

# 定向天线的 Ad hoc 网络邻居发现

蔡浩, 刘勃, 归琳

(上海交通大学电子工程系, 上海 200240)

**[摘要]** 在 Ad hoc 网络中邻居节点发现 (Neighbor Discovery) 是网络初始化中的重要步骤之一, 节点邻居的信息对于几乎所有的链路选择和路由算法都有着重要的影响, 特别是在采用方向性天线时邻居发现不仅难度更大而且其影响作用也更明显。通过分析在采用方向性天线时的 Ad hoc 网络中的邻居发现算法, 总结出了其一般步骤, 即首先通过判断网络规模来进行天线收发模式选择算法和扫描图案的选择, 然后再设计相应的通信握手协议。

**[关键词]** Ad hoc 网络; 方向性天线; 邻居发现

**[中图分类号]** TP311

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1009-8054(2011)09-0063-04

## Neighbor Discovery in Ad hoc Network using Directional Antennas

CAI Hao, LIU Bo, GUI Lin

(Electronic Engineering Dept., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**[Abstract]** Neighbor Discovery in Ad hoc network is a crucial step in network initialization. The knowledge of a node's neighbors is essential for almost all link selection, routing algorithms and so on, particularly the neighbor discovery using directional antennas, which is more challenging and plays a more important role. This paper analyzes neighbor discovery algorithm in Ad hoc network using directional antennas and proposes general steps in implementing the neighbor discovery algorithm.

**[Keywords]** Ad hoc network; directional antennas; neighbor discovery

## 0 引言

邻居节点发现是 Ad hoc 网络组网的基础和前提<sup>[1-2]</sup>, 特别是在基于定向天线的通信网络中, 是 MAC 层相关设计首先需要考虑的内容。邻居节点发现是指每个节点开机后, 在没有邻节点先验信息的条件下, 通过基于一定的互盲或自盲算法协议迅速找到其通信覆盖范围内的所有其他节点 (同时被其他节点所发现), 并建立基本通信连接的过程。

邻居节点的信息对于现有的绝大部分 MAC 协议, 路由算法<sup>[3-4]</sup>以及网络拓扑控制算法<sup>[5-6]</sup>都有着不可或缺的作用, 因此邻居节点发现是一个无线网络自组织过程中的关键性第一步。邻居节点发现算法在使用定向天线和全向天线不同选择的情况下, 需要解决的问题也不相同, 而且, 其算法的优劣直接影响节点通信距离、网络建立时间等性能。文中在根据已有扫描算

法的基础上<sup>[7-9]</sup>, 分析了在采用方向性天线时 Ad hoc 网络中的邻居发现算法的特点, 并总结出其一般步骤。

## 1 方向性天线

在全向天线系统中, 由于每个节点均独立决定发送信号以扫描其邻近节点分布情况时, 其覆盖范围内的邻居节点必定都能收到信号, 因此, 邻居节点发现的主要工作在于解决扫描握手协议如何尽量减少冲突, 以高效利用传输资源。

在采用定向天线的无线网络中, “必定”的条件并不存在, 节点之间的正常通信 / 碰撞需要满足的条件从传统的时域不重叠 / 重叠, 提升为同时满足时域 + 空域上的相应条件, 所有的发送和接收必须有的放矢 (这个“的”包括同时对准时隙和方向, 即满足时域 / 空域重叠), 否则就会是无效通信。

图 1 中, 两个节点在某时刻的天线方向图相对, 同时收、发模式相反, 才能形成一次有效通信。可见, 在方向性天线网络中, 信道资源被刻画成二维形式——时隙和天线方向, 针对多波束切换天线阵来说, 信道资源可以表达为  $(T(n), D(m))$ , 其中  $T(n)$  表示第  $n$  个时隙,  $D(m)$  表示第  $m$  个天线单元。邻居节点发现的过程就是要确定任意邻居节点 (设为节点  $i$ ) 的  $D_i(m)$ , 完成对系统空间资源的分配, 并在此基础上通过时隙调度分配算法确定两节点之间的  $(T(n), D(m))$  配对。

收稿日期: 2011-04-22

作者简介: 蔡浩, 1988 年生, 男, 上海交通大学电子系, 硕士, 研究方向: 无线网络 MAC 层协议设计和路由技术; 刘勃, 1983 年生, 男, 上海交通大学电子系, 助理研究员, 研究方向: 视频处理与无线通信; 归琳, 1975 年生, 女, 上海交通大学电子系, 副教授, 研究方向: 结合视频处理与无线通信的宽带无线视频通信。

