

## WLAN 跨层链路自适应机制

黄景廉

(西北民族大学 电气工程学院, 兰州 730030)  
(huangjlchinese@163.com)

**摘要:**针对 IEEE 802.11 无线局域网(WLAN)标准并没有给出速率自适应机制的问题,提出了联合物理层与 MAC 层的跨层链路自适应机制 CLLA。该机制在考虑信道干扰、区分碰撞丢失和噪声干扰丢失的前提下,分别对物理层和 MAC 层进行了数学描述,建立了以吞吐量为性能指标的两层参数之间的函数关系,自适应地选择发送速率以提高系统的吞吐量。仿真实验及与现有链路自适应机制的比较表明,提出的跨层链路自适应机制 CLLA 不仅能适应噪声干扰与信道的变化,而且明显地提高了系统的吞吐量。

**关键词:**链路自适应;跨层;无线局域网;服务质量

**中图分类号:** TP309 **文献标志码:** A

## Cross layer link adaptation scheme in wireless local area network

HUANG Jing-lian

(College of Electrical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou Gansu 730030, China)

**Abstract:** To overcome the defect that IEEE 802.11 Wireless Local Area Network (WLAN) does not provide link adaptation scheme, a joint Medium Access Control (MAC) layer and physical (PHY) layer cross layer link adaptation scheme (CLLA) is proposed. The proposed CLLA scheme, which takes channel interference into consideration and distinguishes collision lose and interference lose, provides mathematical description of PHY layer and MAC layer respectively. CLLA also deduces the relationship of two layers in term of throughput. CLLA selects rate adaptively to improve throughput. Simulation results and comparisons with existed schemes prove that the proposed CLLA scheme not only adapts interference and channel variation, but also improves system throughput obviously.

**Key words:** link adaptation; cross layer; wireless local area networks; Quality of Service (QoS)

### 0 引言

随着人们对音视频等多媒体实时业务的需求增加,在无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)中传输多媒体实时业务的需求日益迫切<sup>[1]</sup>。多媒体实时业务对带宽、时延及时延抖动等都提出了很高的要求<sup>[2]</sup>。IEEE 802.11 WLAN<sup>[3]</sup>为了保障各种业务尤其是实时业务的性能通过采用不同的调制和信道编码技术支持多速率。虽然 IEEE 802.11 WLAN 的物理层支持多速率,但是标准中只是规定了一些特定的 MAC 数据帧必须采用的发送速率,并没有给出终端在何时采用什么样的速率发送数据。对于 IEEE 802.11,文献[4]提出了一种自动回退速率(Auto Rate Fallback, ARF)链路自适应算法。这种 ARF 方式虽然简单有效,但采用的是一种启发式的方法。文献[5]提出了一种增强的 ARF 机制,但该机制也只适应于某些特定条件下的无线信道。

本文对 IEEE 802.11 WLAN 中的链路自适应机制进行了研究,提出了一种有效的联合物理层与 MAC 层的跨层链路自适应机制 CLLA。CLLA 在考虑信道干扰、区分碰撞丢失和噪声干扰丢失的前提下,分别对物理层和 MAC 层进行了数学描述,并以吞吐量为性能指标建立了两层参数之间的函数关系,自适应地选择速率提高系统的吞吐量。

### 1 跨层链路自适应机制

#### 1.1 物理层数学描述

为了描述方便,以下以 IEEE 802.11a<sup>[6]</sup>物理层进行分析(对于 IEEE 802.11 其他物理层,分析方法相同)。IEEE 802.11a 物理层有三种编码方式,对于加性高斯白噪声信道, $M$ 元( $M = 4, 16, 64$ )正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM),在信号与干扰加噪声比(Signal-to-interference-plus-noise Ratio, SINR)为 $\gamma$ 时,符号错误概率 $P(\gamma)$ 为:

$$P(\gamma) = 1 - \left\{ 1 - \left[ 2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot Q \left( \sqrt{\frac{3}{M-1} \cdot \gamma} \right) \right] \right\}^2 \quad (1)$$

对于 Gray 编码,可以得到  $M$ 元( $M = 4, 16, 64$ )正交 QAM 的误比特率(Bit Error Rate, BER)  $P_e$ 为:

$$P_e = P(\gamma) \cdot \frac{1}{\lg M} \quad (2)$$

对于二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制,BER 为:

$$P_e = Q(\sqrt{2 \cdot \gamma}) \quad (3)$$

其中  $Q$  函数为高斯分布尾函数:

