

文章编号:1001-9081(2007)06-1306-04

## 使用定向天线的骨干无线网络网络容量研究

黄丽莹, 韦 岗, 姜胜明

(华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510641)

(huangly@126.com)

**摘 要:** 定向天线能够提高无线网络网络(WMN)的空间复用率, 因而影响了 WMN 的容量。虽然目前许多文献已经提出使用定向天线的介质访问控制方案、路由协议和拓扑控制方法去提高 WMN 的性能, 但是在理论上研究配置定向天线的 WMN 的容量仍然是必要的。用渐进的分析方法对使用定向天线的骨干 WMN 的容量进行了研究, 分析了定向天线对容量的影响, 并推导出网格路由器平均吞吐量上限。结果表明在接入点数量达到一定的门限时, 定向天线的使用有效地增大了网络的容量。

**关键词:** 定向天线; 无线网络网络; 容量; 吞吐量; 骨干

**中图分类号:** TP393.02 **文献标识码:** A

## Capacity of a backbone wireless mesh network using directional antennas

HUANG Li-ying, WEI Gang, JIANG Sheng-ming

(School of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou Guangdong 510641, China)

**Abstract:** Directional antennas can improve spatial reuse of Wireless Mesh Networks (WMNs) and affect the capacity of WMNs. Although some medium access control schemes, routing protocols and topology control methods of directional antennas have been recently proposed to improve the performance of WMN, it is still a need to analyze the capacity of WMNs deployed with directional antennas. This paper studied the capacity of a large backbone WMN using directional antennas by asymptotic analysis methods, investigated the effect of directional antennas on capacity and derived the upper bound of the per-router throughput. The results show that when the number of access points increases to some threshold, using directional antennas will improve the capacity of WMNs.

**Key words:** directional antennas; Wireless Mesh Networks (WMN); capacity; throughput; backbone

### 0 引言

无线网络网络(Wireless Mesh Networks, WMN)是无线 Ad hoc 一种特殊的网络形态, 是下一代无线宽带网络的关键技术之一。它融合了无线局域网(WLAN)与 Ad hoc 网络的优点, 能够高容量在大区域内提供因特网宽带接入、无线局域网覆盖和客户连接。文献[1]将 WMN 分成三种类型: 骨干 WMN、客户 WMN 和混合 WMN。其中最重要的类型是骨干 WMN。在骨干 WMN 中, 所有的网格路由器形成动态自配置、自愈合连接的网格。

容量是骨干无线网络网络(WMN)的关键参数之一。并发传输的干扰将影响到容量。然而, 使用定向天线可以有效地减少干扰区间。与传统的全向天线不同, 定向天线能够仅在预期方向集中能量, 在竞争传输之间提供空间分离, 所以有可能进一步提高 WMN 的吞吐量。近来一些文献(例如文献[2~4])已经研究了配置定向天线的 WMN。然而这些文献集中在利用定向天线的优点去设计介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议、路由机制和拓扑控制方案, 以达到增大 WMN 的网络容量或提高其他性能的目的, 并没有对

容量的理论最大可能值进行分析。因此, 不考虑具体的技术和协议, 从理论的层次上研究使用定向天线的 WMN 所能获得的最大容量依然是必要的。

目前已经有文章研究 WMN 的容量, 但是均假定所有的节点都配置全向天线。虽然文献[5]的结果可以推广到包括定向天线的情形, 但是并没有做详细的研究。

与现有研究成果不同, 本文研究了配置定向天线的一般化骨干 WMN 的容量, 并分析了定向天线对容量的影响。骨干 WMN 由三层组成: 接入点(Access point, AP)、配置了定向天线的网格路由器、用户端。AP 和网格路由器组成 WMN 的骨干部分。该 WMN 不但可以作为因特网的宽带接入网, 而且还可以给内部的用户提供相互间的通信。我们给出了不考虑路由机制的条件下, 骨干 WMN 网格路由器平均吞吐量的渐进上限。结果证明在 AP 数量达到一定的门限时, 定向天线的使用有效地增大了网络的容量。

