

基于跨层协同设计的 Ad Hoc 按需定向路由算法^{*})

任 智 郭 伟 刘 军 蒋 艳

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘 要 采用跨层协同设计的思路和定向通信机制,对移动 Ad Hoc 网中的按需路由算法进行跨层优化,提出一种新的 Ad Hoc 按需定向路由算法:CAODR。通过定向天线的使用和网络、MAC 与物理三层之间的跨层协同,实现了定向单播和全向广播的发送方式,成功减少了隐藏终端造成的分组碰撞和暴露终端造成的不必要等待。数学推导证明了 CAODR 对隐藏/暴露终端问题的改善。性能分析和仿真结果也表明:它在端到端时延、吞吐率、成功率等性能上的表现优于经典的 AODV 路由算法。

关键词 移动 Ad Hoc 网,跨层协同设计,定向通信,路由算法,CAODR

A Cross-Layer Ad Hoc On-demand Directional Routing Algorithm

REN Zhi GUO Wei LIU Jun JIANG Yan

(National Key Laboratory of Communication, UESTC, Chengdu 610054)

Abstract A cross-layer Ad Hoc on-demand directional routing algorithm, CAODR, is presented. It is based on AODV routing algorithm and designed by crossing network layer, MAC layer and physical layer. With the help of directional antennas, it can send unicast packets directionally. Then, packet collision resulting from hidden terminals and unnecessary waiting resulting from exposed terminals are decreased. The improvement is proved mathematically. From performance analysis and simulation experiments, we can find that CAODR have many advantages. Compared to the classic AODV, CAODR improves many performances, such as the end-to-end delay, the throughput and the success rate.

Keywords Mobile Ad hoc networks, Cross-layer design, Directional communication, Routing algorithms, CAODR

1 引言

移动 Ad Hoc 网^[1]是由和主机结合在一起的移动路由器通过无线链路联结而成的、以随机图的形式出现的自治系统。移动路由器能够自由运动并以任意方式进行组织,因此网络的拓扑会以不可预测的方式迅速变化。移动 Ad Hoc 网可以作为独立的系统运行,也可以作为子网连接到 Internet 上,在战场通信、抢险救灾等场合具有广泛应用前景。

移动 Ad Hoc 网所具有的多跳、动态拓扑、时变信道、资源受限等特点,为路由算法的设计和 optimization 带来很大挑战^[2]。目前,在路由算法优化方面,除了对路由机制、算法参数等内容进行改进的传统方法外,跨层(crossing layer)^[3]优化是一条较新的思路。

2 跨层优化及其问题

在网络算法的设计中,分层作为一种基本的思想,使设计者能够把一个复杂的问题划分为不同层面的几个子问题来分析并逐个加以解决,但不同层之间操作的屏蔽影响了层内操作的优化,降低了严格按照分层思想来设计软件的效率^[4]。因此,维持层间分离的同时,放松对分层结构的严格要求,允许不同层的算法共享网络的状态信息,便成为提高网络性能的一条可行思路,这就是跨层思想的由来(如图 1)。跨层优化主要是指打破严格的层间限制,在网络的多个层面之间进

行跨层信息共享和协同设计,通过多层的信息交互与协同来优化,提高网络性能。

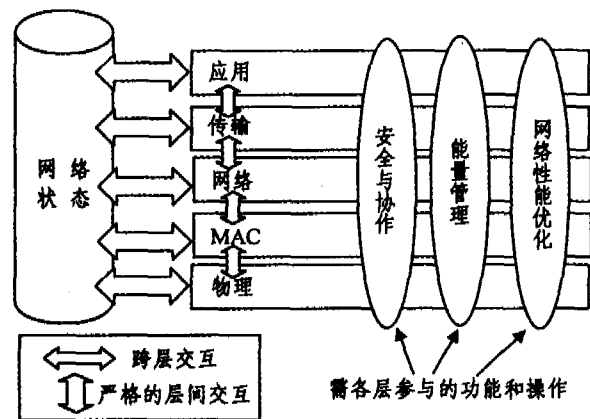


图 1 跨层示意图

但目前跨层优化方面的研究,多与能量管理、安全等内容有关,优化路由算法的跨层方法不多。文[5]对 AODV 路由算法^[6]的路由选择机制进行了改进,用新的负载机制(Load Metric, LM)取代了传统的跳数机制,并根据无线信道的情况动态地调整 LM 和一些 MAC 参数的值。文[7]提出了一种“码字”(codeword)路由模型,以减少距离较近的路由之间潜在的跨层干扰。文[8]通过跨层协同对 AODV 路由协议的 HELLO 消息机制进行优化,以提高协议效率和网络性

