

文章编号 1005-0388(2002)010-0054-05

# 分形天线的研究进展<sup>\*</sup>

刘 英 龚书喜 傅德民

( 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所 , 陕西 西安 710071 )

**摘要** 论述了分形天线的发展状况 ,介绍了分形天线的分析方法和最新的研究成果。天线的分形设计是电磁理论与几何学的融合。分形天线可以实现多频工作和尺寸减缩 ,在军用与民用方面都有着很大的发展潜力。

**关键词** 分形天线 多频天线 尺寸减缩

中图分类号 TN821 文献标识码 B

## The advances in development of fractal antennas

LIU Ying GONG Shu-xi FU De-min

( Institute of Antennas and Electromagnetic Scattering ,  
Xidian University , Xi 'an Shanxi 710071 , China )

**Abstract** The paper outlines the history of fractal antennas. The analysis methods and the current products are introduced. The fractal design of antennas is the combination of electromagnetic theory and geometry. Fractal antennas exhibit the multiband behavior and size reduction and possess great potential in military and civil fields.

**Key words** fractal antenna multiband antenna size reduction

## 1 引言

自从 20 世纪 70 年代中期法国数学家 Benoit Mandelbrot<sup>[1]</sup>第一次描述了名为分形的几何图形 ,它已吸引了众多科学工作者的兴趣。分形这一概念至今仍没有被人们普遍接受其统一的定义 ,研究许多不规则曲线会发现 ,它们具有一很重要的性质即自相似性 ( self-similarity )。通俗地说 ,就是局部的形态与整体形态的相似。事实上 ,自然界中的许多事物都具有自相似的层次结构 ,在理想情况下 ,甚至有无穷多层次 ,适当地放大或缩小几何尺寸 ,整个结构并不改变 ,把这种在形态、结构、功能和信息等方面具有自相似的研究对象统称为分形。

20 世纪 80 年代 ,关于波与分形结构相互作用的研究促进了分形电动力学<sup>[2 3 4]</sup>的发展 ,而分形天线是分形电动力学众多应用领域之一。天线与阵列

的分形设计是电磁理论与分形几何学<sup>[5]</sup>的融合 ,最为熟知的对数周期天线就是一种分形天线 ,它已经存在 40 年了 ,但直到分形技术应用后它的性能才得以充分理解。

天线的分形设计用来探索天线的尺寸减缩与多频性能 ,因此分形天线解决了传统天线两个主要局限性 ( 1 )天线实际上是窄带设备 ,它们的性能高度依赖于天线的电尺寸。这就意味着 ,对于固定的天线尺寸 ,主要天线参数 ( 增益 , 输入阻抗 , 方向图 , 副瓣电平 ) 将随着工作频率的改变而改变。分形的自相似性使的分形天线具有分形的特征 ,从而具有多频性能。( 2 )分形复杂的形状使一些天线的尺寸减缩成为可能。

本文首先回顾分形天线相关概念的发展状况 ,然后综述了分形天线的分析方法 ,最后介绍几种最新的国外研究成果。

## 2 分形天线的研究现状

对分形天线的研究主要分为分形天线单元和分形天线阵列的研究。文献[6]总结了分形应用的众多可能性,作者将分形几何用于单元与阵列的设计。文献[7]将电磁学中分形的应用作了总结。

分形天线单元是具有分形形式的天线单元,主要通过导体弯曲或在导体面上引入孔径来形成。它们基于基本的分形形状,比如Sierpinski垫片,Mandelbrot树、Koch曲线、Koch岛屿。与传统天线设计相比,它的好处在于能够减小尺寸拓宽带宽。在许多情况下,分形天线单元的使用可以简化电路设计,减少建造消耗,增强可靠性。因为它是自加载的,不需要任何匹配单元来实现多频或宽频工作。

下面简单阐述几个典型分形天线单元及分形在阵列中的应用。

Sierpinski垫片天线<sup>[8~19]</sup>是一种多频天线。文献[8~9]对其进行了比较全面的描述。在文献[10~11]中作者提出关于Sierpinski几何的一些变形及其对天线性能的影响。结果表明通过调整频带可以得到更好的性能。这类天线也可用于其他构造,在文献[17]中,作者通过将天线层叠在一起拓宽了天线的带宽。此技术用于Sierpinski毯可参考文献[18]。Sierpinski垫片的另一用途是多频频率选择表面<sup>[19]</sup>。

