

# 加载螺旋天线的优化设计

纪奕才，贺秀莲，刘其中，田步宁

(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：**采用螺旋式结构以及加载的方法可以使天线小型化和宽带化。研究了遗传算法和矩量法相结合的方法来快速优化设计宽带小型化加载法向模螺旋天线。采用基于曲线基函数和检验函数的矩量法来快速精确分析法向模螺旋天线，然后结合遗传算法对加载法向模螺旋天线上的加载集总元件的值、加载位置以及匹配网络参数进行一体化优化设计，并采用 Sherman-Morrison-Woodbury 公式来快速求解加载元件值和加载位置改变后的阻抗矩阵方程，提高了优化设计的效率。

**关键词：**法向模螺旋天线 矩量法 遗传算法

中图分类号 TN823<sup>+</sup>.31 文献标识码 A 文章编号 1001-2400(2002)06-0721-04

## Optimal design of loaded helical antennas

JI Yi-cai , HE Xiu-lian , LIU Qi-zhong , TIAN Bu-ning

(Research Inst. of Antennas and EM Scattering , Xidian Univ. , Xi'an 710071 , China )

**Abstract :** The helical structure and loading can be used to reduce the height and increase the bandwidth of antennas. This paper investigates an efficient design procedure integrating the genetic algorithm( GA ) with the method of moments ( MoM ) for the fast optimal design of broadband miniature loaded normal mode helical antennas. The moment method with curved basis and testing functions is used to analyze normal mode helical antennas. Then the genetic algorithm( GA ) is applied to the synthesis of NMHA loaded with lumped components. The loading circuit parameters , locations of the loads along the antenna , and matching network parameters are optimized simultaneously. The Sherman-Morrison-Woodbury formula is applied in the design procedure for the fast calculation of the impedance matrix equation when the loading configurations are changed , greatly raising the optimization efficiency. Finally , a broadband miniature loaded normal mode helical antenna is designed successfully.

**Key Words :** normal mode helical antenna ;method of moment ;genetic algorithm

现代保密通信中的跳扩频技术的应用以及移动通信的快速发展，对全向宽带化小型化的短波及超短波天线的需求越来越多<sup>[1]</sup>。法向模螺旋天线尺寸小，重量轻，且与单极子天线的电特性相近，在移动通信中得到广泛的应用，其缺点是辐射效率低，而且带宽比单极子天线还要窄<sup>[2]</sup>。常用的展宽天线工作带宽的方法是在天线合适的位置上插入阻抗元件<sup>[1]</sup>并在天线输入端加上宽带匹配网络<sup>[3]</sup>。近年来，一些学者借助于全局最优化算法——遗传算法<sup>[4,5]</sup>来优化设计加入集总负载和宽带匹配网络的单极天线，设计了许多超宽带天线<sup>[6~8]</sup>，为天线宽带化技术开辟了一片新的天地。如果通过加入集总负载和宽带匹配网络，经过优化设计，也能使法向螺旋天线实现宽带化，就可以满足现代移动通信对宽带化小型化天线的需求。

近年来，一些学者对法向模螺旋天线的快速计算，以及用它来实现天线宽带化小型化的可行性进行了研究。文献[9,10]采用基于曲线基函数和检验函数的矩量法来快速分析法向模螺旋天线的电特性，克服了传统的直线段划分的矩量法<sup>[11]</sup>分段数目多的缺陷，减少了计算机存储量，提高了计算速度。S. D. Rogers 采用遗传算法来优化设计宽带加载法向模螺旋天线，设计了一幅 2.55 倍带宽的天线<sup>[12]</sup>，但其优化设计的天线的高度超过了  $0.3\lambda_{max}$ ，并未达到小型化的要求。笔者采用遗传算法和曲线段划分的矩量法相结合的方法，并引入

Sherman-Morrison-Woodbury 公式<sup>[6]</sup>来快速优化设计加载法向模螺旋天线上的加载集总元件的值、加载位置以及匹配网络参数,成功地设计了一副宽带小型化加载法向模螺旋天线.

## 1 加载法向模螺旋天线的优化设计

加载法向模螺旋单极天线的几何结构如图 1 所示. 图中  $b$  是螺旋半径,  $p$  是螺距,  $h$  是天线高度,  $\psi$  是螺距角,  $a$  是螺旋线半径,  $S_0$  是一圈螺旋线的长度, 螺旋线圈数为  $N$ , 这些参数之间的关系可由图 1(b) 得出. 图 1 所示的螺旋天线是由  $N$  圈螺旋线与一小段长为  $h_w$  的直线段相连接组成, 直线段与特性阻抗为  $50\Omega$  的同轴线馈源内芯相连接, 同轴馈线外皮接地面. 天线上的小方框为加载的集总元件,  $h_i^L$  是第  $i$  个加载的位置. 螺旋天线上每一点的坐标、单位切向矢量和螺旋线的长度, 都可由关于参数  $z$  的方程给出, 这样螺旋线上的电流就可表示为与参数  $z$  有关的函数.