收稿日期:2008-07-28;修回日期:2008-09-18。

基金项目:国家 863 计划项目(AA2006010101);国家民委资助项目(XBMU-200707XB05)。

作者简介:黄景廉(1968-),女,四川南充人,副教授,主要研究方向:计算机网络。

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2} dy \quad (4)$$

用  $P_R$  表示发送速率为  $R$  时的 BER, 在采用卷积码和交织技术进行前向纠错的前提下, 采用 Viterbi 硬判决时, 可以得到  $P_R$  的上限:

$$P_R < \sum_{k=d_{\text{free}}}^{\infty} c_k P_k(\gamma) \quad (5)$$

其中:  $d_{\text{free}}$  为卷积码的自由距离,  $c_k$  为有  $k$  比特错误的数量,  $P_k$  为采用 Viterbi 解码时, 选择一条与正确路径之间的距离为  $k$  的错误路径的概率:

$$P_k(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{2} \binom{k}{i} (P_e)^{k/2} (1 - P_e)^{k/2} + \sum_{i=(1+k)/2}^k \binom{k}{i} (P_e)^i (1 - P_e)^{k-i}, & k \text{ 为偶数} \\ \sum_{i=(1+k)/2}^k \binom{k}{i} (P_e)^i (1 - P_e)^{k-i}, & k \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (6)$$

考虑 Rayleigh 衰落信道, 其概率密度函数为:

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(M)} \left( \frac{1}{\gamma} \right)^M \gamma^{M-1} \exp(-\frac{\gamma}{\gamma}) ; \gamma > 0 \quad (7)$$

其中  $\bar{\gamma}$  为解码器输入的每比特的平均 SINR。

对于 IEEE 802.11a 物理层, 考虑到卷积码产生器的多项式, 对于码率为 1/2 时, 根据式(5)可以得到解码错误的上限边界值:

$$P_R(\gamma) < 11P_{10}(\gamma) + 38P_{12}(\gamma) + 193P_{14}(\gamma) + \dots \quad (8)$$

其中  $P_{10}(\gamma)$  等各项的值可以通过式(6)来计算。

对于帧长为  $l$  比特的数据, 发送成功的上限边界为:

$$P(l, \gamma) < [1 - P_R(\gamma)]^{8l} \quad (9)$$

对于块衰落信道, 该上边界值可以进一步表示为:

$$P(l, \gamma) < \int_{\gamma=0}^{\infty} [1 - P_R(\gamma)]^{8l} p(\gamma) d\gamma \quad (10)$$

其中  $p(\gamma)$  为衰落信道的概率密度函数,  $P_R(\gamma)$  为不同码率时的解码错误概率。

对于物理层采用不同速率时  $P_{\text{MPDU}}, P_{\text{ACK}}, P_{\text{RTS}}, P_{\text{CTS}}$  的值, 以 6 Mbps 时的 BPSK 模式为例进行计算(其他模式下的概率可以类推), 可得:

$$P_{\text{RTS}} = P(L_{\text{RTS}}, \gamma) = P(25.75, \gamma) \quad (11)$$

$$P_{\text{CTS}} = P(L_{\text{RTS}} + L_{\text{CTS}}, \gamma) / P_{\text{RTS}} = P(45.5, \gamma) / P(25.75, \gamma) \quad (12)$$

$$P_{\text{MPDU}} = P(L_{\text{RTS}} + L_{\text{CTS}} + L_{\text{MPDU}}, \gamma) / (P_{\text{RTS}} \cdot P_{\text{CTS}}) = P(45.5 + L_{\text{MPDU}}, \gamma) / [P(45.5, \gamma) \cdot P(25.75, \gamma)] \quad (13)$$

$$P_{\text{ACK}} = P(L_{\text{RTS}} + L_{\text{CTS}} + L_{\text{MPDU}} + L_{\text{ACK}}, \gamma) / (P_{\text{RTS}} \cdot P_{\text{CTS}} \cdot P_{\text{MPDU}}) \quad (14)$$

## 1.2 MAC 层数学描述

对于 MAC 层, 考虑具有支持 QoS 的 IEEE 802.11e<sup>[7]</sup>, 此时考虑到信道受到噪声干扰, 对于每个优先级业务, 此时的数据帧发生碰撞的概率  $p_i$  包含两部分: 1) 由于竞争引起的碰