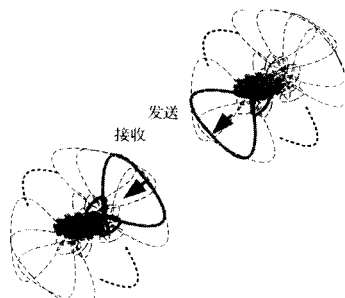


图1 定向天线网络节点有效通信条件

## 2 邻居节点发现算法

在采用定向天线的系统中,需要考虑的内容要比传统的全向天线多,具体包括:天线收发模式选择算法设计、扫描图案的设计以及扫描握手协议设计,尤其是前两者,它们之间还存在着互相约束的关系,需要统筹考虑。

### 2.1 天线收发模式选择

在全向天线 Ad hoc 网络中,多采用竞争类 MAC 协议,以 802.11CSMA/CA 为例,节点缺省处于接收(监听)状态,当节点需要占用覆盖范围内所有传输媒介资源进行信息发送时,节点首先确定当前传输媒介空闲,并通过 RTS-CTS-DATA-ACK 的流程进行传输媒介的预约、预约确认、通信、释放的过程,其天线的收、发模式变换(转换)是确定的。而在基于定向天线阵的 Ad hoc 网络中,MAC 协议主要表现为无中心混合式预约协议。考虑邻节点发现时,收发模式或扫描方向没有对好时,将导致永远无法建立握手,出现近在咫尺却难以发现的问题。参见图 1 所示,两个通信节点只有当定向天线指向相对,且一个处于发状态,另一个处于收状态时才能发生有效通信,对于在某时刻收、发模式的选择是一个完全分布式的算法,即各节点根据某种规则自行决定某时刻天线是处于发状态还是收状态。该算法结合扫描图案算法将决定某次有效通信成功的统计特性,进而直接影响邻接点发现的最终指标:邻接点发现时间。目前,在结合定向天线阵的使用中,主要包括两类算法:

#### (1) 本地节点 ID 号和权重确定收发模式

该算法中,事先对网络中每个节点进行唯一性编号,假设总节点数量是  $N$ ,每一个节点都有一个编号  $j$ (用二进制表示,比如  $j=3$ ,就表示为 0011)。对于一个节点  $j$ ,在它的第  $i$  次扫描/接收(由于所有节点同步,此时所有的节点都处于扫描或接收状态)时,如果它的二进制编号的第  $i$  位是 0,那么它就选择接收模式;如果第  $i$  位是 1,就选择扫描模式。根据这个扫描/接收的方法,可以得出以下两个结论:

- ① 在第 1 次扫描/接收中,一个节点有可能发现一半接点(如果都在可广播得到的范围内)。
- ② 由于两个节点至少有一位不同,所以两个节点最多需要

$\log_2 N$  次扫描/接收(在可广播的范围内),也就是说,如果要扫描到整个半球或球面有  $L$  个天线方向,在  $\log_2 N \times L$  次扫描/接收后,每个节点能发现所有邻居节点。这种算法的优点是能够保证所有节点遍历,不存在孤立节点,可靠性较高,但节点发现时隙数较大,时延性能较差。

#### (2) 根据收发概率 $\gamma$ 确定收发模式

在扫描过程中,节点根据固定或可变概率  $\gamma$  决定此次通信模式为收还是发,采取该算法时,可以采用概率论方法对其性能进行解析分析,该算法时延性较好,但存在孤立节点的可能,可靠性不如前一种算法。

上述两种算法各有优缺点,第一种算法可靠性高,第二种算法时延性好。在实际应用中,可以根据系统对上述两个指标的要求做出选择,或者对两种算法进行结合,以达到系统可靠性和时延的平衡。

### 2.2 扫描图案选择

在基于全向天线的 Ad hoc 网络中,节点收发都是球状覆盖,因此不存在所谓的“扫描”问题。而在采用基于定向天线阵的 Ad hoc 网络中,为了发现本节点覆盖范围内的所有邻居节点,本节点必须用方向性天线单元以某种方式对自己的覆盖区进行空间“扫描”。扫描的过程也就是在天线阵中不断切换当前所用天线单元的过程,这种切换的顺序和方法,也就是“扫描图案”。

