

文章编号 1005-0388(2009)01-0174-06

# 一种小型化宽带螺旋天线的数值分析与实验<sup>\*</sup>

宋朝晖<sup>☆</sup> 李红梅 邱景辉

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出了一种始端为等角螺旋线、终端为阿基米德螺旋线的复合式小型化螺旋天线, 改善了等角螺旋天线的低频特性, 克服了阿基米德螺旋天线臂长带来的传输损耗大、效率低的缺点; 并设计了一种适合单向辐射的微带线——平行双线宽频带巴伦。计算与测试结果表明: 该天线的低频端阻抗特性优于相同尺寸的等角螺旋天线和阿基米德螺旋线天线, 具有较好的方向图特性和圆极化特性。

**关键词** 宽带天线小型化; 复合式螺旋天线; FDTD; 共形网格; 宽带巴伦

**中图分类号** TN82      **文献标志码** A

## Numerical analysis and experiment of a miniaturization ultra-wideband spiral antenna

SONG Zhao-hui<sup>☆</sup> LI Hong-mei QIU Jing-hui

(School of Electronics and Information Technology of Harbin Institute of Technology,  
Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** An miniaturized antenna structure with an equiangular spiral line at the origin and an Archimedean spiral line at the terminal are proposed in this paper. The characteristic of the equiangular spiral antenna at low frequency is improved, and the shortcomings of the Archimedean spiral antenna, such as the large transmission loss and the inefficiency due to the long arms, are overcome. A parallel-line broadband balun which is suitable for one-direction radiation is also designed by microstrip. The simulation and test results indicate that the impedance characteristics of the proposed antenna at low frequency are better than the equiangular spiral and Archimedean spiral antenna of the same size, and it has better pattern and circular polarization characteristics.

**Key words** wideband antenna miniaturization; combined spiral antenna; FDTD; conformal mesh; wideband balun

## 引言

平面等角螺旋天线与平面阿基米德螺旋天线是典型的宽频带天线, 它们在很宽的频带内具有良好的阻抗特性、方向图特性、增益特性以及圆极化特性, 在宽频带信号检测等领域得到了广泛的应用。这类天线的设计基础来源于由 Rumsey 在 50 年代

提出的非频变天线理论, 天线尺寸取决于工作频段最低频率对应的波长。因此, 在天线尺寸确定的前提下, 向频段的低端扩展是这类天线研究中的一个方向, 这同样也是宽频带天线研究中的难题。

此外, 此类天线在数学上没有严格的解析解, 天线的特性参数都是由实验得到的, 采用更精确、更系统的数值分析在天线的设计中有重要的意义。时域

\* 收稿日期: 2008-05-22.

基金项目: 哈尔滨工业大学基金(HIT2003.02)

万方数据: 宋朝晖 E-mail:songzh@hit.edu.cn

有限差分法(FDTD)是一种典型的时域方法,在宽频带特性分析方面具有很大优势。由于平面螺旋天线具有曲线边界,需要采用阶梯近似来模拟曲线边界。文献[1]采用阶梯近似的平面模型对阿基米德螺旋天线进行了仿真分析,文献[2][3]采用阶梯近似的三维模型对圆锥等角螺旋天线进行了仿真分析,立体网格相接的水平或垂直面构成了真正的天线臂,文中采用了较细的网格,但仍然存在阶梯近似带来的数值误差<sup>[4]</sup>。如果要提高模型的精度,则要更细致的网格,这样必然导致网格数剧增,计算量庞大。

提出了一种始端为平面等角螺旋线、终端为阿基米德螺旋线的复合式平面螺旋天线,采用共形网格技术的FDTD对天线进行建模与计算,计算了天线的阻抗、增益和轴比等特性,设计了一种微带线——平行双线宽频带巴伦,并对所制作天线的阻抗、增益、方向图特性进行了测量。

## 1 复合式螺旋天线的提出

根据Dyson等对平面螺旋天线的研究结论,自互补结构的双臂平面等角螺旋天线,螺旋线臂长约等于一个工作波长,天线的最大直径约为下限频率所对应波长的1/2。而自互补结构的双臂阿基米德平面螺旋天线的外径D取决于下限频率对应的波长 $\lambda_{\max}$ ,一般应使其周长 $C=\pi D \geq 1.25\lambda_{\max}$ ,即 $D \geq 0.4\lambda_{\max}$ 。