因为 WMN 是一种特殊的 Ad hoc 网络, 所以我们的研究借鉴了文献[6]中的部分分析方法。文献[6]研究全部节点都配置全向的网络容量, 并没有分析定向天线的使用对网络容量的影响。而且文献[6]的网络是一个封闭型的网络, 跟

收稿日期: 2006-12-27; 修订日期: 2007-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(60502041); 广东省自然科学基金博士启动基金资助项目(05300146)

作者简介: 黄丽莹(1977-), 女, 广东湛江人, 博士研究生, 主要研究方向: 无线网络网络; 韦岗(1963-), 男, 广西宾阳人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 通信理论、信号处理、通信网络等; 姜胜明(1965-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要研究方向: 计算机网络、无线网络网络、无线 Ad hoc 网络等。

外界网络没有通信。而骨干 WMN 作为因特网的无线接入网,通过 AP 与因特网通信,AP 可能成为瓶颈制约着网络容量。所以文献[6]中的方法和结果不能直接应用于骨干 WMN。我们根据骨干 WMN 的实际情况,对文献[6]的研究方法进行改进来分析网络路由器的平均吞吐量。

## 1 定向天线模型

我们考虑普通的定向天线模型(如图1所示)。假设图中的特定夹角  $\alpha$  代表天线主瓣,其增益参数为  $G_m$ ,而其他方向的增益为  $G_s$  ( $G_s < G_m$ )。与文献[7]类似,假设:1) 发射机和接收机主瓣的半径均为  $r$ ; 2) 发射模式的主瓣波束宽度为  $\alpha$ , 接收模式的主瓣波束宽度为  $\beta$ 。进一步定义发射机的旁瓣半径为  $s_\alpha r$  ( $s_\alpha < 1$ ), 接收机的旁瓣半径为  $s_\beta r$  ( $s_\beta < 1$ )。在我们的模型中,假设定向天线能够通过电子仪器将主瓣调到任意方向。

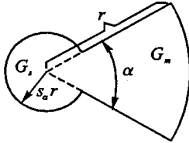


图1 定向天线模型

## 2 使用定向天线的骨干 WMN 的相关模型

### 2.1 网络模型

如图2所示,骨干 WMN 由三层组成:无线接入点(AP)、网络路由器和客户<sup>[8]</sup>。图中实线表示有线连接,虚线表示无线连接。AP 和网络路由器组成骨干部分。AP 通过有线连接接入因特网。所有的网络路由器形成动态自配置、自愈合连接的网格。网络路由器配置了定向天线,网络路由器之间的传输基于图1所示的定向天线。传统的用户可以通过以太网接口接到网络路由器。



图2 骨干无线网络网络

假设在一个单元面积圆内上随机分布  $m$  个网络路由器,任意分布  $k$  个 AP。假定每个路由器的传输范围相同。每个路由器能够在一个公共的无线信道上发送或者接收  $W$  比特/秒。网络路由器的主瓣传输半径均为  $r$ 。用  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 来表示一个路由器和它的位置。同时,假设每个 AP 能够为每次通信调整传输范围。每个 AP 拥有  $W$  比特/秒的无线信道容量,并能够与因特网以不低于  $W$  比特/秒速率进行有线通信。所有的 AP 和网络路由器仅仅作为中继转发数据,不产生任何数据量。并假定路由器和直接连接的用户间传输是使用其他的无线信道。在我们的模型中,网络路由器和用户间的通信、网络路由器之间的通信、网络路由器与 AP 之间的通信都是互

万方数据

不干扰的,并行的。

网络路由器要发送的通信量由两部分组成:一部分将被送到因特网,另一部分将被传到 WMN 中其他用户。前者通过其他网络路由器和 AP 共同作用传输到因特网;后者可以通过仅由路由器组成的 Ad hoc 网转发传输到目的地。