^{*})受到国家自然科学基金项目(60472052)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(2004 年度)和战术通信抗干扰技术国防科技重点实验室基金项目(51434020105ZS04)资助。任 智 博士生,中国通信学会会员,研究方向为移动 Ad Hoc 网体系结构与路由技术;郭 伟 教授,博士生导师,学院副院长,主要研究领域为移动通信网、信号处理技术;刘 军 博士生,研究方向为移动 Ad Hoc 网网络管理技术;蒋 艳 硕士生,研究方向为移动 Ad Hoc 网路由技术。

能。上述方法将优化的重点集中在网络层与下面的 MAC 层和物理层的跨层交互上,对 MAC 层与物理层之间的跨层协同涉及不多,并对移动 Ad Hoc 网所处的同频共享无线信道中的隐藏终端和暴露终端问题,尚未提出有效的改善办法。

因此,本文着眼于改善同频共享无线信道中的隐藏终端和暴露终端问题并由此优化 Ad Hoc 按需路由算法性能,重点研究 MAC 层与物理层之间的跨层交互与协同,同时结合目前已逐渐成熟的定向天线技术^[9],提出了一种新的基于跨层协同设计的 Ad Hoc 按需定向路由算法:CAODR(Cross-layer On-demand Directional Ad Hoc Routing)。

3 CAODR 路由算法

CAODR 是一种集按需寻路、跨层协同、定向通信于一体的 Ad Hoc 按需定向路由算法,它通过定向单播和全向广播的发送方式,改善了隐藏/暴露终端问题,提高了网络性能。CAODR 由 3 部分组成:网络层的按需路由算法;网络、MAC、物理三层之间的跨层协同;物理层的定向通信机制。

3.1 网络层的按需路由算法

CAODR 在网络层采用了一种按需路由算法,其原理与经典的 AODV 算法类似。算法由路由发现、路由维护两个部分组成,分别完成查找路由和维护路由的任务;使用的分组类型有路由查找分组 RREQ、路由答复分组 RREP、路由错误分组 RRER 和 HELLO 分组等;路由修复机制和 HELLO 消息机制作为可选项,根据需要取舍。按需路由算法只在有业务时寻找路由,不用周期性广播控制消息,有利于减少开销,提高效率。

3.2 网络、MAC、物理三层之间的跨层协同

CAODR 在网络、MAC、物理三层之间的跨层协同框架如图 2 所示。

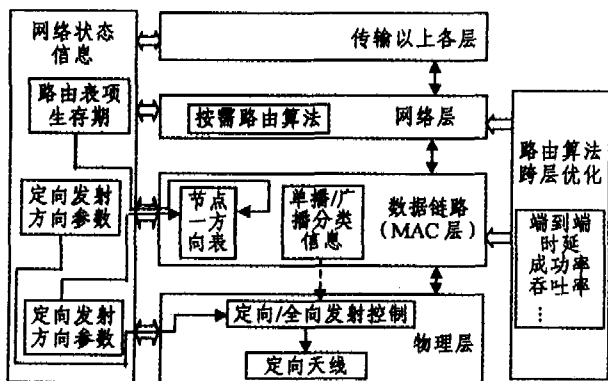


图 2 CAODR 的跨层协同设计框架

具体的跨层信息交互和协同操作如下所述。

(1)网络层:将路由表项的生存期参数提供给 MAC 层,作为“节点-方向”表项的生存期参数,以利于在选路和定向操作的时间上保持一致。

(2)MAC 层:建立一个“节点-方向”表,表的字段包括节点的 MAC 地址、方向、失效时间等。跨层共享网络层路由表项的生存期参数;用作“节点-方向”表项的生存期参数。接收帧时,也会收到物理层传上来的该帧发送节点的方向角,便把帧头中的源节点 MAC 地址和方向角填入表内对应的字段,同时取系统时间与生存期相加,所得结果填入“失效时间”字段。发送帧时,根据所发帧类型的不同,通知物理层用不同的方式发送;广播帧全向发送;单播帧定向发送。发送单播帧之前,先查“节点-方向”表获得发射方向角,传给物理层。若没

