

文章编号 1005-0388(2008)04-0616-04

# 一种有限空间内中短波宽带接收天线设计

王科平<sup>1</sup>☆ 王志功<sup>1</sup> 冯军<sup>1</sup> 赵海涛<sup>2</sup>

(1. 东南大学射频与光电集成电路研究所, 江苏南京 210096;

2. 东南大学生物电子学国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要** 一种适用于全球数字广播 DRM 系统移动终端的中短波宽带接收天线, 能够集成于接收机机壳表面, 在机壳表面的三维方向上分别设计有 Hilbert 分形天线、弯折线天线、多环环形天线, 将三种天线在馈电端相连, 向射频前端电路馈电。Hilbert 分形由于其自相似性和空间填充性, 应用于天线设计能够实现多频带、低谐振频率等特性。通过计算和大量实验, 研究了这种天线的尺寸缩减特性和灵敏度特性。测试结果表明: 与专业公司提供的两款 DRM 接收机天线相比较, 该中短波宽带接收天线在 1~20 MHz 频率范围内, 以缩小的尺寸获得了高的接收灵敏度。

**关键词** 全球数字广播; 中短波; 宽带天线; 接收天线

**中图分类号** TN82

**文献标志码** A

## Design of a space-limited receiving antenna in MW and SW bands

WANG Ke-ping<sup>1</sup> WANG Zhi-gong<sup>1</sup> FENG Jun<sup>1</sup> ZHAO Hai-tao<sup>2</sup>

(1. Institute of RF & OE-ICs of Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. State Key Laboratory of Biological Electronics, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract** A broadband receiving antenna working in middle- and short-wave band is proposed for DRM (Digital Radio Mondiale) system. Hilbert fractal antenna, meander line antenna, multi-loop antenna are proposed to fabricate on the surface of three dimensions of the receiver box and to connect together at the feeding point. Because of self-similarity and space-filling properties, Hilbert fractal antenna is a powerful tool to design multi-frequency and low resonant frequency antenna. Experimental results show that compared with two kinds of receiving antenna for DRM system provided by a professional company, this receiving antenna has a high enough receiving sensitivity but a reduced size.

**Key words** DRM; MW and SW; broadband antenna; receive antenna

## 1 引言

全球数字广播(DRM, Digital Radio Mondiale)是目前世界范围内唯一公开的、覆盖 30MHz 以下长波(148.5~283.5 kHz)、中波(525~1710 kHz)和短波(2.3~27 MHz)的数字广播系统。其天线设计往往成为了制约 DRM 接收机小型化和袖珍化的

主要因素。研究基于此类标准的袖珍信息终端的小型化天线设计与实现具有重要的意义。传统的中短波接收机接收天线往往采用鞭状天线和磁棒天线。鞭状天线通常体积较大, 不易与接收机的机体实现集成。磁棒有很强的方向性, 不利于全方向接收, 并且本身要占用一定的体积, 不利于接收机的小型化, 同时由于磁棒属于脆性材料, 容易破碎。另外要实

现有限空间内天线的尺寸缩减通常导致灵敏度的降低。解决这一矛盾的方法是采用加载技术、弯折技术、分形技术<sup>[1~6]</sup>。加载需要在天线中适当位置加入某种网络或者元件,考虑到中短波相对较低的频段,不适合用分布式加载,而集总元件加载不利于与机壳集成,同时加载必定伴随有损耗,降低了天线效率。分形天线由于其自相似性和空间填充性在尺寸缩减方面有着明显的优势<sup>[7]</sup>,弯折线天线也有同样的优势<sup>[8]</sup>。

在此针对中短波 DRM 通信系统提出了一种能够集成于接收机机壳表面的袖珍隐形天线,该天线基于分形技术和弯折技术,在机壳表面的三维方向上分别设计有 Hilbert 分形天线、弯折线天线、多环环形天线,三维方向上的三种天线在馈电端相连,对射频前端电路馈电。最后通过实验验证了其尺寸缩减特性和高接收灵敏度特性。

## 2 天线结构、工作原理和设计

首先考虑 Hilbert 分形天线生成方法,图 1 为 Hilbert 分形天线生成示意图。图 1(a)为初始元,图 1(b)和图 1(c)为生成元。其中第 K+1 阶生成元和第 K 阶生成元之间的关系可以由以下公式表示:

$$\mathbf{F}_{K+1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\mathbf{F}_K & \frac{1}{2}\mathbf{F}_K \\ +\frac{1}{2}\mathbf{F}_K & -\frac{1}{2}\mathbf{F}_K \end{bmatrix} \quad (1)$$

