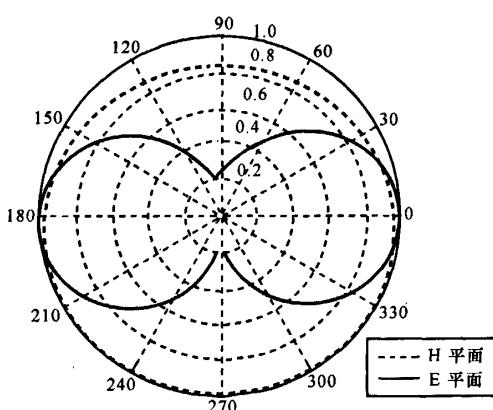


图 5 普通倒 F 单极天线的方向图

的回波损耗为 -28.15 dB , 在 $2.33\sim2.53 \text{ GHz}$ 频率范围内驻波比小于 2, 带宽约为 200 MHz 。图 5 的仿真结果表明, 该天线在谐振点 2.42 GHz 处的 H 面方向图具有全向特性, E 面方向图具有半全向特性, 达到了设计要求。该天线谐振频率处最大增益的仿真结果为 2.07 dB 。

3.2 Hilbert 分形倒 F 单极天线

普通倒 F 单极天线的横向单元部分($L_{\text{bx}}+L_{\text{ed}}$)尺寸仍然较大, 可利用 Hilbert 曲线很强的空间填充性代替 L_{ed} 直线部分。考虑现有天线的制作工艺水平, 本文仅取 1 阶 Hilbert 分形曲线作为分析对象。基于 Hilbert 分形结构的倒 F 天线结构如图 6 所示。根据式(4), 当 $n = 1$ 时, Hilbert 分形曲线长度 $L = 5h$ 。取初始值 $h = 6 \text{ mm}$, 则 Hilbert 曲线 $L = 30 \text{ mm}$, 利用 Optimetrics 对各项参数进行优化和扫描分析, 得到天线各单元的尺寸如表 1 所示。

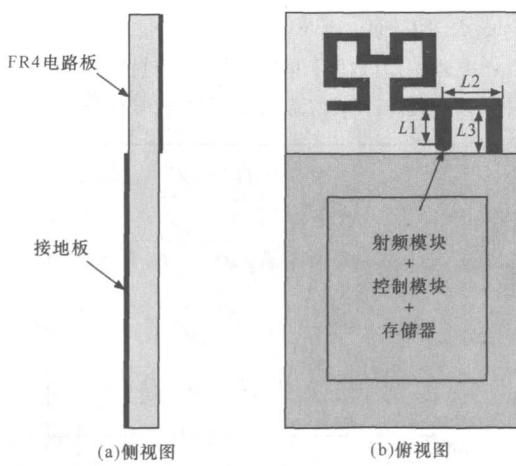


图 6 基于 Hilbert 分形结构的倒 F 天线结构

表 1 Hilbert 分形倒 F 天线各单元的尺寸

参数	L_1	L_2	L_3	L
尺寸(mm)	2.0	2.8	3.0	30.3

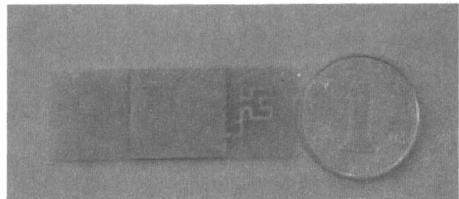


图 7 加工的标签天线实物

按照图 6 所示的尺寸制作了一个天线(如图 7 所示)并进行了实验, 仿真与实测的回波损耗如图 8 所示, 其中实测天线的谐振频率为 2.425 GHz , 相应 -10 dB 阻抗带宽为 190 MHz ($2.34\sim2.53 \text{ GHz}$), 与仿真结果基本吻合。将 Hilbert 分形倒 F 天线方向图(图 9)与图 5 进行比较, 可以发现, 在天线尺寸大大缩小之后, 该天线仍然保持了与普通倒 F 单极天线相当的方向性。该天线最大增益的仿真结果为