分形环用来减缩环状天线的尺寸。在文献[20~22]中,作者描述了分形的一些基本参数及在天线应用方面的好处,模拟了Minkowski方形环及其在业余无线电中的应用。

Koch偶极子用来减缩偶极天线的尺寸。关于此天线的描述可参考文献[23]。Koch偶极子也用于研究频率无关天线<sup>[24]</sup>。

电化学分解可生成树的形状<sup>[25]</sup>,这一类分形是随机生成的,可形成各种尺度的分支,对其研究的目的是通过改变几何结构的尺度来观察其多频性能。文献[26]研究了一确定性分形树。作者研究了分形维数与输入匹配之间的关系。数状分形很容易改变,因而很容易控制分形维数。文献[15]作者研究了确定性树状分形的多频性能,确定了谐振频带数目与几何的分形迭代数目之间的关系。在文献[27]中,作者研究了二维二阶树状单极子天线,天线表现出与其几何结构的自相似相对应的谐振特性。在频带之间输入阻抗很小,作者建议此结构可用于多频滤波器或吸收器。

分形几何可用于阵列的设计,主要有两种方式,分形单元可用于均匀分布阵列中,也可以将阵列间距用分形形式来布局。文献[28~30]中,阵列的间距用分形几何分布,而阵列单元仍用标准Euclidean形状。文献[31]详细讨论了这一内容。文献[32~33]讨论了用Cantor集分布的阵列。文献[34~35]也用Cantor集对阵列的方向图的相似性与几何间距的相似性进行了比较,模拟了不同分形维数的Cantor集,结果显示最大副瓣电平与分形维数的关系。由众多文章可以看出分形阵列与过去传统的阵列设计相比有以下优点:1)多频、宽频特性;2)用迭代算法可快速计算方向图;3)可系统地稀疏阵列;4)可有效设计大的平面阵列;5)可实现低副瓣设计策略。

尽管现在的研究工作大多以900MHz、S波段的应用为主,分形天线设计技术可以用于任何频率和任意类型的天线,比如偶极子、单极子、螺旋天线。用分形设计产品代替移动电话中的传统天线可以得到更好的性能,生产起来比较便宜,频带比较宽可以用于将来移动电话中的GPS接收机中。近年来,国外学者对分形天线作了大量的工作,相比较之下,国内的研究不是很多。

## 3 理论分析方法

分形天线的分析方法有多种,应用最广泛的为矩量法。另外,由于计算机性能的提高,FDTD在天线计算方面也得到了较多的应用。对于一些结构比较简单分形天线可以使用比较成熟的商业软件包,如Ansoft和NEC<sup>[36]</sup>等电磁场问题计算软件。

洛杉矶加州大学(UCLA)的以Samii为首的研究人员对分形天线单元作了比较深入的研究,他们提出一种用于复杂结构的基于电流的迭代混合方法<sup>[37]</sup>。该方法利用混合电场积分方程(EFIE)和磁场积分方程(MFIE)公式,即HEM(hybrid EFIE-MFIE)。HEM可以用于任何形状三维金属结构的建模,包括线形、开和闭合表面。使用物理光学(PO)近似的基于电流的混合方法是HEM公式的一个近似。其数值解过程包括矩量法(EFIE)与迭代Neumann级数方法(MFIE)。这就可以充分利用PO近似,并提供了通用的系统的方法来纠正由PO近似导致的误差。该方法可用于以线面作为基本单元的物体的辐射问题。现在加州大学已经基于此方法研制出程序,并已成功地用于分形天线的计算。

分形形状的电磁分析通常需要大量内存和计算

时间,在设计过程中,当需要对整体趋势进行快速估计时,就需要一简单模型。最近 C. Puente 用一计算分形天线的迭代模型分析 Sierpinski 垫片天线<sup>[38~39]</sup>。该模型是一简单、快速的数值模型,可用于预测具有 Sierpinski 垫片分形形状的天线的输入参数。该模型基于产生分形结构的迭代原理,是一反馈系统,系统的输出作为下一步新系统的输入。为了预测分形网络的输入参数,该模型仅需要知道初始结构的散射矩阵和联系分形结构某一过程的 [S] 矩阵与下一步的 [S'] 矩阵的组成关系。由模型可以看出 Sierpinski 分形天线的多频性能是其分形结构的结果。该模型很好地预测了天线的性能。