为了满足选定的0.8~4 GHz工作频段,对于平面等角螺旋天线,直径至少需要 $0.5\lambda_{\max}$ ,即187 mm;对于平面阿基米德螺旋天线,直径至少需要 $0.4\lambda_{\max}$ ,即149 mm。

在天线尺寸一定的前提下,如果单纯采取等角螺旋天线形式,则低频端的阻抗特性和辐射特性都不好,增益和极化特性不能达到指标要求。虽然阿基米德螺旋天线的低频性能优于等角螺旋天线,但由于其天线臂增长率慢且天线臂较细,环绕长度长,介质基板与天线臂本身都有一定的损耗,这就带来了传输损耗大、效率低的缺点,而且还不具有“截断效应”。

结合这两种天线的辐射特点,提出了一种复合结构:在天线的外缘部分以延伸的阿基米德螺旋线代替原来的平面等角螺线部分。因为阿基米德螺旋线圈数相比于等角螺旋天线将有所增加,增长了天线低频时的电长度,使得天线的低频辐射效率得到了明显的增强,扩宽了传统等角螺旋天线的低频极

限。并且,通过改变传统阿基米德螺旋天线的终端直接截断方式,在其终端采用了渐削式结构,有效降低了终端反射,提高了辐射效率和增益。设计结构优化后的天线实物见图1,天线的直径为137mm,与相应频带宽度的阿基米德螺旋天线和等角螺旋天线的相比,口面面积分别减少15.4%和46%。



图1 复合式螺旋天线实物图

## 2 共形网格 FDTD 的建模与仿真

### 2.1 共形网格技术

本文采用S. Dey提出的一种D-FDTD算法<sup>[5]</sup>,它将环路路径选取同弯曲边界等结构共形相配,从而在不增大计算量的情况下实现对特殊边界的良好模拟。这种方法里,电场的迭代公式保持不变,由于没有“临近近似”<sup>[6,7]</sup>,只要时间步长选择合理,就能保证迭代的稳定性。

如图2所示网格模型,假设实线部分代表理想导体。落在模型内部及边界上的电场置为0,磁场位于原始网格中心。在变形网格中利用法拉第定律,磁场用落在理想导体外部变形网格的面积进行加权,电场用变形网格的边长进行加权,得到磁场的FDTD迭代公式为

$$\begin{aligned} H_x^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) = & H_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) + \\ & \frac{\Delta t}{\mu_0 \text{Area}(i, j, k)} \times \left[ E_x(i+\frac{1}{2}, j+1, k) * \right. \\ & l_x(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - \\ & E_x(i+\frac{1}{2}, j, k) * l_x(i+\frac{1}{2}, j, k) - \\ & E_y(i+1, j+\frac{1}{2}, k) * l_y(i+1, j+\frac{1}{2}, k) + \\ & \left. E_y(i, j+\frac{1}{2}, k) * l_y(i, j+\frac{1}{2}, k) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\text{Area}(i, j, k)$  为网格面积;  $l_x$  和  $l_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上网格边长。利用迭代出的磁场计算电场,电场迭代公式仍用传统FDTD迭代公式<sup>[8]</sup>。

对复合式螺旋天线的建模采用了共形FDTD

网格技术,如图 3 所示。D-FDTD 算法不存在“临近近似”带来的不稳定性,它的稳定性受网格本身以及时间步选取的影响。一般说来,时间步取 Courant 条件的 50%~70% 就可以保证算法的稳定性。