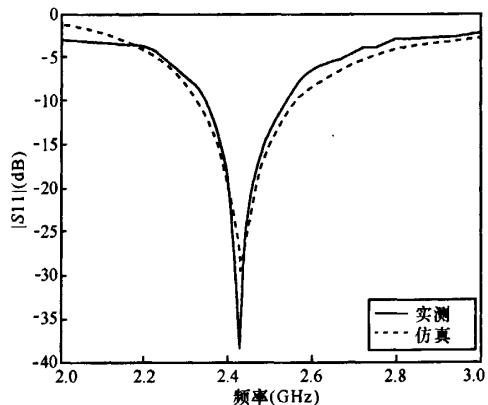


图 8 Hilbert 分形倒 F 天线的回波损耗

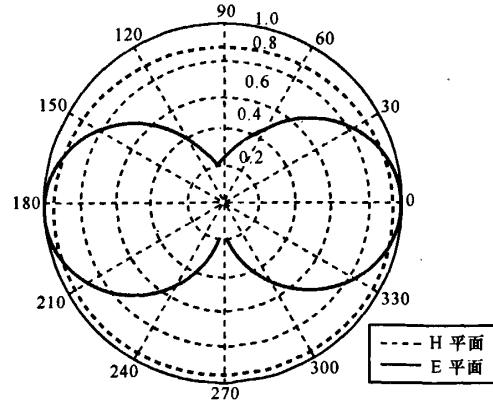


图 9 Hilbert 分形倒 F 天线的方向图

1.9 dB, 略小于普通倒 F 单极天线, 但并不影响其在煤矿井下的应用。

综上分析, 采用 Hilbert 分形结构后的倒 F 单极天线, 尺寸仅为 9.76 mm × 9.5 mm。与普通倒 F 单极天线相比, 其纵向长度只增加了 1.5 mm, 而横向长度减小了 8.24 mm, 在保持原有性能的基础上大大缩减了标签天线的尺寸。

4 结束语

本文设计的 Hilbert 分形倒 F 天线结构紧凑, 体积小, 性能稳定, 且在 ISM (industrial, scientific, medical) 规定的 2.4~2.5 GHz 工作频段内, 满足天线的带宽要求。同时, 这种天线设计灵活, 加工容易, 并且可以和射频芯片组成独立的射频收发装置, 非常适合于短距离、低速率、低功耗的

无线通信设备。因此, Hilbert 分形倒 F 天线在煤矿井下定位系统应用中有特殊的优势。

参考文献

- 1 张成海, 张铎. 现代自动识别技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2003
- 2 Chan P W, Wong H, Yung E K N. Wideband planar inverted-F antenna with meandering shorting strip. *Electronics Letters*, 2008, 44(6): 395~396
- 3 Anguera J, Puente C, Soler J. Miniature monopole antenna based on the fractal Hilbert curve. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Texas, June 2002
- 4 Azad M Z, Ali M. A compact Hilbert planar inverted-F antenna for dual-band mobile phone applications. In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, California, June 2004

Analysis and Design of RFID Tag Antenna for Mine Monitoring Systems

Yang Hanhua, Yan Shu

(Department of Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract A compact inverted-F tag antenna based on Hilbert fractal structure is designed for mine monitoring system. Then, the return loss, radiation patterns and gains of the normal inverted-F antenna and Hilbert fractal inverted-F antenna are simulated by Ansoft HFSS separately. The simulation results show that the performance of the two antennas are similar, but the later is more satisfactory to the requirement of small size and low power loss for mine monitoring systems. The manufactured antenna was tested to operate at 2.425 GHz with a return loss of -38.28 dB and a bandwidth of 190 MHz, which suits the requirements of the system.

Key words RFID, mine monitoring system, inverted-F antenna, Hilbert fractal structure

(收稿日期: 2008-11-03)

·简讯·

华为与沃达丰联合部署 Femtocell 企业网关解决方案实验局

华为技术有限公司(简称“华为”)与沃达丰近日宣布, 双方将联合部署试验局以合作推出 Femtocell 企业网关解决方案。这个试验局将为特定的企业用户提供专门的沃达丰接入网关产品, 并通过实际应用, 评估该产品在加强室内

的宽带接入能力, 尤其是室内高速数据业务和语音业务的性能方面的表现。

通过对于 Femtocell 企业网关解决方案在不同环境下性能表现的评估, 华为和沃达丰能够收集到第一手的用户需求, 以便将来为其提供更多具有针对性的业务。此前, 双方在技术测试和友好用户试验中也已经取得了成功合作。

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>