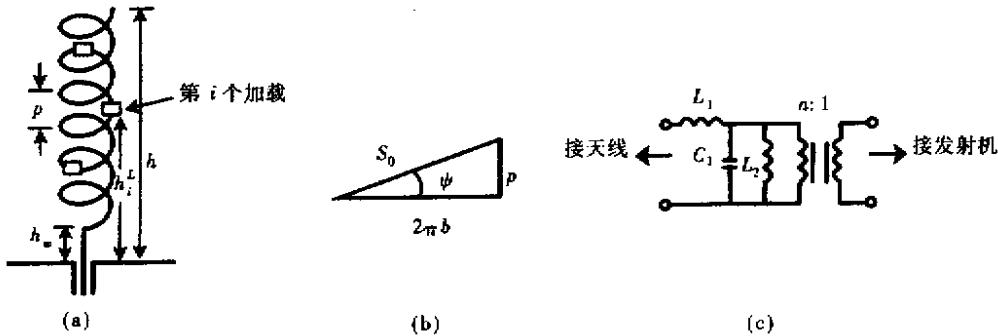


图 1 加载法向模螺旋天线及匹配网络结构示意图

螺旋天线上的电流可采用曲线段划分的矩量法<sup>[9,10]</sup>求解电场积分方程(EFIE)而求出. 当在天线适当的位置上插入集总加载元件时, 由矩量法很容易推出加载后的矩阵方程为

$$\mathbf{Z} \mathbf{I} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{Z}^L) \mathbf{I} = \mathbf{V}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{Z}$  为加载后总矩阵,  $\mathbf{Z}^0$  为未加载时法向模螺旋天线的阻抗矩阵,  $\mathbf{I}$  为加载后天线上的电流矩阵,  $\mathbf{V}$  为激励矩阵,  $\mathbf{Z}^L$  为对角阵, 其元素  $Z_{mn}^L = Z_k^L \delta_{m,n_k^L} \delta_{n,n_k^L}$ ,  $n_k^L$  为第  $k$  个加载阻抗的位置,  $Z_k^L$  为该位置上总的加载值,  $k = 1, 2, \dots, N^L$ ,  $N^L$  为加载的个数.

在优化设计中, 需要在感兴趣的频带内取足够多的采样频点, 然后用优化算法在这些频点上一一操作直到天线在所有频点上的电特性都满足设计要求为止. 这意味着当加载和匹配网络改变后天线的电特性都需要调用天线分析程序重新计算. 由于被优化参数数目众多, 取值范围广, 因此一般需要成千上万次调用天线分析程序. 如果每调用一次天线计算程序都是直接应用传统的矩量法分析在每个频点上的矩阵填充和矩阵求逆两个过程, 将使得优化过程耗费很多时间. 为克服这一缺点, 笔者应用文献[6]中给出的 Sherman-Morrison-Woodbury 公式来设计天线.

式(1)中的矩阵  $\mathbf{Z}^L$  可表示为

$$\mathbf{Z}^L = \mathbf{U} \mathbf{W}^T, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{W}$  都是  $M \times N^L$  阶矩阵, 其元素分别定义为

$$u_{mk} = Z_k^L \delta_{m,n_k^L} \quad \text{和} \quad w_{nk} = \delta_{n,n_k^L}. \quad (3)$$

这样, 利用式(2)的分解, 可由 Sherman-Morrison-Woodbury 公式求解式(1)为

$$\mathbf{I} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{Z}^L)^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{Y}^0 \mathbf{V} - \mathbf{Y}^0 \mathbf{U} (\hat{\mathbf{I}} + \mathbf{W}^T \mathbf{Y}^0 \mathbf{U})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Y}^0 \mathbf{V}, \quad (4)$$

式中  $\hat{\mathbf{I}}$  为  $N^L \times N^L$  阶单位矩阵,  $\mathbf{Y}^0$  为  $\mathbf{Z}^0$  的逆矩阵, 即未加载天线的导纳矩阵.