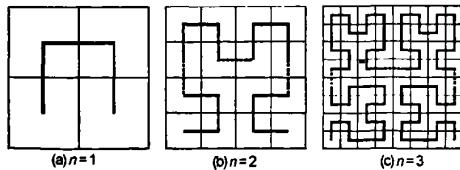


图 1 Hilbert 分形天线生成示意图

可以通过复制、缩小、旋转、连接的方法来从第 K 阶生成元生成第 K+1 阶生成元。因此,对于在 L×L 大小的介质基片上实现 n 阶 Hilbert 分形天线而言,其总长度 S 可以表示为<sup>[7]</sup>:

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

弯折线天线和多环环形天线的生成方法较为简单,图 2 为弯折线天线生成示意图,图 3 为多环环形天线生成示意图。对于在 L×H(L≥H) 大小的介质基片上实现 n 阶弯折线天线而言,其总长度 S 可

以表示为:

$$S(n) = L + 2n \times H \quad (3)$$

对于在 L×H(L≥H) 大小的介质基片上实现环与环之间间距为 d(d≤L, d≤H) 的 n 阶多环环形天线而言,其总长度 S 可以表示为:

$$S(n) = 2n(L+H) - 4n(n-1)d \quad (4)$$

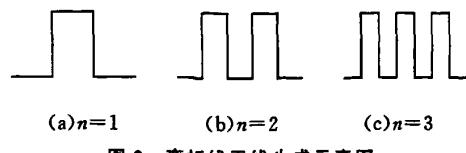


图 2 弯折线天线生成示意图

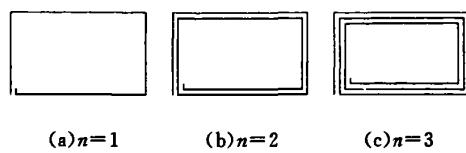


图 3 多环环形天线生成示意图

天线的电长度 L/λ 决定了天线的增益、输入阻抗、方向图等特性,因此在 DRM 系统终端上设计的天线必然属于电小天线范围,电小天线由于其尺寸限制往往辐射效率较低,因此多用于接收天线设计。分形天线由于其自相似性和空间填充性,能够解决电小天线存在的问题,增加辐射电阻,提高天线效率,同时又能够满足电小天线条件,可以等效于基本磁振子,磁偶极子作用,实现全方向性接收。Hilbert 分形是分形天线中一种较好的分形方案<sup>[7]</sup>,其尺寸压缩因子明显优于 Koch、Minkowski、Sierpinski 等分形方法,它可以实现几乎填充于整个 L×L 的平面上,并且实现最长不相交。从公式(2)、(3)和(4)可以看出随着天线设计阶数的增加,在有限的空间尺寸下(L×L 或者 L×H) Hilbert 分形天线的总长度和分形阶数成指数级的关系,而弯折线天线和多环环形天线成倍数级关系,因此和普通鞭状天线甚至弯折线天线、多环环形天线相比较,其能够在更小的尺寸下实现相同的接收灵敏度。

另外,分形由于其自相似性,当分形天线按照比例因子 τ<sub>1</sub>、τ<sub>2</sub>、τ<sub>3</sub> 等变化后仍然等于自身,因此分形天线在 f/τ<sub>1</sub>、f/τ<sub>2</sub>、f/τ<sub>3</sub> 等频率点上具有相同的电尺寸,因此在这些频率点上输入阻抗特性相同,只要设计恰当使得天线在这些频点间隔范围内变化不大,即可实现多频带和宽频带特性,同时可以实现在多频带或者宽频带内“自加载”特性,不需要额外调谐线圈实现宽带阻抗匹配。Hilbert 分形天线谐振

阻抗(也即工作波长)和天线尺寸的关系满足公式(5)<sup>[9]</sup>:

$$\frac{k\lambda}{4} \left( \log \frac{2k\lambda}{b} - 1 \right) = S(n) \left( \log \frac{S(n)}{b} - 1 \right) + \\ 4^{n-1} \frac{\eta}{\mu_0 \omega} \log \left( \frac{2L}{b(2^{n-1}-1)} \right) \\ \tan \beta = \frac{L}{(2^{n-1}-1)} \quad (5)$$

