

文章编号:1007-5321(2009)05-0119-05

# 共用天线结合导频的自适应跳频同址干扰抵消

袁小刚, 黄国策, 牛红波, 郭兴阳

(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

**摘要:** 针对空间受限平台跳频(FH)通信系统同址干扰的特点, 提出共用天线结合导频的跳频同址干扰抵消(CAP-FH-AIC)算法。只需在自适应定频同址干扰抵消系统的基础上增加导频产生模块和窄带滤波器, 通过将多参考输入自适应跳频干扰抵消(M-AIC)转化为单参考输入自适应定频同址干扰抵消(S-AIC)的方式即实现本算法。算法实现简单、性能稳定, 使跳频同址干扰抵消可以获得和定频同址干扰抵消一致的性能。

**关键词:** 自适应干扰抵消; 同址干扰; 跳频通信; 导频; 共用天线

中图分类号: TN911.4 文献标志码: A

## Adaptive Frequency Hopping Co-Site Interference Cancellation with Community Antenna and Pilot

YUAN Xiao-gang, HUANG Guo-ce, NIU Hong-bo, GUO Xing-yang

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A method of frequency hopping (FH) co-site interference cancellation using community antenna and pilot (CAP-FH-AIC) is proposed according to the analysis of the characteristic of the FH co-site interference. The structure of the canceller is transformed from multi-reference adaptive FH co-site interference cancellation (M-AIC) to single-reference adaptive fixed-tuned co-site interference cancellation (S-AIC) only by adding an additional generator of the pilot signal and an additional band-pass filter. It can realize the cancellation of the FH co-site interference and get almost the same performance of the adaptive fixed-tuned co-site interference cancellation. The theoretical inference and simulation confirm that the algorithm can get the advantage of steady performance in FH co-site interference suppression.

**Key words:** adaptive interference cancellation; co-site interference; frequency hopping communications; pilot; community antenna

自适应同址干扰抵消系统主要用于解决多部电台同址工作时, 收发信机间的隔离问题。由于各个跳频信号频率跳变时刻不一, 多个跳频发射信号叠加后导致整个跳频通信系统同址干扰的频率跳变十分复杂, 增加了跳频通信系统同址干扰抵消的难度<sup>[1]</sup>。常用的多参考输入自适应同址干扰抵消(M-

AIC)算法, 在跳频同址干扰信号每个发生频率变化的时刻都需要重新调整抵消器的权值才能再次收敛, 导致系统很难达到一个稳定状态<sup>[2-3]</sup>。针对跳频同址干扰的干扰数量多和时变特性, 本文提出共用天线结合导频的自适应跳频同址干扰抵消(CAP-FH-AIC)算法, 将多参考输入跳频同址抵消转化为

收稿日期: 2009-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(60802053); 中国博士后科学基金项目(20070421136)

作者简介: 袁小刚(1980—), 男, 博士生, E-mail: xiaogang061218@163.com; 黄国策(1962—), 男, 教授, 博士生导师。

单参考输入定频同址干扰抵消来实现,在恒参信道和时变信道中均可以取得稳定的跳频同址干扰抑制性能。

## 1 自适应同址干扰抵消系统

自适应同址干扰抵消系统是自适滤波准则的一种具体应用,基于有限冲激响应(FIR)结构的M-AIC原理如图1所示<sup>[3-4]</sup>。

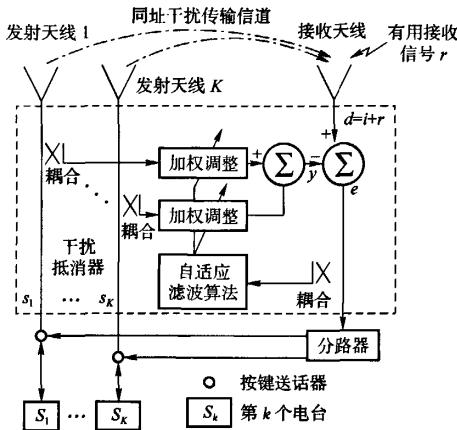


图1 多参考输入自适应干扰抵消原理

图1中,  $s_k$  为第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 个同址通信系统的发射信号;  $d$  为有用接收信号  $r$  叠加同址干扰信号  $i$  后的抵消器输入信号;  $e$  为误差信号, 也是干扰抵消系统输出。