因此,从某种程度上说,扫描过程是针对单个定向天线单元在空间上的局限性而采取的“时间换空间”过程。如果不对扫描图案进行特殊的设计,那么最简单的扫描图案设计就是随机扫描。此时,相应扫描图案的性能就成为一个概率论的问题。容易理解的是,从概率上计算,定向天线阵建立链路和通信成功的概率比全向天线阵概率要小得多,全向天线阵建立链路和通信成功的概率主要考虑碰撞带来的影响,定向天线阵则需要满足前述的天线方向和收发模式的匹配。在一个基于定向天线阵的 Ad hoc 网络中,如果一个节点的定向天线单元的主瓣宽度为  $\alpha$ ,假设节点  $i$  有  $N$  个邻居节点,节点  $i$  能与节点  $j$  产生连接的要求为:

- ① 节点  $i$  朝着节点  $j$  所在的方向进行广播。
- ② 节点  $j$  处于接听模式。
- ③ 其他的  $N-1$  个节点中的任意一个节点没有干扰节点  $i$  与节点  $j$  的通信。

由此可见,在随机扫描的情况下,相比全向天线网络,基于定向天线的 Ad hoc 网络成功建立链路和发生有效通信的概率相当低。而对于网络中给定的节点来说,发现所有  $N$  个邻居节点的时隙数(可以直接折算为节点发现时间)与上述成功建立链路和发生有效通信的概率成反比,也就是说,在这种随机扫描的情况下,相应邻居节点发现所需的时间也会很长。基于随机扫描图案的算法是最简单直接的算法,但是效率也很低。在实际

系统中, 需要考虑孤立节点的问题和方向天线阵部分交叠覆盖的影响, 可以考虑通过以下算法得到快速、可靠的扫描图案。

### 2.2.1 模式选择的顺 / 逆时针扫描算法

节点在扫描过程中, 通过顺 / 逆时针依次选择天线单元进行扫描。该算法结合天线收发模式选择的“根据本地节点 ID 号和权重的确定算法”时, 可以保证所有空间都扫描到, 而且无孤立节点, 缺点是扫描时间较长, 且未利用方向天线阵部分交叠覆盖的优势。图 2 所示为全体节点根据模式选择的顺 (逆) 时针同向扫描方法, 若该时隙为第  $i$  次扫描, 则选择编号为  $i$  的天线方向为天线的扫描方向, 如果, 则将选择天线的扫描方向的编号为  $i$  整除  $M$  的余数, 在图 2 中, 当前时隙所有节点都选择天线方向编号为 5 的方向进行扫描, 在前面的时隙中依次选择为 1, 2, 3, 4。

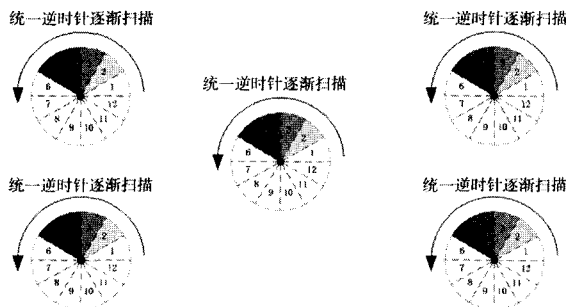


图 2 逆时针扫描算法

### 2.2.2 伪随机序列的随机扫描算法

该算法是随机扫描图案算法的实现特例, 在每个扫描时隙, 随机选择天线单元进行扫描。该算法扫描时间性能较好, 缺点是存在孤立节点, 且未利用方向天线阵部分交叠覆盖的优势。图 3 是单一节点根据伪随机序列的随机扫描方法, 若该时隙为第  $i$  次扫描 (第  $i$  个时隙), 则根据生成的伪随机序列  $S_N = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\}$  中的元素  $S_i$ , 选择大小为  $S_i$  的编号的天线方向为其扫描方向, 如果  $i > M$ , 则计算出  $i$  整除  $M$  的余数  $k$ , 选择大小为  $S_k$  的编号的天线方向为其扫描方向。

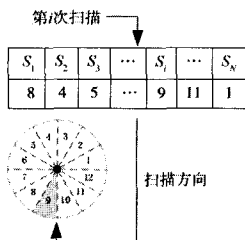


图 3 伪随机序列的随机扫描算法

### 2.2.3 大步进顺 (逆) 时针复合扫描算法

节点在扫描过程中, 通过顺 / 逆时针大步进选择天线单元进行扫描, 由于天线单元之间存在交叠覆盖, 因此这种大步进的方法可以在尽量短的时间内扫描到尽量大的空间, 结合“随机天线收发模式”, 可以达到较好的性能, 由于该算法解析分