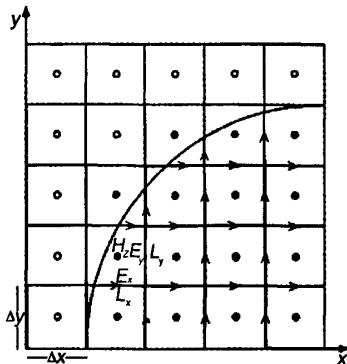


图 2 曲线边界的 D-FDTD 网格

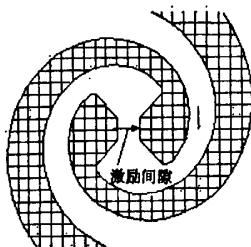


图 3 复合式螺旋天线 D-FDTD 模型

## 2.2 激励源模型

馈电处采用  $\delta$ -激励模型直接计算输入电压与输入电流而不考虑实际的馈电结构,简化了天线模型。脉冲激励电压采用以下形式

$$v_{in}(t) = -V_0 \left( \frac{t}{\tau_p} \right)^{0.5-0.5(t/\tau_p)^2} \quad (2)$$

式中,  $\tau_p = \tau_t \times 1.7 \times 10^{-3}$ ,  $\tau_t$  为光速传播天线臂长度所用的时间。采用在馈电间隙加载电阻的阻性激励源(Resistive Voltage Source, RVS)方式来减小信号的持续时间<sup>[9]</sup>,减少仿真时间步,如图 4 所示。

## 2.3 远场特性计算方法

外边界采用理想匹配层(PML)吸收边界条件,FDTD 的计算结果均为时间信号,通过时域远场外推技术计算得到最大辐射方向电场分量,时间信号经过离散傅立叶变换即可得到连续的宽带频域信号。最大辐射方向增益可计算如下

$$\text{gain} = \frac{|E(\omega)|^2 / \eta_0}{P_{in}/4\pi} = \frac{(|E_x(\omega)|^2 + |E_y(\omega)|^2) / \eta_0}{P_{in}/4\pi} \quad (3)$$

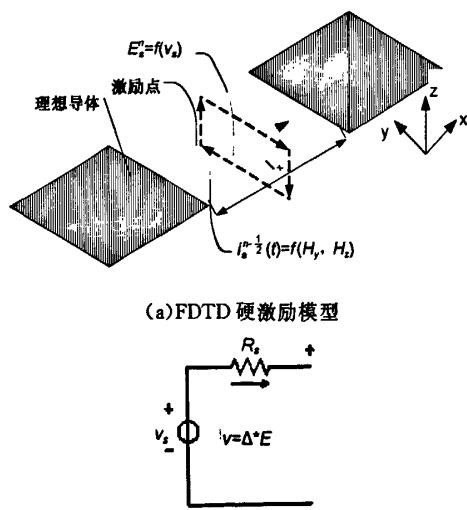


图 4 FDTD 间隙激励模型

式中,  $E_x(\omega)$ 、 $E_y(\omega)$  分别为最大辐射方向电场  $x$  方向分量和  $y$  方向分量;  $P_{in} = \text{Re}[V(\omega)I^*(\omega)]$  为天线输入功率。

最大辐射方向轴比特性按下式计算

$$AR = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2 \tau + E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \sin^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \tau - E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \cos^2 \tau}} \quad (4)$$

式中,  $E_1$  与  $E_2$  分别为  $E_x$  与  $E_y$  分量的模值,  $\delta$  为其相位差,

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2E_1 E_2 \cos \delta}{E_1^2 - E_2^2}, \rho_L < 1$$

$$\tau = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2E_1 E_2 \cos \delta}{E_1^2 - E_2^2}, \rho_L \geq 1;$$

$$\rho_L = E_2/E_1$$

## 2.4 仿真结果

在 0.8~4.0 GHz 频段内,天线输入阻抗的实部在 180Ω 左右,虚部在 j5Ω 左右,在整个工作频段内变化不大,如图 5 所示;与直径为 187 mm 的平面等角螺旋天线的轴比仿真结果相比基本一致,工作频段内轴比均小于 2,如图 6 所示。可见,复合结构螺旋天线的轴比在工作频带的低端和高端要优于等角螺旋天线。

图 7 是复合结构螺旋天线方向图的仿真结果,增益均在 3 dB 以上,频率为 4.0 GHz 时  $xz$  平面与  $yz$  平面的一致性不好;随着频率的升高,增益提高,主波瓣变窄。