## 4 分形天线的最新发展

### 4.1 用于宽频通讯的微带分形天线<sup>[40]</sup>

传统的微带贴片要实现其双频和多频工作需要采用多个辐射单元或使用电抗性负载贴片天线。2000 年,分形的概念首次用于方形微带贴片天线的结构中,获得了多频工作性能。天线以 Sierpinski 裱的形式来构造,选用的标度因子为 1/3,以保持分形结构的完全的几何对称性。迭代次数  $n = 3$ ,使天线工作于三个不同的频段  $f_1, 3f_1, 9f_1$ ( $f_1$  为激励单元即  $n = 1$  的谐振频率)。天线采用同轴馈电,用于多频工作时,能量从激励单元耦合到寄生单元。测试结果表明,在每个频段,回波损耗优于  $-10\text{dB}$ ,增益大于  $7\text{dB}$ 。在三个频段天线都表现出了很好的阻抗匹配性能。此方法同样可用于任意数目频段的分析和三角形微带贴片领域。这一类型的天线将用于无线通讯、卫星通讯和移动通讯等领域。

### 4.2 强方向性的分形边界微带贴片天线<sup>[41]</sup>

现已提出一种新型的具有分形边界的贴片天线。贴片形状为 3 阶 Koch 雪花,贴片刻蚀在介质上,介质与接地板之间为空气间隙,贴片为同轴馈电。天线表现出多谐振模式,通过观察电流可以看出电流密度实际只在贴片边界的四个区域,其电流分布与单个 Koch2 贴片在基模上电流分布相似。因此 Koch3 微带贴片的性能可以看作工作于基模的 Koch2 微带贴片天线的  $2 \times 2$  阵列。对其测量结果可参看文献。可以看出具有分形边界的贴片天线表现出局部模式,其性能为阵列的性能。当局部模式同时,与基模工作的天线相比,它可得到宽带方向图和较强的方向性。

### 4.3 ComCyl 天线

近二十年来,无线设计一直依靠短而粗的天线,

现在已经有一种新型天线,效率更高,而且可以用于多频工作。这类天线叫共形通讯柱( conformal communications cylinders ),即 ComCyl 天线。它们是刻蚀在薄电路板上的复杂的分形天线,然后将板子卷曲在中空的套筒中,如图 1 所示为这类小型共形电路板,低损耗介质上为分形天线环。ComCyl 天线的优势在于它不象传统天线设计那样低效,这一类天线虽然是电小尺寸,性能却很好。共形印刷电路设计的分形结构产生多频加载性能,通过选择设计方向图与迭代次数,可以实现真正的多频性能。现在已经有不同型号的天线用于双频蜂窝通讯与个人通讯中。位于 Florida 州 Massachusetts 的分形天线系统公司<sup>[42]</sup>在分形天线的研究方面卓有成效。2000 年 6 月该公司的 ComCyl 天线宣布完工,它可以有效地防止天线与用户直接接触。该公司已经申请此天线的专利,它可以用来代替蜂窝电话与其他手持通讯设备中的传统的短而粗的设计方式。ComCyl 天线独特的结构使天线的实际尺寸很小,且卷曲在套筒的一侧远离使用者的头部。传统的天线设计使天线在人脑的 1~4mm 附近。此天线使套筒的一侧空着,这样即使使用者将天线压在头上,由于特别的隔离,对人脑也没有直接接触,空着的一侧可以填充一些便宜的吸收树脂以进一步减小对人脑的 RF 辐射。与同类天线相比,此天线性能更好且更便宜。目前该公司正在研究用于蓝牙( 2.4GHz )无线局域网( WLAN )的超低轮廓的 ComCyl 天线。

