

一种基于 Koch 和 Hilbert 分形加载的电子标签天线设计

赵万年^{1,2}, 武岳山^{1,2}, 刘奕昌²

(1. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127;

2. 深圳市远望谷信息技术股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 研究了不同角度、不同阶数的基于 Koch 曲线的天线性能, 仿真和测试结果表明, 在保持天线长度不变的条件下, 随着角度和阶数的增加, 天线的谐振频率下降, 而天线的方向图依然具有半波振子的低方向性。在此基础上, 综合 Koch 和 Hilbert 曲线, 设计了一款尺寸为 55mm×10mm 的小型化电子标签。该标签天线不仅具有半波阵子的低方向性, 而且简单、便于调谐。

关键词: Koch 曲线; Hilbert 曲线; RFID; 电子标签; 天线

中图分类号: TN821+.4

文献标识码: B

Design of tag antenna based on Koch and Hilbert curve

ZHAO Wan Nian^{1,2}, WU Yue Shan^{1,2}, LIU Yi Chang²

(1. School of Information Science & Technology, Northwest University, Xi'an 710127 China;

2. Invengo Information Technology Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The paper present how the iteration number and angle affect the characters of tag antenna based on Koch curve. The simulation and test result show that the resonant frequency would decrease with the iteration number and angle increasing on condition that the height of tag antenna is not changed. Besides, the radiation pattern is consist with dipole, namely, it is omni-direction. Based on this result, a tag antenna based on Koch and Hilbert curve is designed. The size of tag antenna is 55mm×10mm. The tag antenna is not only omnidirection, but also simple, convenience and tuning conveniently.

Key words: Koch curve; Hilbert curve; RFID; tag; antenna

“分形”是 Benoit.B.Mandelbrot 在 1975 年提出的^[1], 其原意是“不规则的、分数的、支离破碎”的物体。分形具有两个重要特征, 即自相似性和标度不变性。“分形天线”一词是在 1993 年 IEEE 年会上出现的, 在 1995 年 8 月 Cohen 发表了分形天线的第一篇论文^[2]。分形天线是指基于分形结构而设计的天线。分形结构的自相似特性和标度不变特性在分形天线的设计中体现为多频带特性和尺寸缩减特性。此外, 分形天线和分形天线阵具有低的旁瓣电平^[3-5]。

传统的 Koch 曲线采用角度为 60° 的三角形加载, 本文突破常规, 在保持天线高度不变的条件下, 研究了角度分别为 30°、45°、60°、75° 时, 标签天线的性能, 并研究了不同阶数时的天线性能。在此基础上, 设计并制作了基于 Koch 和 Hilbert 联合加载的电子标签, 该标签不仅具有较好的性能, 而且简单、便携、便于应用。

1 分形结构原理

在欧式空间中, 人们习惯于整数维数, 不会出现小数。而分形理论打破常规, 把维数从整数推广到了分数。分形曲线的分数维是一个特征数, 用来度量结构的不平度、复杂性、卷积度等, 可以是小数。即物体或者集合图形的维数可以是连续变化的。对于具有自相似结构的分形图形, 其维数 D 是下列方程的解:

$$k_1\left(\frac{1}{h_1}\right)^D + k_2\left(\frac{1}{h_2}\right)^D + k_3\left(\frac{1}{h_3}\right)^D + \dots + k_n\left(\frac{1}{h_n}\right)^D = 1 \quad (1)$$

式中 k_n 为初始曲线的拷贝数, h_n 为缩放比例, n 为缩比尺度数。

1.1 Koch 曲线分形技术

Koch 分形几何是在 1904 年被瑞典科学家 Helge von Koch 提出的。Koch 分形几何是由仿射变换集的迭代函数系统(IFS)生成。

Koch 曲线因其具有很强的空间填充属性, 因而近年

《电子技术应用》2009 年第 1 期

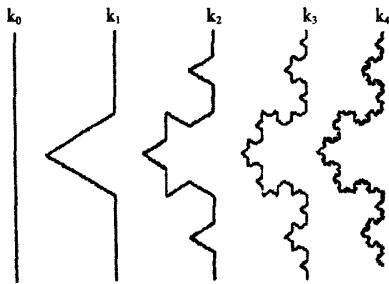


图 1 Koch 曲线迭代原理

来在实现天线小型化设计中受到广泛的重视和深入研究。由于 Koch 曲线的拷贝数为 4, 缩放比例为 3, 代入式(1)可以求得 Koch 曲线的分形维数为 1.262, 所以, 它是介于一维和二维之间的图形。

