

# 基于定向天线的非对称无线自组网中 MAC 协议的研究

丁艳荣 王晓东 沈虎 郭鹏宇

(国防科学技术大学计算机学院并行与分布处理国防科技重点实验室 长沙 410073)

(yanrongding700@gmail.com)

## Media Access Control Protocol in Asymmetric Ad Hoc Networks Based on Directional Antennas

Ding Yanrong, Wang Xiaodong, Shen Hu, and Guo Pengyu

(National Key Laboratory for Parallel and Distributed Processing, School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** When the modes of the smart antennas cannot be transformed, the communications between directional-nodes and omni-nodes are asymmetric and may be failed. In this paper, we discover a new deafness problem and hidden terminal problem, and propose a nested circular directional MAC protocol in which the omni-nodes use multi-hop RTS/CTS and the directional-nodes apply circular DRTS respectively while the directional antennas circumrotate two cycles. The ns2 simulation shows that NCDMAC can resolve the above problems effectively and be better than MMAC and circular MAC in terms of increasing throughput with little communication delay.

**Key words** asymmetric Ad Hoc networks; NCDMAC protocol; hybrid RTS/CTS mechanism; directional antennas

**摘要** 在采用全向天线的节点与定向天线的节点混杂的非对称网络中,传统定向 MAC 协议将带来新的“聋”问题和隐藏终端问题。针对这些问题,设计了 NCDMAC(nested circular directional MAC)协议。在该协议中,全向节点采用多跳 RTS/CTS,定向节点采用循环 DRTS,定向天线嵌套旋转两周,以交换握手帧。ns2 模拟仿真显示,NCDMAC 协议在增加一定通信时延的情况下,能够解决非对称网络下的“聋”问题和隐藏终端问题,并带来比 Multi-hop MAC 和 Circular MAC 协议更大的网络吞吐量。

**关键词** 非对称 Ad Hoc 网络; NCDMAC 协议; 混合 RTS/CTS 机制; 定向天线

**中图法分类号** TP391

在传统的无线自组网<sup>[1]</sup>中使用定向天线可以有效减少无线节点间通信的干扰,增加空间复用,进而提高无线自组织网络的吞吐量。但同时也带来了更多挑战,从网络连通性<sup>[2]</sup>、路由协议<sup>[3]</sup>到 MAC 协议<sup>[4-5]</sup>都存在值得研究的问题。MAC 协议不仅面临传统的隐藏终端问题,还将受到新的隐藏终端问题、“聋”问题、天线边瓣效应问题等的影响。

在实际应用中,网络中会存在两种不同的节点:定向节点(只配备定向天线)和全向节点(只配备全向天线)。两种节点的通信半径不对称可能造成通信失效,引发新的“聋”问题和隐藏终端问题等。针对这些问题,我们设计了一种新的定向 MAC 协议:NCDMAC(nested circular directional MAC)协议。在该协议中,定向节点定期扫描各个方向上的信号,

确保定向节点能检测到握手信息,以减少“聋”问题的发生;全向节点采用多跳 RTS/CTS,确保握手信息能发送至定向节点,并减少隐藏终端问题。

## 1 问题描述

当网络中的定向节点和全向节点通信时,由于天线增益不对称使得两种节点的通信半径不对称,可能造成两种节点无法正常交换 RTS/CTS 信息。针对全向节点无法与定向节点通信的情况,多跳 RTS/CTS 可解决这一问题,但同时也带来了新的问题。

### 1) “聋”问题

如图 1 所示,节点 A 有数据要发送给节点 B,假设 A 知道 B 的方向,发送一个 DRTS 给 B,B 收到后,回复一个 CTS,假设这个 CTS 要经过 2 跳由节点 C 传给 A。此时,A 的天线指向 B,所以 A 无法接收到 CTS,这样,C 会重传,直至超时。这就增加了网络中的“聋”问题。