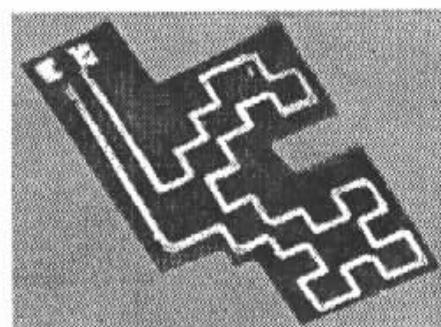


图 1 ComCyl 天线

## 5 总结

分形天线在很多领域都大有用途。随着无线通讯领域的日益发展,集成天线的需求日益增加。分形天线可有效地填充有限的空间,其空间节省能力

是比欧式几何结构优越性之所在。这类应用包括个人手持无线设备如蜂窝电话。

另一值得研究的方面为谐振环状天线的较小的包围面积,这可减缩天线的雷达散射截面RCS,在军用方面天线的RCS为关键参数,因此对分形天线的研究更有意义。

在相控阵中的应用是分形天线应用的另一方面。在设计过程中,使用分形可对环状单元和偶极单元的尺寸进行减缩,因而减小天线间的互耦,改进扫描性能。

另一个值得研究的领域是分析分形的数学原理,以联系它们作为天线的性能的改进与它们的独特的几何结构之间的关系。

## 参考文献

- [1] B. B. Mandelbrot. The fractal geometry of nature [M]. New York , W.H. Freeman , 1983.
- [2] Jaggard ,D. L. . OnFractalElectrodynamics[ A ]. Recent Advances in Electromagnetic Theory . pringer. Verlag ,NewYork , 1990 ,183224.
- [3] Jaggard , D. L. . Fractal Electrodynamics and Modeling[ A ]. Directions in Electromagnetic Wave Modeling , Plenum Publishing Co. , New York ,1991 A35446.
- [4] Jaggard , D. L. . Fractal electrodynamics : wave interaction with discretely self-similar strcrures[ A ]. Electromagnetic Symmetry , C. Baum , H. Kritikos , Taylor and Francis publishers , Washington , D.C. ,1995 231281.
- [5] H. N. Kritikos , D. L. Jaggard , Recent advances in electromagnetic theory [ M ]. Springer-Verlag ,1990 , Chapter6 ,183 ~ 224.
- [6] X. Yang ,etc. Fractal antenna elements and arrays[ J ]. Applied Microwave and Wireless , 1999 ,11( 5 ).
- [7] Jacques Levy Vehel ,et al . . Fractals and Waves[ A ]. Fractals in Engineering , Springer ,1997.
- [8] C. Puente ,etc. Fractal Multiband Antenna Based on the Sierpinski Gaske[ J ]. IEE Electronics Letters , 1996 , 32( 1 ):1-2.
- [9] C. Puente-Baliarda ,et al . . On the behavior of the Sierpinski fractal antenna[ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 1998 A6( 4 ) 517524.
- [10] C. Puente ,et al . . Perturbation of the Sierpinski antenna to allocate operating bands[ J ]. ElectronicLetters , 1996 , 32 ( 24 ) 21862188.
- [11] C. Puente ,et al . . Variations on the fractal Sierpinski antenna flare angl[ J ]. IEEE Antenna and Propagation Society , 1998 , 4.
- [12] R. Breden ,et al . . Printed fractal antennas[ A ]. IEE National Conference on Antennas and Propagation , April 1999 :14.
- [13] J. M. Gonzalez ,et al . Active zone self-similarity of fractal-sierpinski antenna verified using infra-red thermograms[ J ]. ElectronicsLetters ,August1999 ,35( 17 ):13931394.
- [14] C. Borja ,et al . . Iterative network model to predict the behavior of a sierpinski fractal network[ J ]. Electronics Letters , July 1998 ,34( 15 ): 14431445.
- [15] Liang Xu. Multiband characteristics of two fractal antennas [ J ]. Microwave and Optical Technology Letters , November 1999 ,23( 4 ) 242245.
- [16] Jesus Fornieles Callejon. On the application of parametric models to the transient analysis of resonant and multiband antenna[ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation ,1998 A6( 3 ) 312317.
- [17] G. J. Walker ,et al . . Fractal volume antennas[ J ]. ElectronicsLetters ,August ,1998 ,34( 16 ):15361537.
- [18] C. T. P. Song ,et al . . Fractal stacked monopole with very wide bandwidth[ J ]. Electronics Letters , June 1999 ,35 ( 12 ) 945946.
- [19] J. Romeu ,et al . . Dual band fss with fractal elements[ J ]. ElectronicsLetters ,April ,1995 ,35( 9 ) 702703.
- [20] N. Cohen. Fractal Antennas Part 1 : Introduction and the fractal quad[ J ]. Communications Quarterly , Summer 1995 : 722.
- [21] N. Cohen. Fractal Antennas Part 2 : A discussion of relevant, but disparate qualities[ J ]. Communications Quarterly , Summer 1996 5366.
- [22] N. Cohen. Fractal antenna application in wireless-telecommunications[ A ]. Professional ProgramProceedings ,Electronic Industries Forum of New England ,May 1997 :4349.
- [23] C. Puente ,et al . . Small but long koch fractal monopole[ J ]. Electronics Letters , January 1998 ,34( 1 ) 910.
- [24] R. G. Hohlfeld ,et al . . Self-similarity and geometric requirements for frequency independence in antenna [ J ]. Fractals , March 1999 ,7( 1 ) 7984.
- [25] C. Puente ,et al . . Multiband properties of a fractal tree antenna generated by electrochemical deposition [ J ]. ElectronicsLetters ,December1996 ,32( 25 ) 22982299.
- [26] M. Sindou ,et al . . Multiband and wideband properties of printed fractal branched antennas[ J ]. Electronic Letters , February 1999 ,35( 3 ) 181182.
- [27] D. H. Werner ,et al . . Radiation characteristics of thin-wire ternary fractal trees[ J ]. ElectronicsLetters ,April 1999 ,35 ( 8 ) 609610.
- [28] C. Puente-Baliarda ,et al . . Fractal design of multiband and low side-lobe arrays[ J ]. IEEE transactions on Antennas and Propagation , May 1996 A4( 5 ) 730739.