$$\mathbf{s}_k(n) = [s_{k,0}(n) \ s_{k,1}(n) \ \cdots \ s_{k,N-1}(n)] \quad (1)$$

$$\mathbf{w}_k(n) = [w_{k,1}(n) \ w_{k,2}(n) \ \cdots \ w_{k,N-1}(n)] \quad (2)$$

式中,  $N$  为干扰抵消器的阶数;  $\mathbf{s}_k(n)$  和  $\mathbf{w}_k(n)$  分别为干扰抵消器第  $k$  路的参考输入和权系数向量。

多参考输入自适应干扰抵消器的参考输入和权系数向量为

$$\mathbf{s}(n) = [\mathbf{s}_1(n) \ \mathbf{s}_2(n) \ \cdots \ \mathbf{s}_K(n)] \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(n) = [\mathbf{w}_1(n) \ \mathbf{w}_2(n) \ \cdots \ \mathbf{w}_K(n)] \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{i=1}^M \mathbf{s}_i(n) \mathbf{w}_i^T(n) = \mathbf{s}(n) \mathbf{w}^T(n) \quad (5)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{s}(n) \mathbf{w}^T(n) \quad (6)$$

基于最小均方(LMS)算法的多参考输入自适应干扰抵消算法权系数向量  $\mathbf{w}(n)$  的迭代式为<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu \mathbf{e}(n) \mathbf{s}(n) \quad (7)$$

式中  $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\max}$  为参考输入信号  $\mathbf{s}(n)$  相

关矩阵  $\mathbf{R}_s(n)$  的最大特征值。

M-AIC 抵消器应用于定频通信系统同址干扰抵消时,可以取得较好的效果。但是,采用该抵消器进行跳频通信系统的同址干扰抵消时,因为干扰信号的频率快速跳变,使自适应干扰抵消器需要不断调整权值,导致抵消效果不好。

## 2 共用天线结合导频的跳频同址干扰抵消算法

### 2.1 共用天线结合导频的跳频同址干扰抵消原理

天线结合导频的自适应跳频同址干扰抵消算法的系统结构,如图2所示。

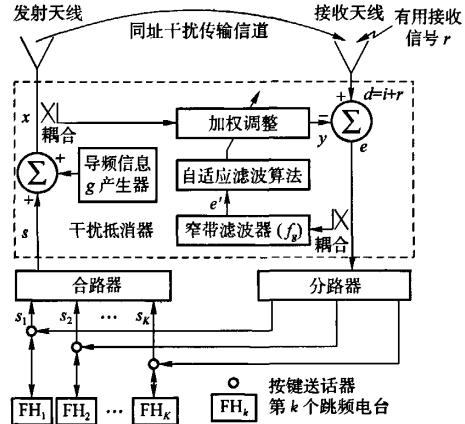


图2 共用天线结合导频的自适应跳频同址干扰抵消原理

图2中,  $s$  为同址跳频通信系统的发射信号,  $g$  为频率为  $f_g$  的导频,  $e'$  为误差信号经过中心频率为  $f_g$  的窄带滤波后的信号; 同址干扰传输信道的传输函数为  $H(z)$ , 自适应干扰抵消器的传输函数为  $W(z)$ , 其余参数的定义与图1一致。

$$s = \sum_{k=1}^K s_k \quad (8)$$

式中  $s_k$  为第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 个本地跳频发射机的发射信号, 当该跳频电台未处于发射状态时, 即认为该电台的发射信号  $s_k = 0$ 。