析比较困难, 需要通过仿真进行深入研究和比较。图 4 所示为节点大步进顺 (逆) 时针复合扫描方法, 在  $[0, N-1]$  区间中随机生成一个整数  $T$ , 假设上个时隙扫描方向编号为  $T'$ , 计算出  $T+T'$  的大小, 如果  $T+T' \leq N$ , 则选择本次天线的扫描方向为编号等于  $T+T'$  的天线方向, 如果  $T+T' \geq N$ , 则选择本次天线的扫描方向为编号等于  $T+T'$  整除  $N$  的余数。如果为节点的单一第一个时隙的扫描, 上个时隙扫描方向编号为  $T=0$ 。在图 4 中, 上一次扫描的方向为 2, 本时隙上生成的随机步长为 2, 那么本次的扫描方向为 4。

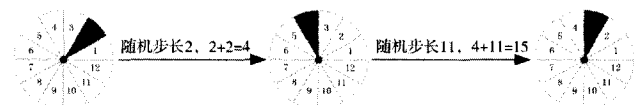


图 4 大步进顺 (逆) 时针复合扫描算法

### 2.3 握手协议

前述的天线收发模式设计和扫描图案设计的目的在于, 使邻居节点之间能够在分布式互盲的情况下, 尽快和可靠地实现首次成功通信方向性对接 (获得空间的收发对应关系)。在首次成功通信之后, 初步得到该邻居节点的位置资源信息, 需要设计有效的握手协议来确定该节点的  $D(m)$  信息, 也就是相应空间资源 (天线单元) 的分配情况, 为后续进一步的时隙调度 (时间资源) 分配提供基础。在网络中一个节点发送广播信号, 另一个处于接收模式的节点接收到后, 必须马上发送确认信号, 构成握手协议, 确定邻居节点的  $D(m)$  资源信息。由于基于的是方向性天线的通信, 因为空域方向角的指向概率, 更加剧了因无线链路不可靠的中断可能, 扫描过程中由于链路的复杂性和天线单元无法做到非主瓣方向完全无增益, 因此可能出现  $D(m)$  信息失误, 比如距离很近的两个节点即使天线并未相对但发生了有效通信。因而需要研究握手协议算法来克服外界干扰, 保证扫描过程的可靠性。

#### 2.3.1 基于 GPS 位置信息的握手算法

在首次成功通信后, 邻居节点在握手信息中包含自身 GPS 位置信息, 扫描节点通过该信息判断  $D(m)$  信息是否失误, 如失误可以将该次扫描置为无效, 避免得到错误的  $D(m)$  信息。该算法优点是可靠性高, 缺点是需要通过外部定位系统的帮助, 独立性差。

#### 2.3.2 基于邻方向接收电平的握手算法

在首次成功通信后, 邻居节点在握手信息中包含本天线单元以及邻居两个天线单元的接收电平信息, 扫描节点通过该信息判断  $D(m)$  信息是否失误, 如失误可以将该次扫描置为无效, 避免得到错误的  $D(m)$  信息。该算法优点是可靠性高, 不需要外部系统辅助, 缺点是需要对每个天线单元增加实时功率检测和处理, 复杂度高。

最后, 邻居节点发现算法的设计需要上述 3 部分配合完成。

第一部分是天线模式的选择,第二部分是天线收发模式和天线扫描方式的确定,第三部分是握手协议的设计。通过这3个部分的综合考虑,在保证系统性能和可靠性的基础上,使算法能够支持节点间的通信距离尽量大,发现所有邻居节点的时隙数尽量小,占用系统网络链路开销尽量少。

### 3 算法具体步骤

把通信的时间划分为一个个时隙,在每个通信时隙中,方向性天线 Ad hoc 网络中的节点天线收发模式选择方法以及节点天线扫描图案选择方法包括如下步骤:

① 对可能进入网络中的每个节点进行一个唯一的二进制编号  $j$  (用二进制表示,比如  $j=3$ ,就表示为 0011)。

② 每个节点配备同样的天线装置,确定其天线的波瓣主瓣角的大小  $B$ 。

③ 根据②得到的天线的波瓣主瓣角的大小  $B$ ,明确天线的扫描方向数  $N = \frac{2\pi}{B}$ 。

④ 根据节点的方向数  $N$ ,统一将每个方向进行依次编号 1, 2, 3, ...,  $N$ 。

⑤ 根据节点的方向数  $N$ ,产生出伪随机序列  $S_N = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\}$ ,即将  $N$  个不同的天线方向编号生成一个进行伪随机排列的序列。