- [ 29 ] D. H. Werner ,et al . . Fractal constructions of linear and planar arrays [ J ]. IEEE Antennas and Propagation Society , July 1997( 3 ).
- [ 30 ] Douglas H. Werner ,et al . . Fractal antenna engineering : The theory and design of fractal antenna arrays [ J ]. IEEE Antennas and Propagation Magazine , October 1999 41( 5 ) : 3759.
- [ 31 ] Dwight L. Jaggard ,et al . . Cantor ring arrays [ J ]. Microwave and Optical Technology Letters , October 1998 , 19 ( 2 ) : 121125.
- [ 32 ] Dwight L. Jaggard ,et al . . Cantor ring array [ J ]. IEEE Antennas and Propagation Society , 1998 ( 2 ) 862865.
- [ 33 ] Xu Liang ,et al . . Synthesis of fractal patterns from concentric-ring arrays [ J ]. Electronics Letters , October , 1996 , 32 ( 21 ) : 19401941.
- [ 34 ] Liang Xu ,et al . . Fractal linear arrays [ J ]. Chinese Physics Letters , 1998 , 15( 2 ) : 140142.
- [ 35 ] D. H. Werner ,et al . . The generation of sum and difference patterns using fractal subarrays [ J ]. Microwave and Optical Technology Letters July 1999 22( 1 ) 5457.
- [ 36 ] Burke. G. J. et al . . Numerical Electromagnetic code( NEC ) - method of moments [ R ]. Technical document , NOSC TD116 LawrenceLivermoreLaboratory , 1981 .
- [ 37 ] Richard E. Hodges ,et al . . An iterative current-based hybrid method for complex structures [ J ]. IEEE Trans. Antennas Propag. 1997 , 45( 2 ) 265276.
- [ 38 ] Carles Puente Baliarda ,et al . . An iterative model for fractal antenna : application to the Sierpinski gasket antenna [ J ]. IEEE Trans. Antennas Propag. 2000 , 48( 5 ) : 713719.
- [ 39 ] C. Borja ,et al . . Iterative network model to predict the behaviour of a Sierpinski fractal network [ J ]. Electronics Letters , July 23 , 1998 34( 15 ) : 14431445.
- [ 40 ] R. V. HaraPrasad ,et al . . Microstrip fractal patch antenna for multi-band communication [ J ]. Electronics Lett. 2000 36 ( 14 ) : 11791180.
- [ 41 ] C. Borja ,et al . . High directivity fractal boundary microstrip patch antenna [ J ]. Electronics Letters , 2000 36( 9 ) , 778- 779.
- [ 42 ] <http://www.fractenna.com/>

(上接第 28 页)

由此可见 噪声对这种建模方法有一定影响 ,但一步预测仍有较好效果 ,表明在有噪情况下遗传算法混沌建模方法仍然能够给出混沌映射的短期预测模型。

## 5 结论

综上所述 ,对噪声污染较少的混沌时间序列 ,遗传算法混沌建模方法能够满意地发掘出隐藏在一维时间数据序列中的系统动力学行为 ,并能得到相应的精确或近似映射 ;不仅能够获得映射的结构形式 ,同时还能得到相应参数的满意估计。对实际数据序列的预测结果表明 ,这种建模方法适用于短期预测。当噪声污染较大时 ,建模结果仍可用于一步预测 ,且效果较好。

## 参考文献

- [ 1 ] H. Abarbanel. Analysis of Observed Data [ M ]. New York : Springer-Verlag New York Inc , 1996.
- [ 2 ] Nirwan Ansari , Edwin Hou. Computational Intelligence for

Optimization [ M ]. Kluwer Academic Publishers , 1997 .