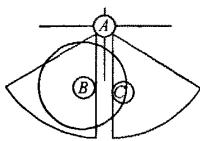


图 1 “聋”问题

### 2) 隐藏终端问题

如图 2 所示,节点 A 和节点 B 之间正在通信,节点 C 为 B 的另外一个配备有定向天线的邻居,A 的 DRTS 和 B 的 CTS 都无法到达 C,所以 C 不知道 A 和 B 之间的通信。当它有数据发送给 B 时,会干扰 A 和 B 之间的通信(影响 B 处的数据接收)。

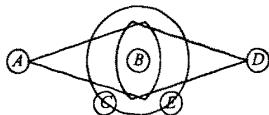


图 2 新的隐藏终端问题

## 2 相关工作

D-MAC 协议<sup>[6]</sup>基于 IEEE802.11MAC,是早期一个比较著名的定向 MAC 协议。该协议假定任何一个节点都可以通过某种方法知道目标节点的地址信息(方向),并通过 RTS/CTS 锁定天线方向。该协议只能部分解决隐藏终端问题,无法解决“聋”问题。

文献[7]提出定向载波侦听协议 DVCS,每个节点缓存所有节点的估计方向(AoAs),并采用 DNAV 来预留信道。当一个节点有数据要发送时,如果该节点知道目标节点的方向,则发送 DRTS,否则发送 ORTS。如果发送 DRTS 超过一定的次数而没有收到 CTS,发送端则认为目标节点的位置发生了改变,下一次将发送 ORTS。当周围节点接收到 RTS 和 CTS 后,设置各自的 DNAV。该协议没有解决隐藏终端问题和“聋”问题。多跳 MAC 协议<sup>[8]</sup>通过多跳 RTS 在 2 个相距较远的节点间建立链路,然后定向发送 CTS/DATA/ACK,一跳完成通信。其平均端到端延迟较 D-MAC 大,且没有解决隐藏终端问题和“聋”问题。另一个比较典型的协议是 Circular-DMAC 协议<sup>[9]</sup>,该协议中,每个节点连续地在各个波瓣上发送 DRTS,并在本地保存一个表以记录各个方向上的邻居节点,该协议可用来解决以往的隐藏终端问题和“聋”问题,但无法解决非对称网络条件下新的“聋”问题和隐藏终端问题。

文献[10]假设网络当中所有节点都配备定向天线(不能转换模式),提出了 DtD-MAC 协议,提高了空间复用,消除了天线增益不对称带来的诸多问题。文献[11]中,作者考虑了定向天线和全向天线在同一稀疏网络中的工作情况,并提出了混合分布式协同功能(HDCF)协议,但作者只在理想状态下利用马尔可夫链分析了网络的性能,并没有深入讨论该种网络中天线增益不对称造成的通信失效、新的“聋”问题和隐藏终端问题的解决方案。本文针对非对称网络中的新问题,设计了一种 NCDMAC 协议,部分解决了新的“聋”问题和隐藏终端问题,并提高了网络吞吐量。

## 3 NCDMAC 协议

该协议基于 DVCS,MMAC 和 Circular-MAC,利用多跳 RTS/CTS 减少网络当中的通信失效和隐藏终端问题,利用天线嵌套循环旋转减少“聋”问题,并提高了网络吞吐量。

### 3.1 协议详细描述

#### 1) 握手机制

网络中存在 4 种握手过程:DRTS/DCTS,DRTS/CTS,RTS/DCTS 和 RTS/CTS。DRTS/DCTS 和 RTS/CTS 和以往的握手机制类似,我们在此讨论 DRTS/CTS 和 RTS/DCTS。

针对中间路由节点的位置分布会存在一种问题:

当中间路由节点位于发送方的方向上时,如果将其静默,CTS很可能无法转发.我们采用下式对 NAV 和 DNAV 的长度进行新的计算,其中  $n$  为节点跳数,  $RTS^*/CTS^* = RTS/CTS$  为在整个路径上的时间.