⑥ 节点进入网络前,需要预估网络的节点数目  $M$ 。

⑦ 节点进入网络后,在每个通信时隙上确定天线的收/发模式,模式状态保持整个时隙;在网络节点数目不多的情况下,节点采用根据本地节点 ID 号确定收发模式;在网络节点数目较多的情况下,节点采用根据收发概率  $\gamma$  确定收发模式。

⑧ 确定出节点天线扫描图案选择方法。在网络节点数目不多的情况下,根据伪随机序列的随机扫描方法进行扫描;在网络节点数目较多的情况下,选择根据模式选择的顺(逆)时针同向扫描方法进行扫描或者选择大步进顺(逆)时针复合扫描方法进行扫描。

⑨ 节点根据相应的握手协议完成本时隙的扫描工作,进入下个时隙,重复工作,回到⑦。

### 4 结语

邻居节点发现是 Ad hoc 网络组网的基础和前提,节点邻居

的信息对于几乎所有的链路选择和路由算法等都有重要的影响。文中分析了当引入方向性天线后,由于信道资源引入了空间这一新的变量,使得邻居节点发现的难度变得更大,而且由于在使用方向性天线时节点必须相互对准天线的方向才能正常通信,这就使得节点发现变得更加重要。进一步分析了节点发现的3个重要方面的内容:天线收发模式选择算法设计、扫描图案的设计以及扫描握手协议设计。最后提出了基于方向性天线的 Ad hoc 网络邻居节点发现算法的一般步骤。

### 参考文献

- [1] ZHANG Z. DTRA: Directional Transmission and Reception Algorithms in WLANs with Directional Antennas for QoS Support[J]. IEEE Network, 2005, 19(3): 27-32.
- [2] JAKLLARI G, LUO W, KRISHNAMURTHY S. An Integrated Neighbor Discovery and MAC Protocol for Ad hoc Networks Using Directional Antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(3): 1014-1024.
- [3] MCGLYNN M, BORBASH S. Birthday Protocols for Low Energy Deployment and Flexible Neighbor Discovery in Ad hoc Wireless Networks[C]//Proc. ACM MOBIHOC. Long Beach, CA: ACM, 2001: 137-145.
- [4] 刘勇,陈剑波,齐开悦. Ad hoc 网络的安全机制[J]. 信息安全与通信保密, 2005(9): 66-69.
- [5] VASUDEVAN S, TOWSLEY D, GOECKEL D, et al. Neighbor Discovery in Wireless Networks and The Coupon Collectors Problem[C]. New York, USA: Mobicom, 2009: 181-192.
- [6] 安红章,谢上明. 移动 Ad Hoc 网络 MAC 协议综述[J]. 信息安全与通信保密, 2006(5): 112-115.
- [7] VASUDEVAN S, KUROSE J, TOWSLEY D. On Neighbor Discovery in Wireless Networks with Directional Antennas[C]//Proc. IEEE INFOCOM. NY, USA: IEEE, 2005: 2502-2512.
- [8] PARK J, CHO S, SANADIDI M Y. An Analytical Framework for Neighbor Discovery Strategies in Ad hoc Networks with Sectorized Antennas[J]. IEEE Communications Letters, 2009(13): 832-834.
- [9] 项丽,段哲民. 无线传感器网络中移动节点接入的实现[J]. 信息安全与通信保密, 2005(5): 56-58.

## Gigamon 为 NCSA 提供全面的网络可视性

8月4日,全球领先的数据接入网络解决方案创建者及提供商 Gigamon 得到美国国家超级计算应用中心(NCSA)的选用,为其“Blue Waters”项目提供强大的网络可视性产品。Gigamon 的智能数据接入网络技术将帮助研究人员大幅增强其网络基础架构的可扩展性和安全性,提高生产力并加快交付突破性研发成果的速度。NCSA 的 Blue Waters 计划旨在交付每秒能够处理 1 千万亿次运算的超级计算机,项目由美国国家超级计算应用中心、IBM 以及北美五大湖千万亿次计算协会联合开展,并得到了美国国家科学基金会的支持。

## 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>