- [ 3 ] Kim , B. Y. Park , K. S. Modeling of the nonlinear sequences based on the modified Genetic Algorithm [ J ]. Nonlinear Analysis , 1999 , 36( 6 ) : 707720.

- [ 4 ] 简相超 ,郑君里 . 混沌和神经网络相结合预测短波通信频率参数 [ J ]. 清华大学学报 2001 , 41( 1 ) : 1619.

- [ 5 ] 简相超 ,郑君里 . 混沌神经网络预测算法评价准则与性能分析 [ J ]. 清华大学学报 2001 , 41( 7 ) : 43 ~ 46 .

- 简相超 ( 1974- ),男 ,河南人 ,1997 年获清华大学电子工程系学士学位 ,现在清华大学电子工程系直接攻读博士学位。研究领域为混沌理论及其在通信中的应用。

- 郑君里 ( 1937- ),男 ,天津人 ,1961 年毕业于清华大学无线工程系 ,现任清华大学电子工程系教授、博士生导师。研究领域为人工神经网络 ,混沌理论和通信网。

- 孙守宇 ( 1962- ),男 ,江苏人 ,1984 年毕业于空军电讯工程学院 ,留校任教 ,1993 年于清华大学电子工程系获硕士学位。现在清华大学攻读博士学位。

# 分形天线的研究进展

作者: 刘英, 龚书喜, 傅德民  
作者单位: 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, 陕西, 西安, 710071  
刊名: 电波科学学报 [ISTIC EI PKU]  
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE  
年, 卷(期): 2002, 17(1)  
被引用次数: 17次

## 参考文献(42条)

1. B B Mandelbrot The Fractal Geometry of Nature 1983
2. Jaggard D L On Fractal Electrodynamics 1990
3. Jaggard D L Fractal Electrodynamics and Modeling 1991
4. Jaggard D L Fractal electrodynamics: wave interaction with discretely self-similar structures 1995
5. H N Kritikos; D. L. Jaggard Recent advances in electromagnetic theory 1990
6. X Yang Fractal antenna elements and arrays [外文期刊] 1999(05)
7. Jacques Levy Vehel Fractals and Waves 1997
8. C Puente Fractal Multiband Antenna Based on the Sierpinski Gasket [外文期刊] 1996(01)
9. C Puente-Baliarda On the behavior of the Sierpinski fractal antenna [外文期刊] 1998(04)
10. C Puente Perturbation of the Sierpinski antenna to allocate operating bands [外文期刊] 1996(24)
11. C Puente Variations on the fractal Sierpinski antenna flare angle 1998
12. R. Breden Printed fractal antennas [外文会议] 1999
13. J M Gonzalez Active zone self-similarity of fractal-sierpinski antenna verified using infra-red thermograms [外文期刊] 1999(17)
14. C Borja Iterative network model to predict the behavior of a sierpinski fractal network [外文期刊] 1998(15)
15. Liang Xu Multiband characteristics of two fractal antennas 1999(04)
16. Jesus Fornieles Callejon On the application of parametric models to the transient analysis of resonant and multiband antennas [外文期刊] 1998(03)
17. G J Walker Fractal volume antennas [外文期刊] 1998(16)
18. C T P Song Fractal stacked monopole with very wide bandwidth [外文期刊] 1999(12)
19. J Romeu Dual band fss with fractal elements [外文期刊] 1995(09)
20. N Cohen Fractal Antennas Part 1: Introduction and the fractal quad 1995
21. N Cohen Fractal Antennas Part 2: A discussion of relevant, but disparate qualities 1996
22. N. Cohen Fractal antenna application in wireless telecommunications 1997
23. C Puente Small but long koch fractal monopole [外文期刊] 1998(01)
24. R G Hohlfeld Self-similarity and geometric requirements for frequency independence in antenna [外文期刊] 1999(01)
25. C Puente Multiband properties of a fractal tree antenna generated by electrochemical deposition [外文期刊] 1996(32)
26. M Sindou Multiband and wideband properties of printed fractal branched antennas [外文期刊] 1999(03)
27. D H Werner Radiation characteristics of thin-wire ternary fractal trees [外文期刊] 1999(08)

## 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>