同址跳频电台的发射信号通过共用天线发射, 自适应跳频同址干扰抵消器首先在发射天线上对发射信号取样, 此时的发射信号包括跳频信号和导频 2 部分。取样信号作为参考信号经自适应加权调整, 使加权后的参考信号与接收天线接收的同址干扰信号等幅、反相, 然后经合并器使 2 个信道的信号相加, 从而使干扰信号对消, 保证接收机正常工作。

由于采用了导频和以  $f_g$  为中心频率的窄带滤波器, 权值调整由导频的自适应干扰抵消过程进行控制。下面对自适应算法的原理进行推导和分析。

天线发射信号为跳频发射信号和导频的合成, 即

$$X(z) = S(z) + G(z) \quad (9)$$

天线发射信号经过无线传输信道到达接收天线, 形成的同址干扰信号为  $i$ , 则

$$I(z) = X(z)H(z) \quad (10)$$

接收天线的有用接收信号为  $d$ , 则

$$D(z) = I(z) + R(z) = X(z)H(z) + R(z) \quad (11)$$

$x$  经过干扰抵消器到达接收天线, 此时信号为  $y$ , 则

$$Y(z) = X(z)W(z) = [S(z) + G(z)]W(z) \quad (12)$$

2个信道的信号叠加后的误差信号为  $e$ , 则

$$E(z) = D(z) - Y(z) = [S(z) + G(z)][H(z) - W(z)] + R(z) \quad (13)$$

假定窄带滤波器为中心频率为  $f_g$  的理想窄带滤波器, 误差信号滤波后的信号为  $e'$ , 则

$$\begin{aligned} E'(z) &= E(z)H_g(z) = \\ &= [(S(z) + G(z))[H(z) - W(z)] + R(z)]H_g(z) = \\ &= G(z)[H(z) - W(z)]H_g(z) = \\ &= G(z)[H(z) - W(z)] \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)表明,  $e'$  只含有导频频率成分。设  $g$  由同址干扰传输信道和干扰抵消器到达接收天线的信号分别为  $g_h$  和  $g_w$ , 则

$$G_h(z) = G(z)H(z) \quad (15)$$

$$G_w(z) = G(z)W(z) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E'(z) &= G(z)H(z) - G(z)W(z) = \\ &= G_h(z) - G_w(z) \end{aligned} \quad (17)$$

$$e'(n) = g_h(n) - g_w(n) \quad (18)$$

$$E[e'^2(n)] = E\{[g_h(n) - g_w(n)]^2\} \quad (19)$$

由自适应滤波原理很容易得知, 对于给定的自适应滤波器结构、可调节性和给定的参考输入, 调节滤波器参数就可以使误差信号  $e'(n)$  最小<sup>[5]</sup>。假定干扰抵消达到稳态时, 自适应干扰抵消器的传输函数为  $W_{opt}(z)$ , 可以得到

$$E'(z) = G(z)[H(z) - W_{opt}(z)] \quad (20)$$

$$G_h(z) - G_w(z) = G(z)H(z) - G(z)W_{opt}(z) \quad (21)$$

$$[G_h(z) - G_w(z)]/G(z) = H(z) - W_{opt}(z) \quad (22)$$

下面分析跳频通信系统的发射信号  $s$  的情况。假定  $s$  由同址干扰传输信道和干扰抵消器到达接收天线的信号分别为  $s_h$  和  $s_w$ , 则

$$S_h(z) = S(z)H(z) \quad (23)$$

$$S_w(z) = S(z)W_{opt}(z) \quad (24)$$

$$S_h(z) - S_w(z) = S(z)H(z) - S(z)W_{opt}(z) \quad (25)$$

$$[S_h(z) - S_w(z)]/S(z) = H(z) - W_{opt}(z) \quad (26)$$

综合式(22)和式(26)可得

$$\begin{aligned} \frac{S_h(z) - S_w(z)}{S(z)} &= H(z) - W_{opt}(z) = \\ &= \frac{G_h(z) - G_w(z)}{G(z)} \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)说明, 跳频同址干扰可以获得和  $g$  产生的干扰  $g_h$  一致的抵消性能。当理想状态时, 在导频完全抵消的同时, 跳频同址干扰也得到完全抵消。