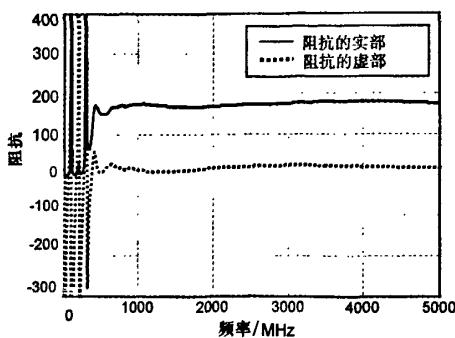


图5 天线输入阻抗特性的仿真结果

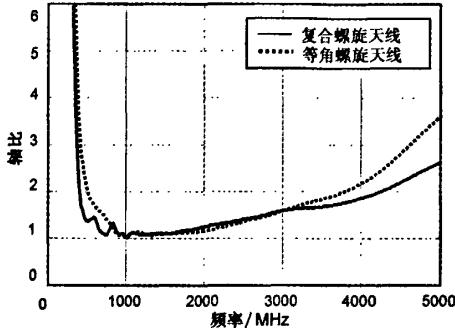


图6 复合式螺旋天线与等角螺旋天线轴比特性仿真结果

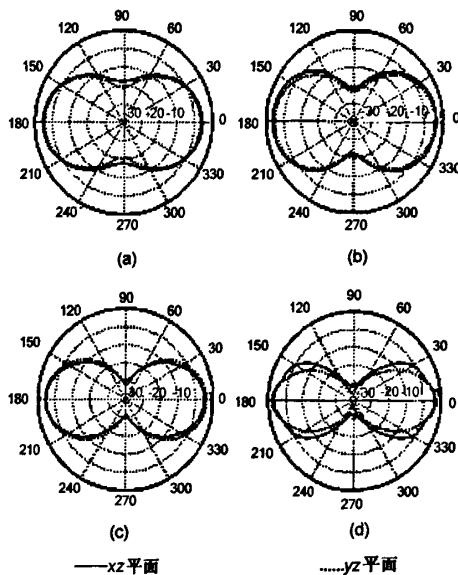


图7 复合结构螺旋天线方向图仿真结果

### 3 宽频带巴伦及反射腔设计

由于天线是双臂螺旋形式,若采用同轴馈电必须接有平衡-不平衡转换器(巴伦),而天线是宽频

带的,因此巴伦也应为宽频带。本文设计了一种平面型渐变的微带线——平行双线巴伦,如图8所示。巴伦由不平衡的微带结构逐渐过渡到平衡馈电的平行双线结构,其中地板和微带线上带条均采用渐变的方式,在工作频带内由输入端的 $50\Omega$ 渐变为输出端的 $180\Omega$ 。

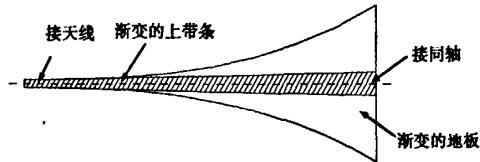
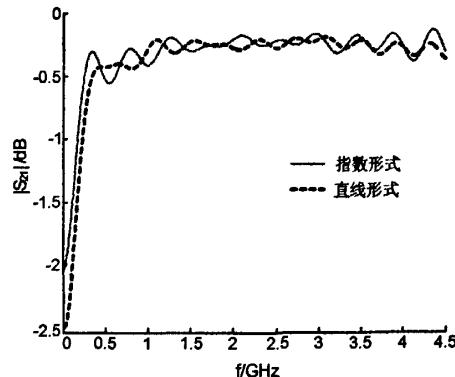


图8 指数渐变的微带线一双线结构示意图

采用CST Microwave Studio软件对这种巴伦结构进行仿真,巴伦接同轴电缆一端的输入阻抗为 $50\Omega$ ,接天线一端的输出阻抗为 $180\Omega$ 。分别采用直线式和指数式两种渐变方式,两者长度均相同 $L=\lambda_{max}=375\text{ mm}$ ,输入和输出端阻抗也相同,其传输特性用 $|S_{21}|$ 来表征,仿真结果如图9所示。从图中可见,指数渐变形式的巴伦比直线渐变巴伦的性能在低频端更好一些,因此采用了指数渐变的形式。