#### ① DRTS/CTS(定向发送全向接收)

$$NAV = DNAV - (n-1) \times CTS - n \times SIFS;$$

$$DNAV = DDATA + CTS^* + 3 \times SIFS + ACK.$$

#### ② RTS/DCTS(全向发送定向接收)

$$NAV = DNAV - (n-1) RTS - n \times SIFS;$$

$$DNAV = DATA + RTS^* + 3 \times SIFS + DACK.$$

RTS/CTS 帧的格式和标准的 802.11 一样, DRTS/DCTS 帧的格式如图 3 所示:

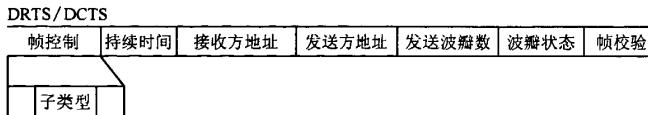


图 3 DRTS/DCTS 帧格式

#### 2) DVCS,DNAV 与 AoA Caching

DVCS,DNAV 与 AoA Caching 都是定向 MAC 协议中常用的处理方法,在此也采用类似的方法,只是在 AoA Caching 中增加预测发送节点的可能方向这一项.

#### 3) 天线嵌套循环旋转

定向发送节点若知道全向接收节点方向,则在该方向上发送 DRTS,然后查看 AoA Caching 中 CTS 可能到达的方向,若存在则将天线旋转至该方向,等待 CTS 的到来;若不存在则按逆时针顺序旋转天线,在各个方向上等待 CTS 的到来,等待时间设置为 CTS 到达的时间长度: $n \times CTS + n \times DIFS$ ,  $n$  为中间节点的个数,这样就解决了图 1 所示的“聋”问题.若定向发送节点不知道全向接收节点的方向,则按逆时针顺序在各个方向上循环发送 DRTS,每发送完一个 DRTS 都按上述过程等待 CTS 的到来,直到接收到 CTS.在此过程中,天线可能需要嵌套循环两周.当全向节点发送数据时,全向节点发送多跳 RTS,等待定向节点的 DCTS.定向节点会定期扫描各个方向上的信号,当接收到全向节点发送的 RTS 后,查找 AoA Caching 得到全向节点的方向,直接在该方向上发送 DCTS.这里定向节点的天线只在初始阶段循环旋转一周.

#### 4) 多跳 RTS/CTS

该机制用来解决图 2 所示的隐藏终端问题.定向节点 A 有数据发送给全向节点 B,可能会受到 B 的定向邻居 D 的干扰.在此,我们让节点 B 既通过节点 C 发送 CTS 以回复 A 发送的 DRTS,同时又通过节点 E 转发 CTS 以通知 D 即将进行的通信,防止 D 对 B 处的数据接收产生干扰,即减少隐藏终端问题.相反,当全向节点有数据发送给定向节点时,采取多跳 RTS 方式以减少隐藏终端问题的产

生.文献[8]中只有 RTS 采用多跳方式,且只有通信节点对路由路径上的节点才发送多跳 RTS,其他节点将 RTS 丢弃.

#### 3.2 协议的控制流程

定向节点发送数据的过程可能会产生嵌套的循环,图 4(a)详细描述了整个数据的发送流程.全向节点发送数据没有嵌套的循环产生,如图 4(b)所示.图 4(c)解释了定向节点和全向节点接收数据的过程.两种节点接收数据的过程相似.

#### 4 性能评估

使用 ns2 模拟器<sup>[12]</sup>(版本为 2.33)评估 NCDMAC 协议.模拟参数如表 1 所示,使用 Two-ray ground 模型作为无线传输模型.定向天线已经集成到模拟器中.所有节点随机分布在 200 m × 200 m 的矩形区域,采用 AODV 路由协议.主要从天线波瓣数 M、网络节点密度以及定向节点与全向节点比例等方面对吞吐量和时延进行讨论.因为当前没有和 NCDMAC 协议类似的用来解决非对称网络条件下这类问题的协议存在,所以仍采用 3 种经典的协议进行比较.