撞; 2) 由于噪声干扰引起的链路错误。对于噪声干扰引起的链路错误, 数据帧发送成功的概率可以表示为:

$$P_{\text{success}} = P_{\text{MPDU}} \cdot P_{\text{ACK}} \cdot P_{\text{RTS}} \cdot P_{\text{CTS}} \quad (15)$$

当系统中考虑上述物理层模型描述及区分两种情况下的碰撞时, 可得到  $p_i$ :

$$p_i = 1 - (1 - \tau_i)^{n_i-1} \prod_{j=0, j \neq i}^{N-1} (1 - \tau_j)^{n_j} P_{\text{success}}, i \in [1, N] \quad (16)$$

其中  $\tau_i$  表示终端中优先级为  $i$  的队列在一个时隙中发送数据的概率,  $N$  为系统中的优先级数量,  $n_i$  表示优先级为  $i$  的业务的活动业务数。

在任一时刻, 至少由一个数据发送数据的概率  $P_{\text{tr}}(i)$  为:

$$P_{\text{tr}}(i) = \tau_i (1 - \tau_i)^{n_i-1} \prod_{j=0, j \neq i}^{N-1} (1 - \tau_j)^{n_j} \quad (17)$$

对于当前发送的数据包发送成功的概率:

$$p_{s,i} = n_i P_{\text{tr}}(i) P_{\text{success}} \quad (18)$$

当前接收的数据包发生错误的概率为:

$$p_{er,i} = n_i P_{\text{tr}}(i) (1 - P_{\text{success}}) \quad (19)$$

当前数据包发生碰撞的概率为:

$$p_{c,i} = 1 - n_i P_{\text{tr}}(i) P_{\text{success}} \quad (20)$$

对于第  $i$  类业务, 其吞吐量为:

$$S_i = \frac{p_{s,i} E(L_i)}{(1 - p_b) \sigma + p_{s,i} T_{s,i} + p_{c,i} T_{c,i} + p_{er,i} T_{er,i}} \quad (21)$$

其中  $T_{er,i}$  为接收到的数据帧为错误帧时占用的信道时间, 由于发送数据包的帧长决定了是采用基本接入方式还是 RTS/CTS 接入方式, 因此可以得到  $T_{er,i}$  在两种模式下的值为:

$$T_{er,i} = \begin{cases} H + l + \text{ACK} + 2\sigma + \text{SIFS} + \text{AIFS}[i], & \text{基本模式} \\ H + l + \text{RTS} + \text{CTS} + \text{ACK} + 4\sigma + 3\text{SIFS} + \text{AIFS}[i], & \text{请求发送模式} \end{cases} \quad (22)$$

其中  $H$  表示发送 MAC 帧头和物理层帧头的时间,  $l$  表示发送有效载荷的时间, ACK 是发送确认帧的时间,  $\text{AIFS}[i]$  是  $i$  类业务的信道帧测时间,  $\text{RTS}$  是发送 RTS 帧的时间,  $\text{CTS}$  是发送 CTS 帧的时间,  $\sigma$  为传播时延。

$$p_b = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \tau_j)^{n_j}, i \in [1, N] \quad (23)$$

$$T_{s,i} = \begin{cases} H + l + \text{ACK} + 2\sigma + \text{SIFS} + \text{AIFS}[i], & \text{基本模式} \\ H + l + \text{RTS} + \text{CTS} + \text{ACK} + 4\sigma + 3\text{SIFS} + \text{AIFS}[i], & \text{请求发送模式} \end{cases} \quad (24)$$

$$T_{c,i} = \begin{cases} H + l + \sigma + \text{AIFS}[i], & \text{基本模式} \\ \text{RTS} + \sigma + \text{AIFS}[i], & \text{请求发送模式} \end{cases} \quad (25)$$

系统的吞吐量  $S$  可以表示为:

$$S = \sum_{i=1}^N S_i = \sum_{i=1}^N \frac{p_{s,i} E(L_i)}{(1 - p_b) \sigma + p_{s,i} T_{s,i} + p_{c,i} T_{c,i} + p_{er,i} T_{er,i}} \quad (26)$$