我们将网络路由器之间的传输分成  $s$  个正交信道,它们带宽分别为  $W_1, W_2, \dots, W_s$  比特/秒,从而:

$$\sum_{j=1}^s W_j = W \quad (1)$$

### 2.2 基于发送端的干扰模型

为了讨论网络路由器以 Ad hoc 模式的传输,我们采用了文献[7]中的基于发送端的干扰模型。在这个模型下,发送者为了避免发生在传输空间的重叠范围内的冲突,应该有间隔地分布。最简单的情形下,发送者和接收者都是配置全向天线的。假设网络路由器的传输半径均为  $r$ 。那么当满足  $|X_i - X_j| \geq 2(1 + \Delta)r$  (其中  $\Delta > 0$ ) 时,网络路由器  $X_i$  和  $X_j$  能同时在同一子信道上发送数据。 $\Delta > 0$  表示网络为了防止邻居节点在同一子信道上同时发送数据,设定了保护带。干扰模型如图3所示。

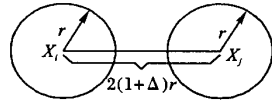


图3 基于发送端的干扰模型

## 3 网络路由器平均吞吐量的上限

### 3.1 同时成功传输的数量

引理1 在基于发送的干扰模型下,使用了定向天线的无线网络中,在任一特定子信道上能够同时成功传输的数量  $n_{sim}$  不超过:

$$\frac{1}{c_1 \pi g (1 + \Delta)^2 r^2}$$

在这里  $c_1$  是可以依实际设计要求所确定的常数,  $c_1 > 0$ , 同时  $c_1$  与  $\Delta$  和  $m$  独立,并且有:

$$g = \min(s_\alpha^2, s_\beta^2) + \frac{\max(\alpha, \beta)}{2\pi} |s_\alpha^2 - s_\beta^2| + \frac{\alpha\beta}{4\pi^2} (1 - \max(s_\alpha^2, s_\beta^2)) \quad (2)$$

证明: 首先,考虑  $\alpha > \beta$ , 即  $s_\alpha < s_\beta$ 。考虑到保护区域,干扰的范围为:

$$\begin{aligned} A_d &= \pi(1 + \Delta)^2 s_\alpha^2 r^2 + \frac{\alpha}{2\pi} \pi(1 + \Delta)^2 (1 - s_\alpha^2) r^2 \cdot \\ &\quad \left( \frac{s_\beta^2 - s_\alpha^2}{1 - s_\alpha^2} + \frac{1 - s_\beta^2}{1 - s_\alpha^2} \cdot \frac{\beta}{2\pi} \right) \\ &= \pi(1 + \Delta)^2 r^2 \left( s_\alpha^2 + \frac{\alpha}{2\pi} (s_\beta^2 - s_\alpha^2) + \frac{\alpha\beta}{4\pi} (1 - s_\beta^2) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

接着,考虑  $\alpha < \beta$ , 即  $s_\alpha > s_\beta$ 。类似,干扰的范围为:

$$A_d = \pi(1 + \Delta)^2 r^2 \left( s_\beta^2 + \frac{\beta}{2\pi} (s_\alpha^2 - s_\beta^2) + \frac{\alpha\beta}{4\pi} (1 - s_\alpha^2) \right) \quad (4)$$

我们将(3)和(4)统一为:

$$A_d = \pi(1 + \Delta)^2 r^2 \left( \min(s_\alpha^2, s_\beta^2) + \frac{\max(\alpha, \beta)}{2\pi} |s_\alpha^2 - s_\beta^2| + \right.$$

$$\frac{\alpha\beta}{4\pi^2}(1 - \max(s_\alpha^2, s_\beta^2)) \quad (5)$$

所以网络能够在任一个特定子信道上同时成功传输的数量  $n_{sim}$  不超过  $1/(c_1 A_d)$ , 由此我们证明了引理 1。

事实上, 使用全向天线 ( $s_\alpha = s_\beta = 1, g = 1$ ) 的无线网络也适合引理 1。

### 3.2 网格路由器平均吞吐量的上限的推导

为了让公式表达更加简洁, 我们将讨论每个路由器能够成功传输到目的地的吞吐量。

**定义** 在骨干 WMN 中, 如果在 AP 和网格路由器的分布规则、传输的空间和时间调度、中继节点缓存的共同作用下, 每个网格路由器能够成功发送  $\lambda(m, k)$  比特/秒的数据量到 AP 或目的网格路由器, 则  $\lambda(m, k)$  的最大可能值定义为网格路由器的平均吞吐量。