取  $\mathbf{I}^0 = \mathbf{Y}^0 \mathbf{V}$ ,  $\mathbf{A} = \hat{\mathbf{I}} + \mathbf{W}^T \mathbf{Y}^0 \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{A}$  为  $N^L \times N^L$  阶矩阵, 经过以上处理式(4)简化为

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}^0 - \mathbf{Y}^0 \mathbf{U} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{I}^0. \quad (5)$$

由式(5)可以看出来, 如果事先计算出各个频点上的未加载天线的导纳矩阵  $\mathbf{Y}^0$  和电流矩阵  $\mathbf{I}^0$ , 则只需要对

$N^L \times N^L$  阶的矩阵  $A$  求逆, 就可求出加载后天线上的电流分布。由于负载个数  $N^L$  同所有未知数  $M$  相比是很小的, 考虑到在粗略求得式(1)的解中所需的矩阵求逆有  $O(M^3)$  的复杂性, 应用式(5), 使得计算中只需在所有的采样频点上对未加载天线的阻抗矩阵填充及求逆一次, 然后存储所有未加载天线的导纳矩阵和电流矩阵, 利用这些导纳矩阵和电流矩阵就可以快速求解出任意加载天线的电特性, 大大地减少了对不同加载结构求解方程(1)的计算量。一旦知道了天线上的电流, 可很容易地计算出构成目标函数所必须的天线的增益, 以及天线的其他特性。

利用以上快速计算加载法向模螺旋天线的方法就可以快速优化设计任意加载和匹配网络的法向模螺旋天线了。笔者采用近年来广泛使用的智能全局优化算法——遗传算法来优化设计加载法向模螺旋天线。

由于优化的结果要同时满足电压驻波比和系统增益的指标, 因此要设计合适的目标函数来同时兼顾这两个方面。笔者选用由3部分组成的目标函数, 即

$$F = - \sum_{i=1}^{N^f} u(R(f_i), R_0) - \sum_{i=1}^{N^f} u(G_0^s, G^a(f_i, \theta_0)) - \sum_{i=1}^{N^f-1} |G^a(f_{i+1}, \theta_0) - G^a(f_i, \theta_0)|^2 \quad , \quad (6)$$

式中  $u(x, y) = \begin{cases} |x - y|^2, & x > y \\ 0, & x \leq y \end{cases}$ ,  $N^f$  是频带内采样点的个数,  $R(f_i)$  是每个频点上的电压驻波比,  $R_0$

是电压驻波比的设计目标,  $G^a(f_i, \theta_0)$  是天线在每个频点上俯仰角为  $\theta_0$  时的系统增益,  $G_0^s$  为天线的系统增益的设计目标,  $G^a(f_i, \theta_0)$  是天线在每个频点上俯仰角为  $\theta_0$  时的功率增益, 这里希望在天线水平面内得到最大增益, 所以取  $\theta_0 = 90^\circ$ 。系统增益定义为

$$G^s = G^a + 10 \log(1 - |\Gamma|^2) \quad , \quad (7)$$

式中  $\Gamma$  是天线的匹配网络输入端的电压反射系数。

从式(6)可以看出, 当各个采样频点上的电压驻波比和系统增益都满足设计目标时, 其前两项等于0, 这两项值达到最大。但仅此两式作为目标函数优化时, 电压驻波比和增益的特性随频率变化起伏剧烈, 并且对各个参数值的微小变化比较敏感。计算中发现, 第三项的引入明显改善了这一缺陷, 因为该项对天线的功率增益进行了平滑, 而且间接平滑了天线的阻抗曲线, 更易于阻抗匹配。

## 2 数值结果

根据前面所叙述的优化设计加载法向模螺旋天线的方法编制程序, 就可以综合任意加载的法向模螺旋天线。下面用一个优化设计的例子来说明该方法的应用。选定的法向模螺旋天线的结构参数为  $b = 0.01\text{ m}$ ,  $p = 0.055\text{ m}$ ,  $\psi = 41.2^\circ$ ,  $N = 5$ ,  $a = 0.003\text{ m}$ ,  $h_w = 0.03\text{ m}$ ,  $h = 0.305\text{ m}$ 。将每圈螺旋线分为11段, 直线段分为6段, 加载的位置在螺旋线上某两段之间。图2给出了该螺旋天线在150~450MHz范围内的输入阻抗, 分别给出了文中计算的结果和著名天线计算软件NEC2<sup>[13]</sup>的计算结果, 二者吻合良好, 验证了上述螺旋天线算法的正确性。