图9 指数和直线渐变形式巴伦的 $|S_{21}|$ 仿真结果对比

上述平面型巴伦虽然能满足宽频带的要求,但由于其长度是最低频率对应的波长,在尺寸上无法满足实用要求。本文采用了一种变形结构,考虑到平面等角螺旋天线的馈电点在中心,使巴伦在天线的直径内弯曲,终端向上翘起并让翘起部分位于圆心处,图10为示意图。

平面螺旋天线具有双向辐射特点,但在很多应用中,往往要求天线单向辐射。而实现平面螺旋天线单向辐射有多种方法,本文采用加装反射吸收腔的方式,其安装结构示意图如图11所示。

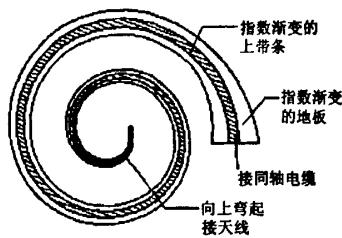


图 10 双面微带线巴伦的示意图

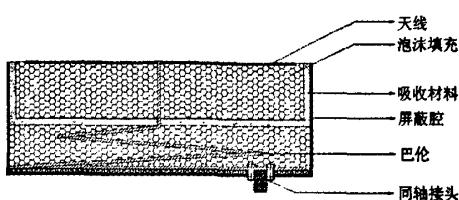


图 11 巴伦、天线安装结构剖面示意图

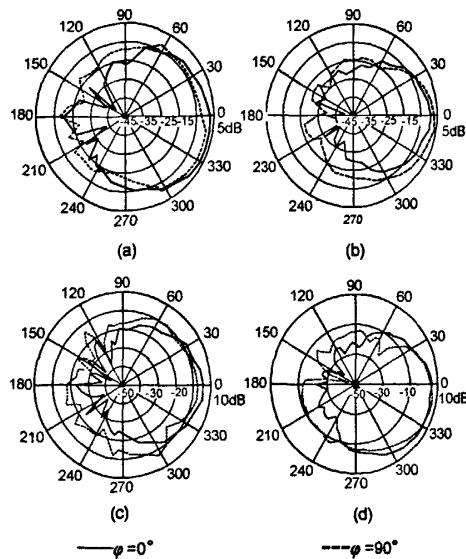


图 13 天线方向图测试结果

## 4 测量结果

天线设计为带有吸收腔的单向辐射形式,采用上节所设计的巴伦馈电,装配后的天线直径为 137 mm,高为 50 mm,输入端为  $50\Omega$  的 SMA 同轴接头。采用网络分析仪 Anritsu 37247D 测量反射损耗特性,如图 12 所示,在 0.8~4 GHz 频段内,反射损耗均低于  $-10$  dB。图 13 为电波暗室内所测方向图。

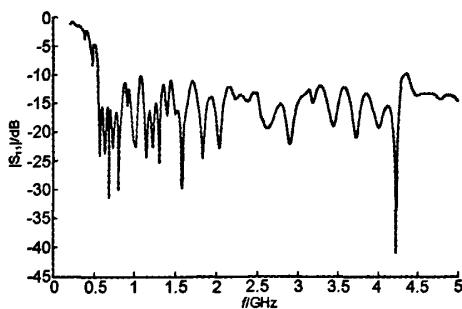


图 12 复合结构螺旋天线的反射损耗测试结果图

从图 13 中可以看出,在 0.8~4.0 GHz 频段内,增益均大于 3 dB,由于采用了吸收腔,单向辐射特性很明显,前后比在 15 dB 以上,波瓣与仿真结果相比变宽。轴比特性在低频端较差,0.8 GHz 时为 5 dB,高频端较好。总的来说,与仿真结果吻合较好,验证了 D-FDTD 方法的正确性。

## 5 结 论

提出了一种复合式螺旋天线,与相应频带宽度的阿基米德螺旋天线和等角螺旋天线相比,口面面积分别减少 15.4% 和 46%。采用基于共形网格技术的 FDTD 法对天线进行建模,在不减小网格尺寸的前提下保证了较高的模型精度,激励源采用一种阻性电压源条件下的间隙激励模型,可以减少计算时间,实验结果验证了这种数值方法的有效性。设计了一种微带线——平行双线巴伦,采用了一种适合单向辐射的背腔结构,满足了宽频带平衡-不平衡转换。仿真和实验结果表明,该天线具有良好的阻抗、增益、方向图等特性,为宽频带螺旋天线的小型化设计提供了一种方法。