Koch 曲线的迭代过程如图 1 所示: 将偶极子天线的两臂分为三等分, 将中间的三分之一臂长换为两个等长且相交 60° 的线段, 就得到 1 阶 Koch 曲线, 依此类推可以得到高阶 Koch 曲线。这样不难知道, 曲线的总长为 $L=h\times(4/3)^n$, h 为曲线的高度, n 为分形阶数。其数学推导可以由仿射变换(IFS)得到^[6]。

$$w \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} = Ax + t \quad (2)$$

其中, a, b, c, d, e, f 均为实数, a, b, c, d 表示旋转和收缩, e, f 表示位移。 w 为仿射变换。 x_1, x_2 分别为分段点处的坐标。将仿射变换写为:

$$w = [a, b, c, d, e, f] \quad (3)$$

相应的矩阵 A 可以写为:

$$A = \begin{bmatrix} r\cos\theta & -r\sin\theta \\ r\sin\theta & r\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 r 为缩放因子, θ 为旋转的角度。

一个 IFS 可以由几个压缩映射族构成。即:

$$W(A) = \bigcup_{i=1}^m w_i(A) \quad (5)$$

式中, W 为 Hutchinson 算子, w 为仿射变换, A 为几何整体, m 为拷贝数。

对于 Koch 曲线, 拷贝数 m 为 4, $\theta=0^\circ, 60^\circ, -60^\circ, 0^\circ$, $r=1/3$, 根据 Koch 的迭代原理, 算出位移。根据参考文献[6], Koch 曲线的迭代如下所示。

$$\begin{aligned} w_1(x, y) &= (\frac{1}{3}x + (0)y + 0, (0)x + \frac{1}{3}y + 0) \rightarrow 1/3 \\ w_2(x, y) &= (\frac{1}{6}x - \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{3}, \frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y + 0) \rightarrow \diagdown \\ w_3(x, y) &= (\frac{1}{6}x + \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y + \frac{\sqrt{3}}{6}) \rightarrow \diagup \\ w_4(x, y) &= (\frac{1}{3}x + (0)y + \frac{2}{3}, (0)x + \frac{1}{3}y + 0) \rightarrow \text{---} \\ \rightarrow W(A) = w_1(A) \cup w_2(A) \cup w_3(A) \cup w_4(A) &\rightarrow \underline{w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4} \end{aligned}$$

1.2 Hilbert 曲线分形技术

Hilbert 分形具有松散的自相似特性: 0 阶 Hilbert 是《电子技术应用》2009 年第 1 期

一个正方形轮廓的“半环”结构, 设其边长为 b , 1 阶是用 0 阶的结构来填充每条边, 从而在每条边上形成“半环”结构, 设其边长为 a , 将 a/b 称为 Hilbert 分形的比例系数, 如图 2 示。

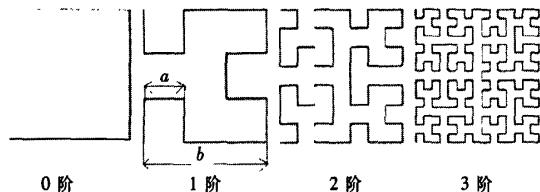


图 2 Hilbert 迭代原理

由图 2 可见, 1, 2, 3, ..., n 阶 Hilbert 分形的轮廓面积与 0 阶的完全一致, 即无论迭代多少次, Hilbert 分形的轮廓面积保持不变, 且始终只有 2 个端点。