表 1 模拟参数

参数	值	参数	值
Channel rate/Mb/s	11	SIFS/μs	10
Tx power/dBm	15	DIFS/μs	50
Rx threshold/dBm	-81	Slot-time/μs	20
Sensing threshold/dBm	-91	Packet size/B	512
DRTS/RTS/B	20	MAC header/B	28
DCTS/CTS/B	14	PHT header/B	24
ACK/B	14		

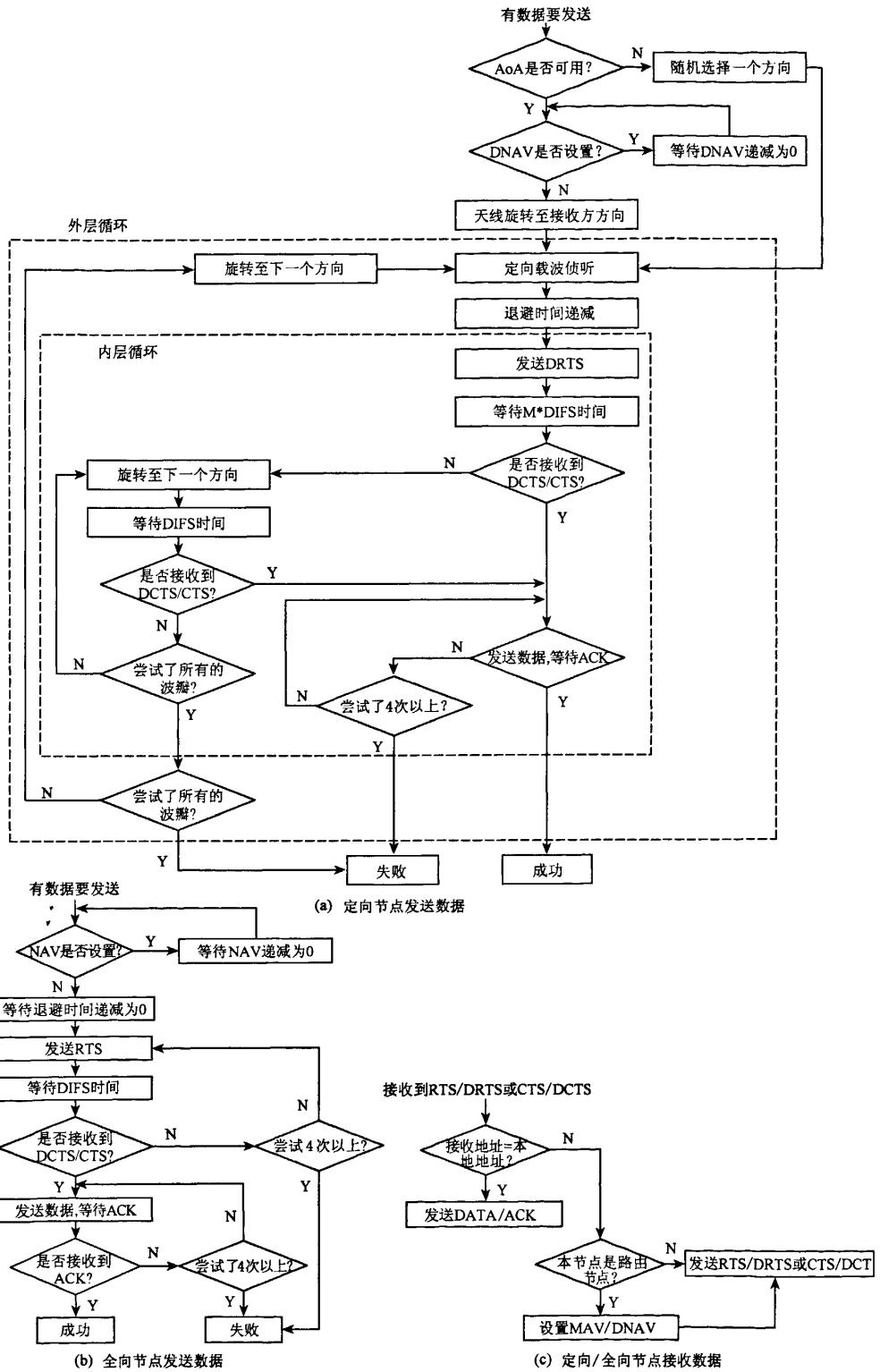


图 4 MAC 协议的控制流程

### 1) 天线瓣数的影响

该组实验中,节点数为10,全向节点与定向节点的比例为 $n_1 : n_2 = 1 : 1$ .定向节点的瓣数从1变化到8.图5(a)显示:在全向模式下,定向MAC的性能都较差.随着瓣数的增加DMAC的吞吐量逐渐趋于平稳,MMAC,Circular-MAC和NCDMAC的吞吐量则明显增加,NCDMAC的吞吐量最大.这表明NCDMAC比MMAC和Circular-MAC得到更好的网络性能.图5(b)显示:NCDMAC的时延会随着瓣数的增加急剧上升,并超过另外3种协议.这是因为随着瓣数的增加,天线旋转一周的时间增长,嵌套的循环则成倍延长了握手时间.

### 2) 网络节点密度的影响

在本组实验中,节点数从0增加到28,每次增加4个节点, $n_1 : n_2$ 比例保持为1:1,天线瓣数

为4.图5(c)显示:随着节点数的增加,各种协议的性能都有所提高,NCDMAC相较其他协议性能更优.图5(d)显示,DMAC的时延最少,这是因为在最坏情况下,MMAC需要多跳发送RTS,Circular-MAC需要旋转天线一周循环发送DRTS,而NCDMAC则需要旋转天线两周才可能接收到握手帧.

### 3) 定向节点与全向节点比例的影响

在该组实验中,节点总数保持12不变, $n_1 : n_2$ 以0:12,4:8,6:6,8:12和12:0变化,天线瓣数为4.图5(e)(f)表明定向节点数目越多,NCMAC的性能越好,但是时延也会急剧增加.NCMAC比其他协议更适合混合网络的特性需求.NCDMAC之所以比Circular-MAC能得到更大的吞吐量,是因为NCDMAC解决了Circular-MAC无法解决的新隐藏终端问题和“聋”问题.