常用的加载集总元件为电阻、电容和电感, 可使用一种元件或多种元件组合来对天线进行加载, 选用合适的加载值和加载位置, 并加上合适的宽带匹配网络可以极大地展宽天线的工作带宽。文献[8]采用遗传算法对一高度为0.425m的直立单极天线进行加载和加匹配网络的优化设计, 得到了一副工作在125~1575MHz频带内驻波比小于3.5、增益大于-3dBi的天线。笔者利用加载法向模螺旋天线的优化设计方法得到了比文献[8]更好的结果。未加载天线在120~1600MHz范围内的电特性如图3所示。未加载天线的驻波比远高于3, 特别是在频率低端最高达到70多, 原因是远离谐振点天线的输入电阻很小, 而天线在720MHz附近以及1430MHz附近由于反向电流的影响, 系统增益都很小, 如图4所示。

万方数据

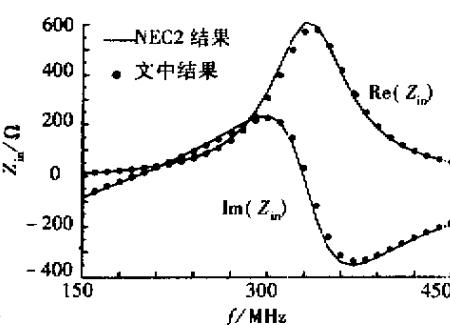


图2 法向模螺旋天线的输入阻抗

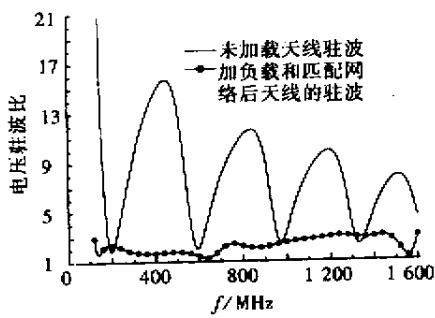


图 3 天线的驻波特性

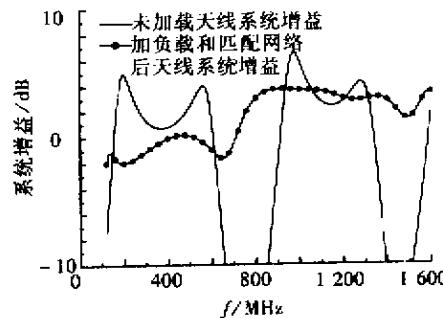


图 4 天线的增益特性

优化设计中在天线上的 3 个位置进行加载,加载形式为电阻、电感和电容并联,匹配网络采用图 1(c)所示的形式。天线上加载元件以及各网络参数的取值范围是:  $0 < R < 3000 \Omega$ ,  $0 < L < 0.5 \mu\text{H}$ ,  $0 < C < 500 \text{ pF}$ ,  $0.1 < n < 8$ ,以上元件的值在遗传算法中都用 10 位二进制码表示。天线分为 61 段,加载位置在相邻两段之间,则加载位置  $n^l$  的取值范围在 1~60 之间,采用 6 位二进制码表示。经过遗传算法的优化设计,所得的加载元件的值、加载位置如表 1 所示。匹配网络中各参数值分别为串联电感  $L_1 = 14.64 \text{ nH}$ ,并联电容  $C_1 = 0.91 \text{ pF}$ ,并联电感  $L_2 = 144.54 \text{ nH}$ ,传输线变压器变压比  $n = 1.59$ 。

表 1 加载的位置和元件值

	加载位置/m	电阻值/Ω	电感值/nH	电容值/pF
1# 加载	0.105	790.06	24.753	0.5
2# 加载	0.165	213.43	156.100	0.6
3# 加载	0.280	2036.00	404.540	18.4

设计后的天线电特性如图 3 和图 4 所示。在整个频带内,天线系统的输入电压驻波比  $R < 3.0$ ,系统增益  $G > -2.0 \text{ dBi}$ ,天线的高度仅为  $0.122\lambda_{\max}$ ,工作带宽达到了 13.3 倍频。由于存在损耗元件加载,所以在频率低端的系统增益降低,但加载带来的好处是克服了反向电流的影响,使天线增益在 720 MHz 及 1430 MHz 附近提高了许多,并且在整个频带内满足增益和驻波设计要求。显然,该优化结果要比文献[8]的结果好得多,特别是在天线高度方面,螺旋结构的使用使天线高度降低了约 30%,充分显示了用加载法向模螺旋天线实现宽带化小型化的优势,完全可以满足现代保密通信和移动通信的需求。