假设从用户到因特网和从因特网到用户的通信量相同。根据定义, 任一路由器 (例如  $X_i$ ) 需要发送  $\lambda$  特/秒的数据, 假设  $\lambda p_i(t)$  比特/秒 ( $0 \leq p_i \leq 1, i = 1, \dots, m$ ) 需要被送到因特网, 余下的  $\lambda(1 - p_i(t))$  比特/秒要传给骨干 WMN 的用户。在时间区间  $[0, T]$  内, 定义  $\bar{p}_i = \int_0^T p_i(t) dt / mT$ 。在本文中, 我们研究的是骨干无线网络是一个大规模的网络, 至少有一个节点有发往因特网的业务量。在时间区间  $[0, T]$  内, 定义  $\bar{p} = \sum_{i=1}^m \int_0^T p_i(t) dt / (mT)$ , 则  $0 < \bar{p} \leq 1$ 。

**定理 1** 当骨干无线网络使用了定向天线时, 网格路由器平均吞吐量  $\lambda(m, k)$  满足<sup>[10]</sup>:

$$\lambda(m, k) = \begin{cases} O\left(\frac{kW}{m}\right), & \text{If } k(m) = O\left(\sqrt{\frac{m}{\log m}}\right) \\ O\left(\frac{W}{g \sqrt{m \log m}}\right), & \text{If } k(m) = \Omega\left(\sqrt{\frac{m}{\log m}}\right) \end{cases}$$

其中:

$$g = \min(s_\alpha^2, s_\beta^2) + \frac{\max(\alpha, \beta)}{2\pi} |s_\alpha^2 - s_\beta^2| + \frac{\alpha\beta}{4\pi^2}(1 - \max(s_\alpha^2, s_\beta^2))$$

**证明:** 为了使证明简单化, 假设传输都被分成时间长度为  $\tau$  的同步时隙。因此, 在时间  $T$  内有  $\lceil T/\tau \rceil$  个时隙。

因为所有用户发往因特网的业务量不应超过从路由器往 AP 的上行链路能处理的业务量总和, 又因为从 AP 往网格路由器的下行链路需要和上行链路预留同样的带宽, 所以:

$$\sum_{i=1}^m \lambda p_i \leq \frac{1}{2} kW \quad (6)$$

即:

$$m \lambda \bar{p} \leq \frac{1}{2} kW \quad (7)$$

从而:

$$\lambda \leq \frac{kW}{2m\bar{p}} \quad (8)$$

假设路由器  $X_i$  在时隙  $t$  通过上行链路发送  $\mu_i(t) kW \tau$  比特/秒通信量给 AP。令  $n = \lceil T/\tau \rceil$  和:

$$\bar{\mu}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^n \mu_i(t) \tau \quad (9)$$

$\bar{\mu}_i$  满足以下限制:

万方数据

$$\bar{\mu}_i kW \leq \lambda, \sum_{i=1}^m \bar{\mu}_i kW \leq m \lambda \bar{p}, \sum_{i=1}^m \bar{\mu}_i \leq \frac{1}{2} \quad (10)$$

在时间区间  $[0, T]$  内, 从网格路由器  $i$  以 Ad hoc 模式发送给目标网格路由器的总比特数  $N_i$  为:

$$N_i = \lambda T - \sum_{t=1}^n \mu_i(t) kW \tau \quad (11)$$

根据引理 1, 在 Ad hoc 模式下, 在上一个特定的子信道上同时成功的传输数目  $n_{sim}$  为:

$$n_{sim} \leq \frac{1}{c_1 \pi g (1 + \Delta)^2 r^2} \quad (12)$$

定义  $N_i$  的平均传输距离为  $\bar{l}_i$  (如果  $N_i = 0, \bar{l}_i = 0$ ), 则  $N_i$  的平均传输跳数为  $\bar{l}_i / r$ 。这样, 在时间区间  $[0, T]$  内:

$$\sum_{i=1}^m N_i \frac{\bar{l}_i}{r} \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n n_{sim} W_j \tau \quad (13)$$