分析可得, n 阶 Hilbert 分形的总长度可由如下的(6)式算得。例如: n 取 0, 1, 2, 3 时, 分别为: $3b, 5b, 9b, 17b$ 。

$$L(n) = \frac{4^{n+1}-1}{2^{n+1}-1} b \quad (6)$$

Vinoy 等人在参考文献 [7][8] 中详细探讨了 Hilbert 曲线在设计紧凑型谐振天线应用后发现, Hilbert 分形天线的尺寸减小到 $\lambda/10$ 时, 性能却同 $\lambda/2$ 偶极子相似。而 Zhu 在参考文献[9]中研究了馈点位置对 Hilbert 分形天线输入阻抗的影响, 结果发现, 无论迭代的次数多少, 中心馈电的辐射电阻很小, 但恰当地选择偏心馈电总能提供 50Ω 的匹配阻抗。

2 分析与研究

2.1 阶数对天线性能的影响

基于 Koch 曲线的偶极子天线的不同阶数的模型如图 3 所示。天线的高度为 120 mm, 线宽为 0.5 mm, 角度为 60°, 铜箔厚度为 0.015 mm。

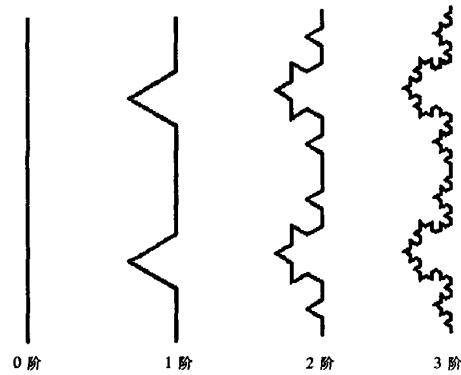
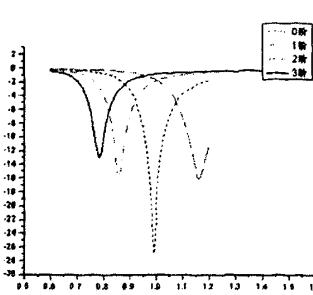


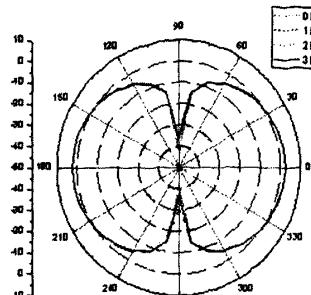
图 3 不同阶数的天线模型

利用基于 FDTD 算法的电磁仿真软件 Ansoft HFSS 10.0 进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

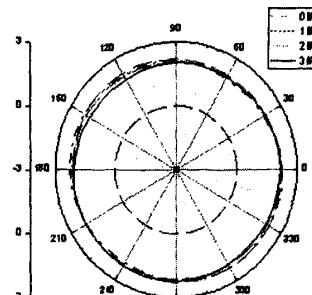
从图 4 可以看到, 对于 0 阶天线, 其谐振在 1.17 GHz,



(a) 反射系数



(b) E 面方向图



(c) H 面方向图

图 4 不同阶数天线模型仿真结果

在保持天线高度不变的条件下,随着阶数的增加,天线的物理尺寸加长,从而使谐振频点下降,辐射电阻增大;尽管在不同的阶数对应不同的谐振频率,但是方向图依然具有普通偶极子的性质。需要说明的是,这里选择天线的高度不变,而不是选择天线线宽不变,这是因为,根据参考文献[10]的推导,天线的辐射功率因子与天线的有效体积成正比。由于辐射功率因子衡量的是辐射的实际功率和电抗功率之比,所以辐射功率因子越大越好,即要求天线的有效体积越大越好。惠勒对比了轴线型对称阵子和方环的有效体积,其结论是:虽然细导线和粗圆锥的实际尺寸大不相同,但是有效体积相差甚小。这是因为天线的有效体积受长度的影响较大,受横向尺寸影响较小所致。所以,这里的对比是以天线高度不变为条件的。