有从表中查到方向角,则通知物理层仍用全向方式发送。“节点-方向”表项可根据失效时间字段定期更新,也可采取查表时触发更新的方式。

(3)物理层:向 MAC 层上传接收到的帧时,同时上传该帧发送节点的方向角;跨层共享 MAC 层的发射方向角信息;接收 MAC 层的全向/定向发送方式控制信息。

3.3 物理层的定向通信机制

物理层的定向通信机制以定向天线技术为基础,利用天线对空间不同方向具有不同的辐射或接收能力的特点,来实现无线信号的定向发送或定向接收。CAODR 对物理层定向通信机制的功能要求是:能够以全向或定向两种方式发射信号,可以在两者之间迅速切换;定向发送信号时,方向角和信号张角可调;接收信号时,能够获得信号来波的方向。

4 数学推导

CAODR 所采用的定向发送方式能够改善隐藏终端问题引起的分组碰撞和暴露终端问题引起的不必要等待,本节用数学方法来推导和证明这种改善。

4.1 改善隐藏终端问题的证明

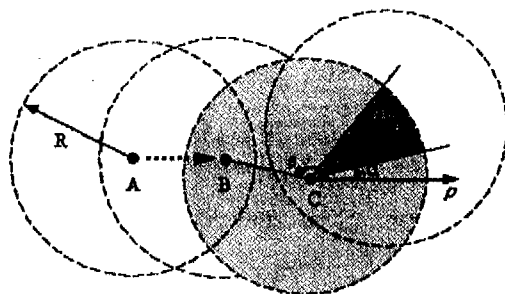


图 3 定向发送对隐藏终端问题的改善

如图 3 所示,假设:网络节点 A、B、C 的通信半径相同,均为 $R, 0 < |AB| < R, 0 < |BC| < R, |AC| > R$;以 C 为极坐标原点,水平向右为极坐标轴方向,建立极坐标系;设 B 接收 A 的信息时 C 也在发送,C 的发射覆盖角为 $\gamma, \gamma \in [0, 2\pi]$,信号覆盖区与 ρ 轴夹角为 α ;设 C 发往 B 的概率为 $P_B, P_B \in [0, 1]$;CB 与极坐标轴的夹角为 $\beta, \beta \in [0, 2\pi]$;于是有:

B 位于 C 的发射信号覆盖区外的概率为:

$$P_I = P\{\beta \notin [\alpha, \alpha + \gamma]\} = 1 - \frac{\gamma}{2\pi};$$

则在 B 处发生分组碰撞的概率为:

$$P = 1 - (1 - P_B) \times (1 - \frac{\gamma}{2\pi})$$

当 C 全向发送时, $\gamma = 2\pi, 1 - \frac{\gamma}{2\pi} = 0, \Rightarrow$ 碰撞概率 $P_0 = 1$;

当 C 定向发送时, $\gamma < 2\pi, 1 - \frac{\gamma}{2\pi} > 0$, 且 $1 - P_B \geq 0, \Rightarrow$ 碰撞概率 $P_D \leq 1$;

$\therefore P_D \leq P$ 。

说明分组碰撞在 C 定向发送时的概率小于 C 全向发送时的概率,隐藏终端问题得到改善。

4.2 改善暴露终端问题的证明

如图 4 所示,假设:网络节点 A、B、C、D 的通信半径相同,均为 $R, 0 < |AB| < R, 0 < |BC| < R$;以 B 为极坐标原点,水平向右为极坐标轴方向,建立极坐标系;设 B 发送信息时, C 欲发送信息;B 的发射覆盖角为 $\gamma, \gamma \in [0, 2\pi]$;设 B 发往 C 的概率为 $P_B, P_B \in [0, 1]$;C 发往 B 的概率为 $P_C, P_C \in [0,$