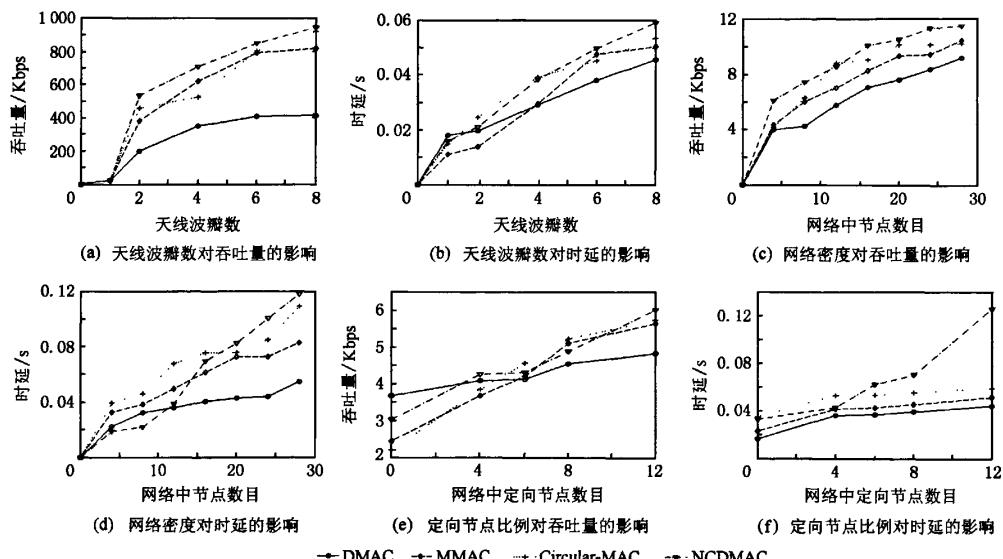


图5 实验结果

综上所述,NCDMAC能够解决非对称网络中通信失效、新的“聋”问题和隐藏终端问题,得到更好的网络性能,但是也带来了较大的通信时延,目前较适合于对吞吐量要求高而对时延要求低的网络.

## 5 结束语

本文针对Ad Hoc网络中天线增益不对称造成的通信失效、“聋”问题和隐藏终端问题,提出了一种嵌套循环定向MAC协议(NCDMAC).该协议采用多跳RTS/CTS、循环DRTS和嵌套的天线循环策

略有效地解决了通信失效问题,并在一定程度上解决了非对称环境下的隐藏终端问题和“聋”问题.虽然牺牲了部分节点的资源,增加了通信时延,但在总体上提高了网络的吞吐量.下一步的工作主要讨论移动性对网络性能的影响,并将功率控制作为考虑重点,从跨层优化的角度提高本协议的性能.

## 参 考 文 献

- [1] 陈林星,曹曦,曹毅.移动Ad Hoc网络——自组织分组无线网络技术.北京:电子工业出版社,2006

- [2] Lee W Y, Hong S E, Yong S K. Topology considerations on contention-based directional MAC simulation //IEEE 802. 11-09/0797r2, 2009
- [3] Wu Yihong, Zhang Lin, Wu Yiqun, et al. Interest dissemination with directional antennas for wireless sensor networks with mobile sinks //Proc of SenSys'06. 2006; 1-3
- [4] Wang Jianfeng, Zhai Hongqiang, Li Pan. Directional medium access control for ad hoc network. *Wireless Network*, 2008, 15(8): 1059-1073
- [5] Li Pan, Zhai Hongqiang, Fang Yuguang. SDMAC: Selectively directional MAC protocol for wireless mobile ad hoc networks. *Wireless Network*, 2007, 15(6): 805-820
- [6] Ko Y B, Shankarkumar V, Vaidya N H. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks //Proc of IEEE INFOCOM. 2000; 13-21
- [7] Takai M, Martin J, Ren A, et al. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks // Proc of ACM MobiHoc. New York: ACM, 2002: 183-193
- [8] Choudhury R R, Yang X, Ramanathan R, et al. On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas. *IEEE Trans on Mobile Computer*, 2006, 5(5): 477-490
- [9] Korakis T, Jakllari G, Tassiulas L. A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks //Proc of ACM MobiHoc. New York: ACM, 2003; 98-107
- [10] Xie Xu, Wang Furong, Li Kewei, et al. Improvement of multi-channel MAC protocol for dense VANET with directional antennas //Proc of WCNC 2009. 2009; 5-8
- [11] Zhao Liqiang, Zhang Hailin, Liu Yi. A MAC protocol to support hybrid antennas in a wireless LAN. *Journal of Electronics*, 2007, 24(3)
- [12] 柯志亨, 程荣祥, 邓德隽. NS2 仿真实验——多媒体和无线网络通信. 北京: 电子工业出版社, 2009

丁艳荣 女,1987 年生,硕士研究生,主要研究方向为无线自组网、定向 MAC 协议.

王晓东 男,1973 年生,博士,副研究员,主要研究方向为无线网络、移动计算.

沈虎 男,1986 年生,硕士研究生,主要研究方向为车载网络.

郭鹏宇 男,1985 年生,硕士研究生,主要研究方向为计算机软件与理论.

## 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>