2.2 角度对天线性能的影响

对于 Koch 曲线,传统的研究都是在角度为 60° 的条件下设计模型的。这里分别研究了角度为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 的基于一阶 Koch 曲线的天线性能。根据以上的分析,这里依然选择天线高度为 120 mm 保持不变,线宽 0.5 mm,铜箔厚度为 0.015 mm。依此设定构造的模型如图 5 所示,仿真分析结果如图 6 所示。

图 6 的仿真结果表明,随着角度的增加,天线的谐

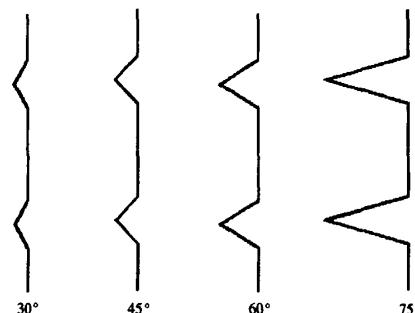
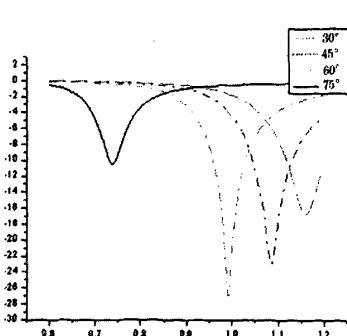


图 5 不同角度的天线模型

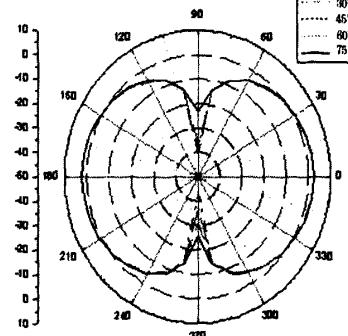
振频率下降,但方向图不会受很大影响。不同的是天线的增益。因为当保持中间 $1/3$ 长度不变时,不同的角度将分别构成底角为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 的等腰三角形,由于角度的不同导致两腰的长度之和不同,这样,随着角度的增大,天线的物理尺寸就相应地增长,从而导致谐振频率下降。需要说明的是,当角度发生变化时,Koch 曲线的拷贝数为 4,但缩放比例不为 3,因此,分形维数不再是 1.262。

3 设计与应用

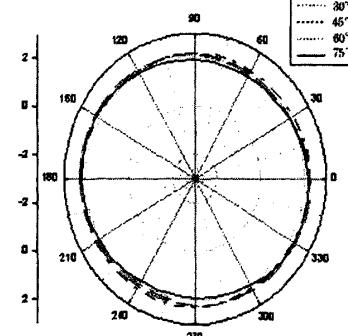
基于以上分析,这里设计一款基于 Koch 曲线和 Hilbert 曲线联合加载的具有静电防护功能的电子标签。



(a) 反射系数



(b) E 面方向图



(c) H 面方向图

图 6 不同角度天线模型仿真结果

天线的尺寸为 $55\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 铜箔厚度为 0.015 mm , 天线蚀刻在 0.05 mm 的 PET 材料上。所选用的标签芯片在 915 MHz , 对外呈现的阻抗为 $Z=18.1-\text{j}149\Omega$ 。标签模型如图 7 所示。



图 7 标签模型

尽管 Koch 曲线的高次迭代曲线可以实现预期的天线指标, 高次迭代的曲线在理论上是可行的, 但是, 在实际应用中高次迭代的曲线结构复杂, 受制作工艺水平的限制。所以, 这里的天线两臂是采用 Koch 曲线加载, 而短路环采用 Hilbert 曲线加载。这样设计的优点不仅达到了天线尺寸的缩减, 而且 Hilbert 曲线构成的环状结构, 不仅通过感性加载抵消芯片的容性, 而且在直流状态下, 对标签芯片构成短路, 通过环状铜箔本身的电阻对静电放电, 实现对标签芯片的静电保护。在仿真调试中发现, Hilbert 环的高度对天线性能的影响比较大, 而加载的位置对天线的性能影响比较小, 从而可以通过改变 Hilbert 环的高度来对标签天线进行调谐。