## 参考文献

- [1] PENNCY C W, LUEBBERS R J. Input impedance, radiation pattern, and radar cross section of spiral antennas using FDTD[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1994, 42(9):1328-1329.
- [2] HURTLE T W, SMITH G S. Analysis and design of conical spiral antennas using the FDTD method[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. IEEE, 2000:1540-1543.
- [3] HERTEL T W, SMITH G S. Analysis and design of two-arm conical spiral antennas[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1):25-37.

(下转第 184 页)

- [J]. 电子学报, 1999, 27(11): 74-76.
- [10] 徐友根, 刘志文. 基于累积量的极化敏感阵列信号 DOA 和极化参数的同时估计 [J]. 电子学报, 2004, 32(12): 1963-1966.
- [11] 曾勇虎, 王雪松, 肖顺平等. 基于时频联合域极化滤波的高分辨极化雷达信号检测 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 524-526.
- [12] 王兰美, 王洪洋, 廖桂生. 提高信号到达角估计精度的新方法 [J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 91-94.  
WANG L M, WANG H Y, LIAO G S. Novel method for estimation of the angles of arrival based on vector sensors [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(1): 91-94.
- [13] PESAVVENTO M, GERSHMAN A B, and WONG K M. Direction finding in partly-calibrated sensor arrays composed of multiple subarrays [J]. IEEE Trans. on Signal Process., 2002, 50(9): 2103-2115.
- [14] STOICA P, LARSSON E G, and GERSHMAN A B. The stochastic CRB for array processing: A textbook derivation [J]. IEEE Signal Process. Lett., 2001, 8(5): 148-150.



黄家才 (1977—), 男, 江苏人, 现为南京工程学院讲师, 主要研究方向为极化阵列信号处理及应用, 非平稳信号分析与处理。



陶建武 (1959—), 男, 吉林人, 空军航空大学教授, 硕士生导师。主要从事电子测量及阵列信号 DOA 估计的研究。



温秀兰 (1966—), 女, 内蒙古人, 博士, 现为南京工程学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为计量测试技术、信号处理及仿生智能计算, 发表论文 30 余篇。

(上接第 178 页)

- [4] CANGELLARIS A C, WRIGHT D B. Analysis of the numerical error caused by the stair-stepped approximation of a conducting boundary in FDTD simulations of electromagnetic phenomena [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagat, 1991, 90(10): 1518-1525.
- [5] DEY S, MITTRA R. A locally conformal finite-difference time-domain (FDTD) algorithm for modeling three-dimensional perfectly conducting objects [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett., 1997, 7(9): 273-275.
- [6] MONORCHIO A, MITTRA R. Time-domain (FE/FDTD) technique for solving complex electromagnetic problems [J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 1998, 8(2): 93-95, doi: 10.1109/75.658652.
- [7] ANDERSON J, OKONIEWSKI M, STUCHLY S S. Practical 3-D contour/staircase treatment of metals in FDTD [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett., 1996, 6: 146-148.
- [8] 葛德彪, 同玉波. 电磁波时域有限差分法 [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2002.
- [9] MAKINEN R M, KIVIKOSKI M A. A stabilized resistive voltage source for FDTD thin-wire models [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2003, 51 (7): 1615-1622.



宋朝晖 (1970—), 男, 黑龙江人, 副教授, 博士, IEEE 会员, 中国电子学会高级会员, 天线分会委员。主要研究方向有: 天线小型化、超宽带天线及射频识别。



李红梅 (1972—), 女, 黑龙江人, 讲师, 博士。主要研究方向有: 高功率电磁脉冲产生与毁伤、宽带天线。



邱景辉 (1960—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 中国电子学会高级会员。主要研究方向有: 天线理论与技术、高功率电磁理论与技术、毫米波成像。

## 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>