如果  $N_i > 0$ , 则  $\bar{l}_i$  不超过  $l_i$  ( $l_i$  是从网格路由器  $X_i$  到目标网格路由器的最短路径)。并综合 (1)、(12) 和 (13), 得到:

$$\frac{1}{T} \sum_{i=1}^m N_i l_i \leq \frac{W}{c_1 \pi g (1 + \Delta)^2 r} \quad (14)$$

将 (12)、(13) 代入 (14), 得到:

$$\lambda \leq \frac{kW \sum_{i=1}^m \bar{\mu}_i l_i + \frac{W}{c_1 \pi g (1 + \Delta)^2 r}}{\sum_{i=1}^m l_i} \quad (15)$$

当  $\bar{\mu}_i$  的最大值和  $l_i$  的最大值关联时, 能够得到  $\lambda$  的最大值。联合 (7)、(10) 和 (15), 当  $\bar{\mu}_i$  如下分配时,  $\lambda$  将取得最大值:

$$\bar{\mu}_{\pi(i)} = \begin{cases} \frac{\lambda}{kW}, & i = 1, \dots, \lceil m\bar{p} \rceil \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (16)$$

在这里,  $\pi(i)$  满足 ( $l_{\pi(1)} \geq l_{\pi(2)} \geq \dots \geq l_{\pi(m)}$ )。

所以:

$$\lambda \leq \frac{W}{c_1 \pi g (1 + \Delta)^2 r \sum_{i=1}^m l_i - m\bar{p}} \quad (17)$$

因为任一网格路由器  $i, l_i \Theta(1)$ , 所以对于  $m \rightarrow \infty$ ,

$\sum_{i=1}^m l_i \Theta m$ , 所以  $\lambda$  必须满足:

$$\lambda \leq \frac{W}{c_2 \pi g (1 + \Delta)^2 m r} \quad (18)$$

其中  $c_2$  为与  $\Delta$  和  $m$  独立常数, 同时  $c_2 > 0$ 。

综合 (8) 和 (18), 得到:

$$\lambda \leq \min\left(\frac{kW}{2m\bar{p}}, \frac{W}{c_2 \pi g (1 + \Delta)^2 m r}\right) \quad (19)$$

另外, 根据文献 [9] 中的推论 5.1, 为了保证网络能够以高概率保证 Ad hoc 连接, 网格路由器的传输半径  $r$  必须满足:

$$r > \sqrt{\frac{\log m}{\pi m}} \quad (20)$$

将 (2)、(20) 代入不等式 (19), 得到如定理 1 中陈述的网格路由器平均吞吐量的渐近上限。

## 4 结语

本文研究了使用定向天线的大型骨干无线网络的容

量,并分析了定向天线,接入点和网格路由器的数量、带宽对网格路由器平均吞吐量的影响,并给出了网格路由器平均吞吐量的渐近上限。本文的结论可用于骨干 WMN 的规划设计,以及指导 MAC 和路由协议的设计。

从定理 1 可以看出,当  $k$  较小( $O(\sqrt{m/\log m})$ )时,网格路由器平均吞吐量上限正比于无线带宽及接入点数量,反比于网格路由器数量。AP 如瓶颈限制着吞吐量。增加无线带宽和 AP 的数量有助于增大网格路由器平均吞吐量。此时配置定向天线对提高平均吞吐量作用不大。

当  $k$  增大到超过一定的门限( $\Omega(\sqrt{m/\log m})$ )时,网格路由器平均吞吐量上限依赖于无线带宽和网格路由器的数量及使用的天线,增加 AP 的数量不能继续提高网格路由器平均吞吐量。因为定向天线模型中,公式(2)中的  $g < 1$ ,所以与配置全向天线的同结构的骨干 WMN 相比,配置定向天线后,网格路由器平均吞吐量能够提高  $1/g$  倍。此时,定向天线的使用有效地增大了网络的容量。

参考文献:

[1] AKYILDIZ IF, WANG X. A Survey on Wireless Mesh Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 42(9): S23 - S30.  
[2] KUMAR U, GUPTA H, DAS SR. A Topology Control Approach to Using Directional Antennas in Wireless Mesh Networks[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Istahbul Turkey, 11 - 15 June. IEEE press, 2006, 9: 4083 - 4088.  
[3] DAS SM, PUCHA H, KOUTSONIKOLAS D, et al. DMesh: Incorporating Practical Directional Antennas in Multichannel Wireless Mesh Networks[J]. IEEE journal on Selected Areas in Communica-

tions, 2006, 24(11): 2028 - 2039  
[4] STINE JA. Exploiting Smart Antennas in Wireless Mesh Networks Using Contention Access [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(2): 38 - 49.  
[5] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the Capacity Region in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks[A]. Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Cologne Germany, ACM Press, 2005. 71 - 87.  
[6] ZEMLIANOV A, DE VECIANA G. Capacity of Ad Hoc Wireless Networks with Infrastructure Support[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(23): 657 - 667.  
[7] YI S, PEI 裴, KALYANARAMAN S. On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas[A]. Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Annapolis Maryland USA, ACM Press, 2003. 108 - 116.  
[8] 傲丹,方旭明,马忠建.无线网络网络关键技术及其应用[J].电讯技术,2005,(2):16 - 22.  
[9] GUPTA P, KUNAR PR. The Capacity of Wireless Netwoks[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000, 46(2): 388 - 404.  
[10] KYASANUR P, VAIDYA NH. Capacity of Multi-channel Wireless Networks: Impact of Number of Channels and Interfaces[A]. Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Cologne Germany, ACM Press, 2005. 43 - 57.

(上接第 1305 页)

模拟运行本文方法以验证其有效性。模拟时设  $e$  为 5%,  $C$  为 2,  $P$  为 4。

表 2 实际网络路径最小时延测量实验结果

路径 编号	路径长度 (跳)	最小时延(ms)		测量误差 (%)	探测 包数
		实际值	测量值		
PATH1	9	58	59.4	2.4	148
PATH2	13	89	91.2	2.5	148
PATH3	16	164	165.7	1.0	222
PATH4	21	175	177.3	1.3	296

表 2 列出了路径 PATH1 ~ PATH4 的路径长度、实际的最小时延(整个时延样本集的最小值)、本文方法测量到的最小时延、测量误差及所花费的探测包数(多次测量后取平均)。由表 2 可知,对于或长或短的端到端路径,本文方法都能以较小的测量开销获得较准确的最小时延测量结果。

4 结语

目前许多需要感知距离和感知位置的网络服务都根据路径最小时延来估计距离或位置,但它们大多是以自定的方法来测量发现最小时延。为避免这些应用大规模使用时产生过多不必要的探测包数量,通过仿真分析,本文定量研究了不同路径长度下,测量端到端路径最小时延所需要发送的探测包数;以此为基础,本文设计了基于仿真分析的最小时延测量方法。实际网络实验表明该方法能以较小的测量开销获得较准

确的测量结果,故可以较广泛地应用于需要测量路径最小时延的网络应用中。

参考文献:

[1] RATNASAMY S, FRANCIS P, HANDLEY M, et al. A Scalable Content-Addressable Network[A]. Proc. of ACM SIGCOMM'01 [C]. August 2001.  
[2] FRANCIS P. IDMaps: A Global Internet Host Distance Estimation Service[J]. IEEE / ACM Transactions on Networking, 2001, 9(5).  
[3] DOWNEY AB. Using pathchar to estimate Internet link characteristics[A]. In Proc. of SIGCOMM'99[C]. Cambridge, United States, 1999. 241 - 250.  
[4] PAPAGIANNAKI I, MOON S, FRALEIGH C, et al. Analysis of Measured Single-hop Delay From An Operational Backbone Network [A]. Proc. of IEEE INFOCOM'02[C]. June 2002.  
[5] BOLOT J-C. Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet[A]. Proc. of ACM SIGCOMM'93[C]. 1993. 289 - 298.  
[6] THOMPSON K, MILLER GJ, WILDER R. Wide-area internet traffic patterns and characteristics[A]. IEEE Network[C]. 1997. 10 - 23.  
[7] TAQQU MS, WILLINGER W, SHERMAN R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling[J]. ACM/SIGCOMM Computer Communications Review, 1997, 27(2): 5 - 23.  
[8] PAXSON V. End - to - End Routing Behavior in the Internet [ J ]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1997, 5(5): 601 - 615.

## 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,一直致力和专注于微波、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>