## 1.3 CLLA 机制

根据上述分析可以看出, 系统的性能可以表示为信道接

入参数、接收到的数据帧的 SINR 值  $\gamma$ 、MPDU 长度和各个优先级类的活动业务数的函数,将上述表达式带入式(26)可得吞吐量与参数之间的表达式,式(26)可以表示为:

$$S = f(N, \gamma, L_{\text{MPDU}}, n_i, p_{\text{channel}}) \quad (27)$$

其中  $p_{\text{channel}}$  表示信道参数,包括 AIFS[ $i$ ]、ACK、 $\sigma$ 、SIFS 物理层采用的编解码方式。如果在已知信道接入参数、MPDU (MAC Preamble Data Unit) 长度、各个优先级类的活动业务数以及终端数的情况下,可以计算出在不同 SINR 时,系统在采用不同物理层速率时的最大吞吐量,因此,可以得到  $W$  个可选的不同物理速率时使吞吐量最大的 SINR 的阈值  $\gamma_n (n \in [1, W])$ ,此时  $W$  个可选的不同物理速率转换为 SINR 的阈值之间的关系。即有:

$$m = \arg \max_n \{f(N, \gamma_n, L_{\text{MPDU}}, n_i, p_{\text{channel}})\}; n \in [1, W] \quad (28)$$

因此,可以通过预先针对不同的  $N$ 、 $\gamma$ 、 $L_{\text{MPDU}}$ 、 $n_i$  和  $p_{\text{channel}}$  参数计算出不同参数组合情况下  $\gamma_n$  与  $W$  个速率之间的关系,并制成速率选择参照表存于每个终端中。实际上,对于无线局域网系统,每个优先级类的信道接入参数、MPDU 长度对于终端和接入点 (Access Point, AP) 都是已知的,每个优先级类的活动业务数对于 AP 是已知的,因此 AP 只需要将每个优先级类的活动业务数以及终端数通过 IEEE 802.11e 新增的 QoS 控制字段在下行时发送给各个终端即可。

链路自适应机制 CLLA 的调度如下:

- 1) 当系统建立或系统中业务有变动时,系统中的每个终端向接入点 AP 发送业务请求,AP 统计系统中的业务优先级数  $N$  及每类业务的数量  $n_i (i \in [1, N])$ 。
- 2) AP 向系统中的每个终端通过 IEEE 802.11e 新增的 QoS 控制字段在下行时发送业务优先级数  $N$  及每类业务的数量  $n_i$ 。
- 3) 终端首先通过解码获得当前接收到的 CTS 帧的每比特的 SINR 值  $\bar{\gamma}$ , 根据优先级类的活动业务数  $n_i$  以及  $\bar{\gamma}$  所在的阈值  $\gamma_n (n \in [1, 8])$  的范围,查找速率表,选择对应的物理速率发送数据。

### 3 仿真结果

采用仿真软件 NS2<sup>[8]</sup> 对提出的跨层链路自适应机制 CLLA 进行仿真分析,仿真系统的参数按照 802.11a<sup>[6]</sup> 进行设置。为了证明 CLLA 的有效性,将 CLLA 机制与固定速率、ARF 自适应机制进行了比较。仿真系统考虑在每个终端中发送双向的数据业务,双向的 VoIP 业务和单向的下行视频业务。数据业务优先级为 0; VoIP 业务,优先级为 6; 视频业务优先级为 4。

在第一个场景中,考虑只有一个移动终端和一个 AP 的情形,其中终端以 0.3 m/s 的速度随机移动,图 1 所示为系统已知信道的状态的理想情况下三种方法的吞吐量,仿真时间为 60 s。对于固定速率机制,在 3~15 s 以及 43~60 s 的两段时间内,尽管信道质量很好,但是由于采用固定速率,发送速率最高只能为 18 Mbps,降低了信道的利用率。对于 ARF,从图 1 中可以看出,ARF 与 CLLA 相比,没有 CLLA 反应迅速,

尤其是在信道变化快的情况下更加明显。对于 CLLA,终端的平均吞吐量为 18.73 Mbps,比 ARF 高 0.68 Mbps,同时比固定速率时高 2.47 Mbps。这充分证明了 CLLA 能有效地提高系统的吞吐量。