从图 8 可以看到, 在频率为 900 MHz , 天线的 $VSWR=1.13$, 增益为 1.87 dB , 从图 8(e)可以看到, 相对于普通偶极子, 该天线的尺寸缩减了约 60% , 但是却具有普通偶极子的低方向性。用远望谷公司的 XCRF-804 阅读器, 在功率为 $20\text{ dBm}(0.1\text{W})$ 时, 测得阅读距离为 $2.5\sim 3\text{ m}$ 。目前该标签用于鞋厂对出厂产品的不开箱检测。

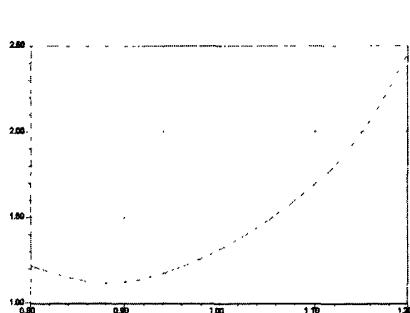
对于电子标签而言, 由于标签天线作为标签芯片与阅读器实现通信的接口。因此, 标签天线性能的好坏将决定 RFID 系统的灵敏度和阅读器读写的距离。标签天线设计的总体目标是设计结构紧凑, 外形轮廓小巧, 高增益, 低副瓣。而分形天线工程是实现这一目标的方案之一。

本文研究了决定基于 Koch 曲线的标签天线性能的

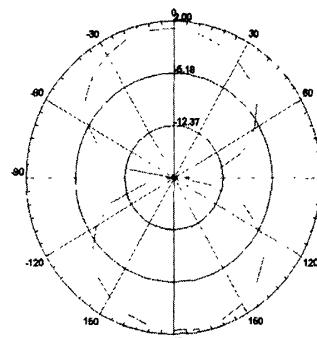
两个主要因素, 即角度和阶数。通过仿真和调试发现, 随着角度和阶数的增大, 天线的谐振频率下降。这对天线的小型化设计提供了重要的指导。此外, 基于实际应用的考虑, 设计了一款基于 Koch 和 Hilbert 曲线联合加载的标签天线, 不仅具有小的天线尺寸, 较好的增益和带宽, 而且结构简单, 便于调谐, 完全满足实际应用的需要。

参考文献

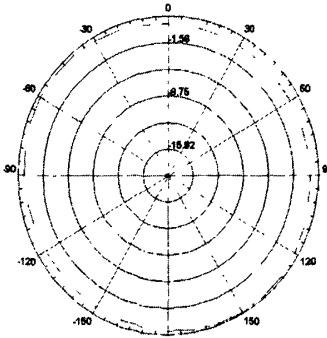
- [1] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature*[M]. San Francisco: Freeman 1983.
- [2] 钱四林, 施建超, 黄华. 分形理论在天线设计中的应用. 山东通信技术, 2007, 6(2):33~37.
- [3] WERNER D H, GANGULY S. An overview of fractal antenna engineering research. *IEEE Antennas Propagat. Mag.* 2003, 45:38~57.
- [4] VINOY K J. Fractal shaped antenna elements for wide and multi-band wireless applications. Ph.D.dissertation, Dep.Elec.Eng., Pennsylvania State University Park, 2002.
- [5] GIANVITTORIO G J. Fractal antennas: design, characterization and Applications. Ph.D.dissertation, Dep. Elec. Eng., University of California at Los Angeles, Los Angeles, 2000.
- [6] VINOY K J, JOSE K A, VARAD V K. Resonant frequency of hilbert curve fractal antenna. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, 2001, 3: 648~651.
- [7] ANGUERA J, PUENTE C, SOLER J. Miniature monopole antenna based on the fractal curve, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, 2002, 4: 546~549.
- [8] ZHU J, HOORFAR A, ENGHETA N. Feed point effects in hilbert curve antennas, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting*.
- [9] 阮成礼. 超宽带天线理论与技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,



(a) VSWR



(b) E 面方向图



(c) H 面方向图

图 8 电子标签仿真结果

(收稿日期: 2008-07-07)

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>