1]; 设 BC 与极坐标轴的夹角为 $\beta, \beta \in [0, 2\pi]$ 。于是有:

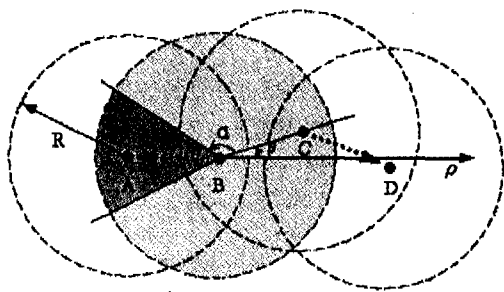


图4 定向发送对暴露终端问题的改善

C 位于 B 的发射信号覆盖区域外的概率为:

$$P_i = P\{\beta \notin [\alpha, \alpha + \gamma]\} = 1 - \frac{\gamma}{2\pi}$$

则 B 发送时, C 的等待(不能发送)概率为:

$$P = 1 - (1 - P_B) \times (1 - P_C) \times (1 - \frac{\gamma}{2\pi});$$

当 B 全向发送时, $\gamma = 2\pi, 1 - \frac{\gamma}{2\pi} = 0, \Rightarrow$ 等待概率 $P_0 = 1$;

当 B 定向发送时, $\gamma < 2\pi, 1 - \frac{\gamma}{2\pi} > 0$, 且 $1 - P_B \geq 0, 1 - P_C \geq 0, \Rightarrow$ 等待概率 $P_D \leq 1$;

$\therefore P_D \leq P_0$.

说明在 B 定向发送时 C 不必要等待的概率小于 B 全向发送时的概率, 暴露终端问题得到改善。

5 性能分析

跨层协同设计和定向通信使 CAODR 算法在端到端时延、吞吐率、分组传送成功率和控制开销等多个性能上比经典的 AODV 算法有所提高。以下对算法性能^[10]做具体分析。

(1) 收敛性能

CAODR 与 AODV 一样, 采用按需的距离-矢量算法, 因此收敛性能一致。只要存在通往目的节点的路径, MAC 层和物理层能够正确收发分组, 在路由过程中不会产生环路(loop)和计数到无穷现象^[11]。

(2) 计算复杂度

二者的时间复杂度在初始化和故障后都为 $O(2d)$, d 表示网络直径; 通信复杂度在初始化和故障后都为 $O(2N)$, N 表示网络中的节点总数。

(3) 平均端到端时延 $D(s)$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (rt_i - st_i) = \frac{1}{N} (\sum_{i=0}^N rt_i - \sum_{i=0}^N st_i) \quad (1)$$

其中 N 表示成功传输的分组数, rt_i 表示第 i 个分组到达目的节点的时间, st_i 表示第 i 个分组的产生时间。CAODR 改善隐藏终端问题, 降低分组碰撞的概率, 使分组重传次数减少, 因此分组传送耗时更少; CAODR 改善暴露终端问题, 减少了节点的不必要等待, 增加了可用带宽。在网络负载不变的情况下, 分组会更容易到达目的地。因此有: $\sum_{i=0}^N rt_i \downarrow$, 而 $\sum_{i=0}^N st_i \rightarrow N, N \rightarrow \Rightarrow (\sum_{i=0}^N rt_i - \sum_{i=0}^N st_i) \downarrow$, 则 $D \downarrow$ 。

(4) 吞吐率 T (packets/s)

$$T = \frac{P_A}{T_s} \quad (2)$$

其中 P_A 表示成功到达目的地的分组数, T_s 表示有数据发送的仿真时间。CAODR 通过减少分组碰撞和节点的不必要等待, 使可用带宽增加。在网络负载相同的情况下, 可用带宽的

增加会使成功到达目的地的分组数增加。因此, $P_A \uparrow, T_s \rightarrow T \uparrow$ 。

(5) 分组传送成功率 S

$$S = \frac{P_A}{P_T} \quad (3)$$

表示 P_A 成功到达目的地的分组数, P_T 表示发送的分组总数。由于 CAODR 增加了可用带宽, 因此负载相同时, 会有更多的分组成功到达目的地, $P_A \uparrow, P_T \rightarrow S \uparrow$ 。