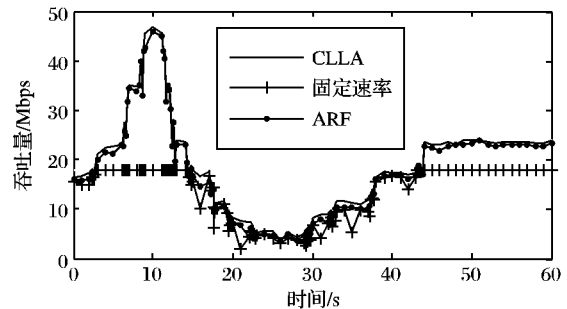


图1 不同机制下的吞吐量

在第二个场景中,考虑 20 个终端和一个 AP 的情形,每个终端向 AP 发送一个 600 Kbps 的视频业务,并且每个终端以 0.25 m/s 的速度随机移动,对其中一个终端的状态进行跟踪。图 2 中所示为采用不同机制下的发送速率。当 SINR 降低时,CLLA 能迅速改变终端的发送速率,而且终端的发送速率明显高于采用 ARF 和固定速率时终端的发送速率。对于 CLLA,终端的平均速率为 598.73 Kbps,比采用 ARF 和固定速率机制时的平均发送速率分别高 121.64 Kbps 和 45.63 Kbps。这证明了 CLLA 算法能动态自适应地调整发送速率,大大提高了终端的吞吐量。

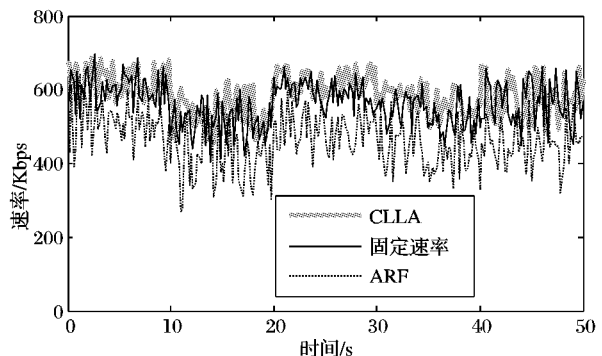


图2 不同机制下的发送速率

如图 3、4 所示,随着终端的移动,所有业务的传输时延和时延抖动都将随着速率的变化而变化。对于固定速率,视频业务的传输时延高于 36 ms,是三种机制中性能最差的。如图 4 所示,固定速率的时延抖动始终高于 15 ms,最大值达到 29 ms,且振荡剧烈。从视频业务的传输时延来看,ARF 机制的最小值为 20 ms,且随着终端移动有较明显的恶化趋势,其最大值达到 32 ms;而 CLLA 机制的时延基本保持 15 ms 左右。从时延抖动来看,ARF 机制的时延抖动高于 11 ms,最大值为 17 ms;而 CLLA 机制的时延抖动基本稳定在 7 ms。原因在于,CLLA 不仅考虑了导致碰撞的原因,而且基于系统中终端的实际参数,进行合理的速率选择达到提高系统吞吐量的目的,因此其性能最好。这些结果也表明,提出的 CLLA 机制能够根据信道状态的变化,选择合适的发送速率提高系统的吞吐量,并有效地减少传输时延与时延抖动,保障了实时业务的 QoS。

(下转第 524 页)

法作为仿真的比较对象。仿真目标是在同一环境下分别测试遗传算法和 DD 算法的网络生命周期。

仿真得到遗传算法和 DD 算法的实验结果如图 2 所示。由图可见,采用遗传算法后,网络的生命周期延长,而且,感知数据量越大,生命周期延长越多,说明遗传算法对于大数据量的全局优化更加突出。仿真表明:利用遗传算法获得的多路路径路由比 DD 算法更优。

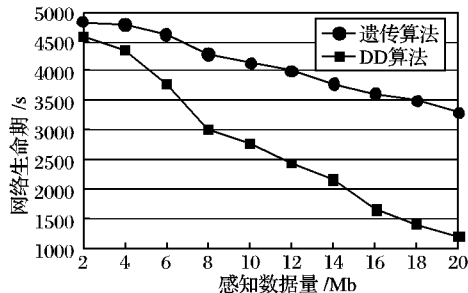


图2 遗传算法和 DD 算法网络生命周期比较

## 5 结语

针对现有路由协议局部优化的不足,结合传感网络的特点,充分利用能源充足、计算和存储功能强大的基站优势,把解决复杂的全局优化问题的遗传算法应用到 WSNs 的多路径路由优化,在基站中执行遗传算法的选择、交叉和变异操作,不仅高效优化了多路径路由,而且节约了网络能量。仿真结果表明,相比 DD 算法,这种遗传算法实施的优化机制能有效