式中,  $b$  为天线导体线宽;  $\eta$  为自由空间波阻抗。

对于不同的尺寸的中短波 DRM 通信系统终端, 可以根据实际需要选择上述一种或者多种天线方案, 选择合适的介质基片材料、面积和天线阶数, 实现能够集成于接收机机壳表面的接收天线。所有天线样品均制作在相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.65$ , 厚度为  $h = 1$  mm, 损耗角正切  $\delta \leq 0.001$  的聚四氟乙烯介质基片上。最终加工制作的天线实物照片参见图 4。图 4(a)为 Hilbert 分形天线实物照片, 尺寸大小为 100 mm × 100 mm, 分形阶数设计有 5 阶和 6 阶两种, 导线线宽设计有 0.5 mm 和 1 mm 两种; 图 4(b)为弯折线天线实物照片, 尺寸大小为 150 mm × 50 mm, 天线阶数为 34 阶, 导线线宽为 1 mm; 图 4(c)为多环环形天线实物照片, 天线阶数为 10 阶, 线宽为 1 mm; 图 4(d)为一种可以集成于接收机机壳的三维隐形袖珍天线(以下简称三维天线)设计方案照片, 将上述三种天线置于接收机机壳的三个不同的表面, 在馈电端相连, 对射频前端电路馈电。

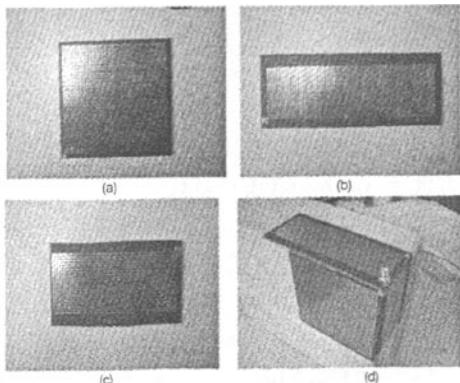


图 4 天线实物照片

### 3 测试结果与分析

对于中短波 DRM 通信系统终端接收天线而言, 由于其相对较低的工作频段和电小天线限制, 难以直接得到其输入特性和辐射特性, 因此采用在相同发射功率的条件下, 以香港 Himalaya 公司开发的 Himalaya DRM 2009 接收机用的矩形漆包线

圈天线(150 mm × 100 mm、圈数 6 圈)和鞭状天线(全长 70 cm)为基准, 利用 SP2281 数字射频电压(功率计)观测所设计的天线在 1~20 MHz 频率范围内的接收灵敏度特性。

图 5 是根据上文所设计的 7 种 DRM 系统终端接收天线和 Himalaya DRM 2009 接收机矩形漆包线圈天线感应电压特性测试结果比较。由图 5 可以看出, Hilbert 分形天线和弯折线天线在 1~20 MHz 的频带内, 感应电压幅度明显强于矩形漆包线圈天线, 同时可以看出在电小条件限制情况下, Hilbert 分形天线的接收灵敏度明显优于弯折线天线和多环环形天线, 进一步验证了 Hilbert 分形天线具有更高的空间填充性。另外, 可以看出三维天线(如图 4(d)所示)能够进一步增强接收天线的灵敏度。表 1 是 7 种 DRM 系统终端接收天线和 Himalaya DRM 2009 接收机矩形漆包线圈天线尺寸和归一化功率结果比较。可以看出, 除多环环形天线之外, 其他各种天线在实现尺寸缩减同时均能够实现更高的接收灵敏度, 并且对于如图 4(d)所示的三维天线而言能够实现 5.439 倍的接收灵敏度, 同时该天线易于集成于接收机机壳表面。

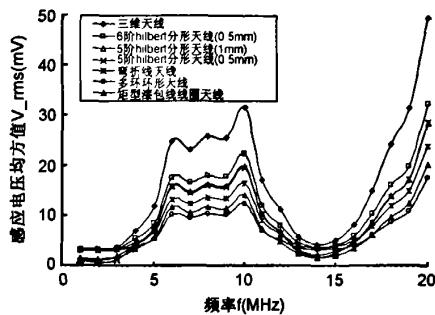


图 5 感应电压测试结果

表 1 天线尺寸和归一化功率测试结果

天线类型	天线尺寸 (mm)	归一化 功率*
矩型漆包线圈天线	150×100	1
多环环形天线	100×50	0.838
弯折线天线	150×50	1.443
5 阶 Hilbert 分形天线(0.5mm)	100×100	1.899
5 阶 Hilbert 分形天线(1mm)	100×100	1.950
6 阶 Hilbert 分形天线(0.5mm)	100×100	2.544
三维天线	150×100×50	5.439