(6) 控制开销 C

$$C = \frac{P_C}{P_C + P_D} = \frac{1}{1 + (P_D/P_C)} \quad (4)$$

其中 P_C 表示全网发送的控制分组总数, P_D 表示全网发送的数据分组总数。因为 CAODR 能增加网络可用带宽, 提高网络吞吐率, 所以会使数据在总通信量中所占比例增加, 即 $(P_D/P_C) \uparrow$, 则 $(1 + (P_D/P_C)) \uparrow \Rightarrow C \downarrow$ 。

6 仿真试验

6.1 仿真条件

硬件平台是 Pentium 4 PC 机, 操作系统是 Windows 2000, 仿真软件是 OPNET 8.1. A^[12]。

6.2 仿真设置

(1) 仿真场景: $1000 \times 1000m^2$ 的正方形区域, 40 个节点随机均匀分布, 均能够自由移动; 每个节点通信半径为 300m; 每次仿真的时间均为 600s。

(2) 节点运动模型: $X(n+1) = X(n) + D_{step} \times \cos\alpha, Y(n+1) = Y(n) + D_{step} \times \sin\alpha$ 。 α 是一个在 $(0, 2\pi)$ 均匀分布的随机角度; D_{step} 是步长, 分别等于 0m、5m、10m、15m 和 20m, 每秒移动 1 步, 对应于节点速度分别为 0m/s、5m/s、10m/s、15m/s 和 20m/s。从仿真时间 0s 开始移动, 直到仿真结束。

(3) 业务模型: 5 packets/s, 每个分组的目的地分别随机确定, 分组长度为 1024 bit, 从仿真时间 5s 开始发送数据分组, 直到仿真结束。

(4) 传输方式: UDP, 尽力而为, 无端到端确认。

(5) MAC 层及物理层设置: 采用 802.11b^[13] 协议, DATA-ACK 方式, 无 RTS-CTS 过程, 失败重传次数最大值为 7。信道速率为 1Mbps。物理层采用定向天线, 跳频扩频方式, 工作频率 2.4GHz。

(6) CAODR 的一些关键参数: “节点-方向” 表项的生存期为 3s。定向发射时, 以接收节点的方向为中心, 发射张角为 $\pi/2$ 。

6.3 仿真结果及分析

(1) 端到端时延

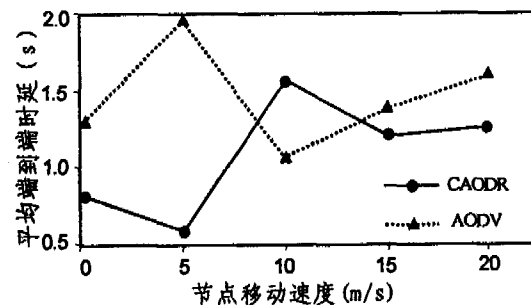


图5 平均端到端时延

图5所示的仿真结果总体趋势与前面5(3)节的推导相符, CAODR在端到端时延性能上的整体表现优于AODV。作为一种特殊情况, 10m/s时的情形与整体状况有出入, 其原因可能与具体的仿真条件和设置有关。

(2) 吞吐量

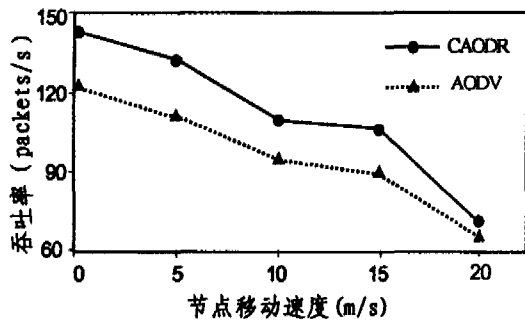


图 6 吞吐量比较

随着节点移动速度的增加,吞吐量呈下降趋势。但在 0~20m/s 的每种速度下,CAODR 的吞吐量均高于 AODV,这是 CAODR 使用可用带宽增加的结果(如图 6)。