$$g_h(n) - g_w(n) = e'(n) = 0 \quad (28)$$

$$H(z) - W_{opt}(z) = E'(z)/G(z) = 0 \quad (29)$$

$$s_h(n) - s_w(n) = 0 \quad (30)$$

以上分析证明, 导频产生后进入发射天线, 经过同址干扰传输信道到达接收天线, 导频将经历与真实的跳频同址干扰信号完全一样的无线传输信道<sup>[6]</sup>; 自适应干扰抵消器的作用是估计同址干扰传输信道函数, 一旦导频被抵消, 就表明自适应干扰抵消器完成了该信道传输函数的估计 ( $W_{opt}(z) \approx H(z)$ ), 因而在导频产生的干扰  $g_h$  被抵消的同时, 跳频同址干扰也得到一致的抵消效果。因此, 该算法可以获得与单参考输入自适应定频同址干扰抵消一致的性能, 很好地实现了跳频同址干扰抵消功能。

式(14)和式(19)表明, 只要窄带滤波器性能理想, 自适应干扰抵消器的权系数收敛就只与导频有关, 完全消除了跳频信号的时变特性对自适应干扰抵消的影响, 因而可以得到稳定的抵消效果。

## 2.2 导频和窄带滤波器设计

针对战术跳频通信系统(30~88 MHz)的同址干扰, 导频采用 50 MHz 正弦信号(实际系统设计时须具有多个导频, 供频率分配时灵活使用), 窄带滤波器采用 4 个二阶无限冲激响应(IIR)带通滤波器级联, 传递函数为

$$H_g(z) = \left( \frac{0.0069 - 0.0069z^{-2}}{1 + 0.9863z^{-2}} \right)^4 \quad (31)$$

幅频响应如图3所示。

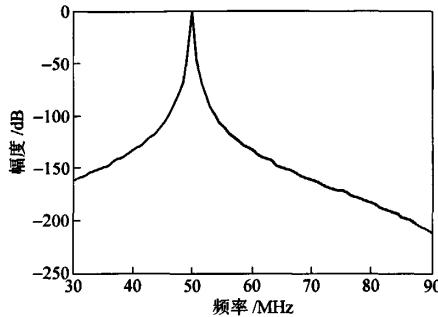


图3 50 MHz IIR 带通滤波器幅频特性

导频功率为跳频发射机射频功率的0.01%，则导频有效通信距离约为跳频电台有效通信距离的1%，不会对电台的保密性产生严重影响；干扰抵消后剩余的导频功率对系统抵消性能基本没有影响。

采用导频进行自适应跳频同址干扰抵消时，必须在频率分配时尽可能满足导频不受干扰，即通过有效的频率分配算法保证跳频发射频率和导频频率具有一定的频率间隔（不小于3 MHz），并避免射频前端电路产生的互调干扰等非线性干扰对导频的影响<sup>[7]</sup>。

### 2.3 自适应跳频同址干扰抵消算法

CAP-FH-AIC 抵消器的参考输入向量  $\mathbf{X}(n)$  和权系数向量  $\mathbf{W}(n)$  分别为

$$\mathbf{X}(n) = [x_0(n) \quad x_1(n) \quad \cdots \quad x_{N-1}(n)] \quad (32)$$

$$\mathbf{W}(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \cdots \quad w_{N-1}(n)] \quad (33)$$

得到误差信号  $e(n)$ 、 $e'(n)$  和参考输入中的导频  $g(n)$  分别为

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{X}^T(n) \mathbf{W}(n) \quad (34)$$

$$e'(n) = e(n) * h_g(n) = \{d(n) - \mathbf{X}(n) \mathbf{W}^T(n)\} * h_g(n) \quad (35)$$

$$g(n) = x(n) * h_g(n) \quad (36)$$

式中  $h_g(n)$  为中央频率为  $f_g$  的窄带滤波器脉冲响应。 $\mathbf{X}(n)$  中的导频向量为

$$\mathbf{G}(n) = [g_0(n) \quad g_1(n) \quad \cdots \quad g_{N-1}(n)] \quad (37)$$