\* 1~20 MHz 范围内接收到功率大小总和对矩型漆包线圈天线求归一化大小。

图 6 为如图 4(d)所示的三维天线和 Himalaya

DRM 2009 接收机鞭状天线感应电压特性测试结果比较。表 2 为如图 4(d)所示的将 Hilbert 分形天线、弯折线天线和多环环形天线并联连接后和 Himalaya DRM2009 接收机鞭状天线尺寸和归一化功率结果比较。可以看出,三维天线的归一化功率为 5.439,鞭状天线归一化功率为 6.688,两者大小可以比拟,然而三维天线相对于鞭状天线大大实现了尺寸缩减,更加适用于有限空间限制条件下的 DRM 接收机天线设计。

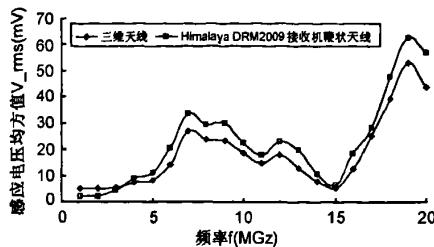


图 6 感应电压测试结果

表 2 天线尺寸和归一化功率测试结果

天线类型	天线尺寸 (mm)	归一化 功率 *
矩型漆包线线圈天线	150×100	1
三维天线	150×100×50	5.439
Himalaya DRM 2009 鞭状天线	700	6.688

\* 1~20 MHz 范围内接收到功率大小总和对矩型漆包线线圈天线求归一化大小。

## 4 结论

提出了一种适用于 DRM 通信移动终端接收机机壳的宽带接收天线,给出了天线工作原理,结构和设计参数。测试结果表明,在相同发射功率条件下,和香港 Himalaya 公司提供的两款中短波 DRM 接收机天线比较,明显缩小了天线尺寸,提高了天线的接收灵敏度。此外该接收天线易于大规模制作,成本较低,能够集成于接收机机壳表面,在三维任意一方向上都能实现高接收灵敏度。所以,这种天线具有很强的实用性和良好的应用前景。

致谢:感谢香港 Himalaya (Power) Electronic Co., Ltd 提供项目研究资助。

## 参考文献

- [1] 柳超,刘其中,梁玉军等.舰用短波宽带鞭状天线研究[J].电波科学学报,2006,21(6):955-958.  
Liu C, Liu Q Z, Liang Y J, et al.. Design of broadband shipboard whip-type antenna at high frequency band [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(6): 955-958.

- [2] 吴昌英,张璐,许家栋.加载单极子天线的时域辐射特性[J].电波科学学报,2002,17(3):295-299.  
Wu C Y, Zhang L, Xu J D. The time domain radiation characteristics of loaded monopole [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(3): 295-299.
- [3] A K Skrjervik, J F Zurich, O Staub, J R Mosig. PCS antenna design: the challenge of miniaturization [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(4):12-27.
- [4] D H Werner, S Ganguly. An overview of fractal antenna engineering research [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(1):38-57.
- [5] C P Bahlard. The Koch monopole: a small fractal antenna [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2000, 48(11):1773-1781.
- [6] C Borja. On the behavior of Koch island fractal boundary microstrip patch antenna [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2003, 51(6): 1281-1291.
- [7] J Anguera, C Puente, E Martinez, E Rozan. The fractal Hilbert monopole: a two-dimensional wire [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(2):102-104.
- [8] Best S R. A discussion on the significance of Geometry in determining the resonant behavior of fractal and other non-euclidean wire antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(3):9-28.
- [9] Vinoy K J, Jose KA, Varadan V K, et al.. Resonant frequency of Hilbert curve fractal antennas[C]. IEEE Antennas Propagation International Symposium Digest 3. 2001, 648-651.



王科平 (1981—),男,江苏人,东南大学射频与光电集成电路研究所博士生,主要研究方向为射频天线设计和射频集成电路设计等。

E-mail:wkptom@seu.edu.cn



王志功 (1954—),男,河南人,博士,东南大学教授,博士生导师,在国际和国家级重要会议和核心期刊上发表 260 余篇论文,主要研究方向为射频天线设计,射频、超高速、微波和毫米波集成电路、光电集成电路设计等。

E-mail:zgwang@seu.edu.cn

## 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](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>