(3) 分组传送成功率

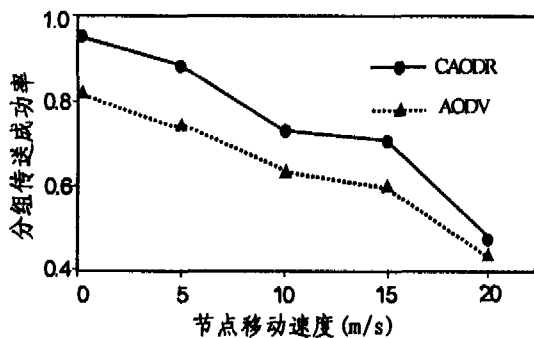


图 7 分组传送成功率的差别

如式(3)中的推导,CAODR 通过增加可用带宽能使更多的分组到达目的地,因此分组传送成功率更高,这从图 7 中能够得到验证。

(4) 控制开销

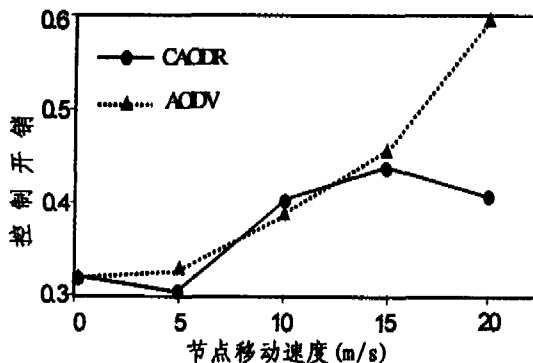


图 8 CAODR 与 AODV 效率比较

从图 8 可看出:两种算法的控制开销随节点移动速度的加快而上升,数值比较接近,但 CAODR 总体上优于 AODV,符合 5(6)节的推导。10m/s 时的特殊情形与本节(1)的情况

相似。

从以上仿真结果和分析可以看出:CAODR 的总体性能较 AODV 有了明显提升,这就从定量的角度验证了 CAODR 算法设计的有效性。仿真结果也表明了适应节点的移动性是 Ad Hoc 路由算法的一项艰巨任务。

结束语 跨层协同设计是目前 MANET 研究中的一个重要领域。本文提出了 CAODR 路由算法,旨在用跨层协同设计和定向通信的思路来优化移动 Ad Hoc 网的按需路由算法,并通过数学推导、性能分析和仿真试验表明了 CAODR 相对于经典按需 Ad Hoc 路由算法的性能优势。在下一步工作中,运动节点方向变化的动态跟踪、“节点-方向”表项生存期和发射张角确定方式的优化等内容,有待更深入地研究。

参考文献

- 1 IETF. Mobile ad hoc networks charter [EB/OL]. http://www.ietf.org/html_charters/manet-charter.html, 2002-09-16
- 2 Hong Xiaoyan, Xu Kaixin, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks [J]. IEEE Network, 2002, 16(4): 11~21
- 3 Conti M, Maselli G, Turi G, et al. Cross-layering in mobile ad hoc network design [J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 48~51
- 4 Comer D E. 用 TCP/IP 进行网际互联(第 1 卷)(第 3 版)[M]. 北京:电子工业出版社,2001. 127
- 5 Huang Leping, Chen Hongyuan, Sivakumar T V L N, et al. Cross-layer optimized routing for Bluetooth personal area network [C]. In: 13th International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN 2004, 2004. 155~160
- 6 Perkins C, Belding-Royer E. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, July 1999
- 7 Fang Yue, McDonald A B. Dynamic codeword routing (DCR): a cross-layer approach for performance enhancement of general multi-hop wireless routing [C]. In: 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004, 2004. 255~263
- 8 任智,郭伟,周懿. 一种跨层优化 AODV 路由协议的方法[C]. 见:2004 西部青年通信会议,成都,2004. 38~42
- 9 Nasipuri A, Mandava J, Manchala H, et al. On-Demand Routing Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks [C]. In: IEEE International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN2000), Oct. 2000
- 10 Corson S, Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations [S]. RFC2501, 1999
- 11 Tanenbaum A. 计算机网络(第三版)[M]. 熊贵喜,等译.北京:清华大学出版社,1999. 272~273
- 12 Xinjie C. Network simulations with OPNET [C]. In: Simulation Conference Proceedings, 1999. 307~314
- 13 ANSI/IEEE Std 802. 11b [S]. 1999 Edition