### 3 结 论

以上论述了一种利用加载法向模螺旋天线来优化设计宽带小型化天线的新技术,该技术通过全局优化算法——遗传算法结合矩量法对天线加载值、加载位置以及相关的匹配网络参数这一庞大的群体进行了一体化最优化。引入 Sherman-Morrison-Woodbury 公式来快速求解加载形式改变后天线的电特性,使优化的效率大大提高。文中给出了一个宽带小型化天线的设计例子,充分说明了该方法的有效性。虽然这里得到的仅为理论结果,但也对宽带小型化天线的制作和实验调整起着关键的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 王元坤,李玉权.线天线的宽频带技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [2] Fujimoto K, James J R. Mobile Antenna Systems Handbook[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [3] 孙保华,周良明,肖辉.天线匹配网络的设计与计算方法[J].西安电子科技大学学报,2001,26(6):793-797.
- [4] 陈国良,王旭发.遗传算法及其应用[M].北京:人民邮电出版社,1996.
- [5] Weile D S, Michielssen E. Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: a Review[J]. IEEE Trans on AP, 1997, 45(3):343-353.
- [6] Boag A, Michielssen E, Mittra R. Design of Electrically Loaded Wire Antennas Using Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(5):687-695.

(下转第 780 页)

$$[1,1,1] \cdot \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ x_{11} & 1 & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} & 1 & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} & z_{16} & z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} & 1 & z_{32} & z_{33} & z_{34} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\theta}^T \quad (2)$$

## 7 结论与讨论

基于网的不变式理论,提出了局部公平网的一个充分条件,同时提出了如何把一个局部公平网设计为一个公平网的方法。局部公平网是由文[4]首先提出,近年来关于局部公平网的研究并不多,进一步的工作是考虑系统含有不可控变迁时进行网的强制公平或活性研究<sup>[7]</sup>,控制实现<sup>[8]</sup>,以及 Petri 网可实施强制公平控制的条件等。

### 参考文献:

- [1] 吴哲辉,王培良. 公平网的一个充分必要条件[J]. 科学通报,1990,35(16):1121-1123.
- [2] 王培良,吴哲辉. 公平网的一组直接判断条件[J]. 计算机学报,1993,16(1):53-58.
- [3] Wu Z H, Murata T. A Petri Net Model of a Starvation-free Solution to the Dinning Philosophers's Problem[A]. Proceedings of IEEE Workshop on Languages for Automatior[C]. Chicago: IEEE Press, 1983. 192-195.
- [4] 李志武. Petri 网的局部公平性[J]. 计算机学报,1998,21(增):41-45.
- [5] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
- [6] Wu Z H, Murata T. Fair Relation and Modified Synchronic Distance in a Petri Ne[J]. Journal of the Franklin Institute, 1985, 320(2): 63-85.
- [7] 李志武,于振华. 分布式资源共享系统的渐进性设计[J]. 西安电子科技大学学报,2002,29(5):684-689.
- [8] 李志武. 顺序任务梯形图的设计方法[J]. 西安电子科技大学学报,1999,26(4):401-405.

(编辑:郭 华)

(上接第 724 页)

- [7] Alanan Z, Mittra R, Boag A. New Design of Ultra Wide-Band Communication Antennas Using a Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on AP, 1997, 45(10):1494-1501.
- [8] Rogers S D, Yegin K, Martin A Q, et al. Genetic Algorithm Optimization and Realization of Broadband Loaded Wire Monopoles[A]. IEEE International Symposium on AP[C]. Boston: IEEE Press, 2001. 676-680.
- [9] Caswell E D, Davis W A. Analysis of a Helix Antenna Using a Moment Method Approach with Curved Basis and Testing Function[A]. IEEE International Symposium on AP[C]. Atlanta: IEEE Press, 1998. 111.
- [10] Ji Yicai, Sun Baohua, Liu Qizhong. A New Moment Method for the Fast and Accurate Analysis of Normal Mode Helical Antennas[J]. Journal of Electronics (China), 2001, 18(4):355-358.
- [11] Harrington R F. Field Computation by Moment Method[M]. New York: Macmillan, 1968.
- [12] Rogers S D, Yegin K, Martin A Q, et al. Optimization of Loaded Normal Mode Helical Antennas[A]. Digest of the Electromagnetic Theory Symposium[C]. Thessaloniki: URSI Press, 1998. 36-38.
- [13] Burke G J, Poffio A J. Numerical Electromagnetics Code (NEC) — Method of Moments[R]. San Diego: Lawrence Livermore Lab, 1981.

(编辑:郭 华)

## 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>