自适应滤波算法采用LMS算法，得到权系数向量的更新公式为

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu e(n) \mathbf{G}(n) \quad (38)$$

式中， $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ ， $\lambda_{\max}$  为参考输入信号中导频向量  $\mathbf{G}(n)$  相关矩阵  $\mathbf{R}_{gg}(n)$  的最大特征值。

### 3 仿真结果

仿真模型如下：同址3部跳频电台处于发射状态，干扰另一部处于接收状态的跳频电台；跳频频率范围30~88 MHz，跳频速率1 000跳/s，换频时间为跳频周期的5%；跳频电台发射功率为50 W(47 dBm)，导频功率为5 mW(7 dBm)，收发天线隔离度为30 dB，有用接收信号功率为-70 dBm，系统噪声功率为-120 dBm；各跳频电台采用无记忆跳频序列码，跳频信号与导频频率间隔不小于3 MHz；同址干扰传输信道最大多径时延扩展为23 ns，分恒参信道和时变信道2种情况；时变信道中，信道多径时延和幅度每隔0.5 ms产生随机变化<sup>[3,8]</sup>。采样速率为250 MHz，通过计算可知抵消器为6阶<sup>[5]</sup>；LMS算法的步长为  $\mu = 0.002$ 。对各算法分别做50次独立仿真，求其统计平均得到恒参信道和时变信道中各算法的跳频同址抵消性能仿真结果，如图4所示。

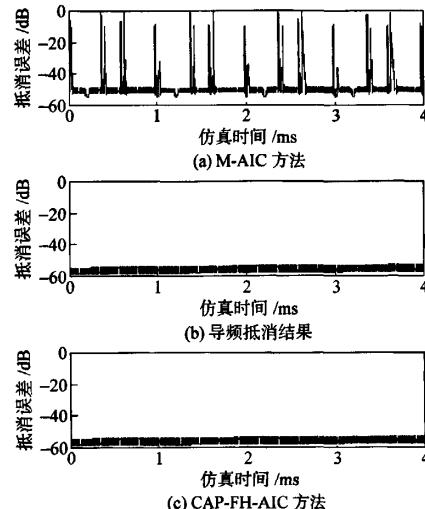


图4 恒参信道中跳频同址干扰抵消性能

仿真结果表明，不管是恒参信道还是时变信道，CAP-FH-AIC 算法的抵消误差和导频产生的干扰抵消误差基本一致，可以取得比较理想的跳频同址干扰抑制效果，并且在整个抵消过程中抵消性能都十分平稳。在恒参信道中，该算法可以获得超过50 dB的稳定干扰抵消性能；在时变信道中，干扰抵消性能虽然随着信道的变化略有起伏，但是也能维持约

50 dB的抵消性能。然而M-AIC算法的稳定性差,随着跳频同址干扰信号频率的不断跳变,抵消器权系数需要不断地重新调整以达到稳态,导致在很多时刻的剩余干扰依然很大;图5表明,由于跳频同址干扰的时变特性和信道的时变特性叠加,导致M-AIC算法在时变信道中的性能更不稳定。