提高网络的生命周期,改善了网络性能。

### 参考文献:

- [1] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3 (3): 325 - 349.
- [2] LEE S J, GERLA M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad Hoc networks[EB/OL]. [2008 - 06 - 18]. [http://www.hpl.hp.com/personal/Sung-Ju\\_Lee/abstracts/papers/icc2001b.pdf](http://www.hpl.hp.com/personal/Sung-Ju_Lee/abstracts/papers/icc2001b.pdf).
- [3] LIU YUZHE, SEAH W K G. A priority-based multi-path routing protocol for sensor networks[C]// 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway NJ: IEEE, 2004: 216 - 220.
- [4] DE S, QIAO CHUNMING, WU HONGYI. Meshed multipath routing: an efficient strategy in sensor networks[C]// IEEE Wireless Communications and Networking. New York: IEEE, 2003: 1912 - 1917.
- [5] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [6] DONG QUNFENG. Maximizing system lifetime in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 13 - 19.
- [7] HUA CUNQING, YUM T S P. Optimal routing for maximizing lifetime of wireless sensor networks[EB/OL]. [2008 - 06 - 18]. [http://www.ie.cuhk.edu.hk/fileadmin/staff\\_upload/tsyum/04460525\\_1\\_.pdf](http://www.ie.cuhk.edu.hk/fileadmin/staff_upload/tsyum/04460525_1_.pdf).

(上接第 520 页)

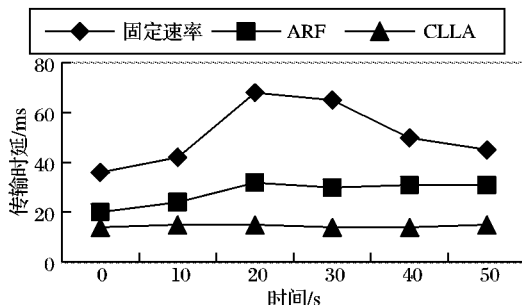


图3 不同机制的传输时延

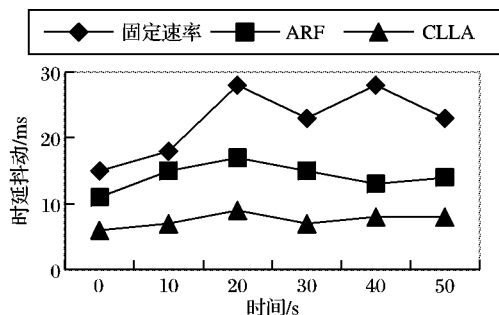


图4 不同机制的时延抖动

## 4 结语

针对 IEEE 802.11 标准并没有给出速率自适应的机制的问题,考虑到噪声干扰、终端移动条件下 WLAN 的特点,采用联物理层与 MAC 层跨层设计的方法提出了一种有效的链路自适应机制。该机制对物理层和 MAC 层进行了数学描述,以吞吐量为性能指标给出了两层参数之间的函数关系,并根据物理层实际检测到的 SINR 信息自适应地指导物理层速率

的选择,提高信道利用率。仿真实验及与现有自适应机制的对比,证明了提出的链路自适应算法确实提高了系统的吞吐量。

### 参考文献:

- [1] LI F H, YANG XIAO, ZHANG JINGYUAN. Variable bit rate VoIP in IEEE 802.11e wireless LANs [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(1): 56 - 62.
- [2] ASSI C M, AGARWAL A, LIU Y. Enhanced per-flow admission control and QoS provisioning in IEEE 802.11e wireless LANs [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(2): 1077 - 1088.
- [3] IEEE Std. 802.11-1999, PART 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications [S]. IEEE, 1999.
- [4] KAMERMAN A, MONTEBAN B. WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1997, 13(2): 118 - 133.
- [5] CHEVILLAT P, JELITTO J, BARRETO A N, et al. A dynamic link adaptation algorithm for IEEE 802.11a wireless LANs [C]// Proceedings of IEEE ICC '03. [S.l.]: IEEE press, 2003: 1141 - 1145.
- [6] IEEE 802.11a WG: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: high-speed physical layer in the 5GHz band [S]. IEEE, 2000.
- [7] IEEE Std 802.11e, specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) quality of service enhancements [S]. IEEE, 2005.
- [8] NS2, Network Simulator 2 [EB/OL]. [2006 - 10 - 01]. <http://www.mash.cs.berkeley.edu/~ns>.