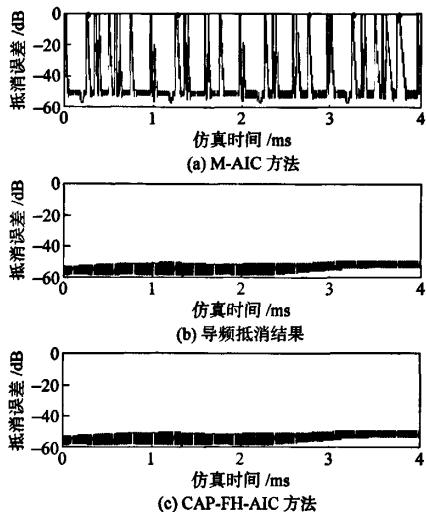


图5 时变信道中跳频同址干扰抵消性能

由于自适应干扰抵消系统的性能受到最大期望干扰功率 $P_i$ 和系统热噪声功率 $P_o$ 之比的影响, $P_i/P_o$ 值越大,干扰抵消性能越好<sup>[5]</sup>。因此,当导频受到频率选择性衰落影响导致导频引起的干扰功率下降时,CAP-FH-AIC算法的干扰抵消性能也将受到影响。图6示出了导频受频率选择性衰落影响时,衰落深度与干扰抵消性能之间的关系。

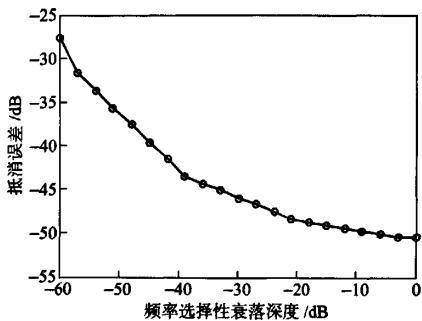


图6 导频的频率选择性衰落对干扰抵消性能的影响

由于实际同址干扰信道传输距离较短、多径时延扩展较小,其引起的频率选择性衰落深度通常不超过-10 dB<sup>[3,8]</sup>;图6表明,频率选择性衰落对

CAP-FH-AIC算法的干扰抵消性能的影响并不严重,在此情况下,CAP-FH-AIC算法可以获得接近-50 dB的干扰抵消性能。因此,M-AIC算法在稳态时可以获得与CAP-FH-AIC算法相近的干扰抵消性能;但是CAP-FH-AIC算法在整个干扰抵消过程中都能保持稳定和理想的性能,整体性能明显优于M-AIC算法。

## 4 结语

CAP-FH-AIC算法将多部跳频电台产生的同址干扰转化为1部定频电台产生的同址干扰进行抵消,通过科学的频率管理方法确保导频与跳频信号具有不小于3 MHz的频率间隔,理论分析和仿真结果均表明,该算法能获得很好的跳频同址干扰抑制效果和稳定性,其性能和定频同址干扰抵消系统基本一致。该算法性能稳定、结构简单,只需在现有的自适应定频同址干扰抵消器上加装导频产生器和窄带滤波器即可实现,为空间受限军事通信平台同时装配和使用多部跳频电台提供了一个较好的解决方案。

## 参考文献:

- [1] Maiuzzo M, Harwood T, Duff W. Radio frequency distribution system (RFDS) for cosite electromagnetic compatibility[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2005. Chicago: IEEE Press, 2005: 250-255.
- [2] Lagasse M L, Lexington M A. Cosite interference rejection system using an optical approach: US, 7231151B2[P]. 2007-06-12.
- [3] Kowalski A M. Wideband cosite interference reduction apparatus: US, 6693971[P]. 2004-02-17.
- [4] Chu Y, Horng W Y. A robust algorithm for adaptive interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(7): 2121-2124.
- [5] Haykin S. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝天,译. 北京:电子工业出版社, 2003: 728-734.
- [6] 徐霞艳,林家儒,吴伟陵. 一种新的时分导频信道估计算法[J]. 北京邮电大学学报, 2002, 25(1): 68-72. Xu Xiayan, Lin Jiaru, Wu Weiling. A new channel estimation algorithm for time-multiplexed pilot channel[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2002, 25(1): 68-72.
- [7] Yuan Xiaogang, Huang Guoce. Frequency assignment in military synchronous FH networks with cosite constraints[C]// IEEE International Symposium on KAM Workship 2008. Wuhan: IEEE Press, 2008: 655-658.
- [8] Maxson B D. Optimal cancellation of frequency-selective cosite interference[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2002.

## 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>