

一种提供时延 QoS 保障的无线网络 MAC 协议

李 剑¹, 胡 波¹, 赵东风^{1,2}

(1. 复旦大学电子工程系, 上海 200433; 2. 云南大学通信工程系, 云南昆明 650091)

摘 要: 本文从提高系统工作效率的角度出发, 提出了一种基于无争用集中控制的忙队列周期查询(BQPO)控制协议. 该协议为时延 QoS 要求较高的无线终端提供了稳定可靠的保障, 通过系统建模分析获得了系统的信息分组平均等待时间的解析结果. 仿真实验结果表明理论分析和仿真实验的一致性与合理性, 与 PCF 控制方式相比, BQPO 协议具有更好的稳定性和时延 QoS 保障.

关键词: 无线网络; MAC; QoS; 周期查询

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 07-1168-05

A Medium Access Control Protocol for Delay QoS Provisioning in Wireless Network

LI Jian¹, HU Bo¹, ZHAO Dong-feng^{1,2}

(1. Electronic Engineering Department, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Communication Engineering Department, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: To provide a more efficient wireless MAC protocol, Busy Queue Polled Only (BQPO) protocol, which is based on cyclic polling scheme, is presented. It can provide delay QoS and stability for the time bounded services. The mathematical model of BQPO system and the mean value of message waiting time are explicitly obtained. The performance of BQPO is simulated and compared with PCF scheme. The results show that the simulation is in concordance with the theoretical analysis. The BQPO scheme can provide higher stability and better delay QoS than PCF scheme.

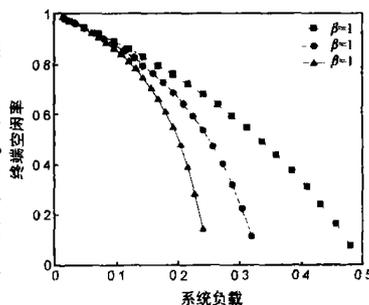
Key words: wireless network; medium access control (MAC); QoS; cyclic polling

1 引言

WLAN(Wireless Local Area Network)作为一种方便有效的接入方式,已经广泛应用于科研、商业、金融等重要领域.然而,由于网络业务的多样性以及不同类型业务有不同的 QoS 需求, WLAN 并不能很好地保证如语音和视频这一类对时延特性要求较高的业务的 QoS 需求.

在 IEEE 802.11 协议中定义了 WLAN 从物理层(PHY)到媒体接入控制(MAC)子层的设计规范,其中 MAC 子层定义了分布协调功能(DCF)作为基本的接入控制方式,还定义了可选的点协调功能(PCF)^[1]. DCF 是一种基于 CSMA/CA 的随机接入控制方式,虽然它在一定程度上解决了无线网络中存在的隐蔽站点的问题,并且能体现公平性,但由于它是一种基于争用的控制方式,它无法为时延敏感业务提供时延保障^[2]. 而 PCF 采用的是控制接入,能提供无争用的数据帧传输,但其性能并不尽如人意.其主要原因是在接入点 AP 进行周期查询的时候,并不是所有的终端都有业务需求^[3],对空闲终端的查询将会影响有业务需求终端的时延特性,并浪费了系统资源.

其系统模型可用文献[4, 5]中的限定 $k=1$ 服务系统加以描述.如图 1 所示,在系统负载为 0.1 的时候终端空闲率大于 0.85.当终端空闲时,必须不断监听信道,等待 AP 的查询,这对于采用电池供电的无线通信设备,是一种较大的浪费.



在文献[6~8]中,图 1 终端数为 20 的 PCF 系统终端空闲率对基于 CSMA/CA 的

DCF 进行了改进,但由于其基于争用的特性,无法提供可靠的时延 QoS 保障.在文献[9]中提出,终端在争用期(CP)^[1]内通过竞争的方式获取信道使用权,进入无争用期(CFP)^[1]后,则根据竞争成功的顺序轮流使用信道而不需要 AP 的协调控制.这种控制方式在争用期内仍然存在冲突的可能,使系统性能降低.在文献[10]中,提出了将 DCF 和 PCF 相结合的称为

混合协调功能(HCF)的接入控制方式,为不同 QoS 要求的终端提供了不同的 QoS 保障,但是当具有相同 QoS 要求的终端占大多数的情况下,并不能保障所有终端的 QoS 要求.本文在文献[3,5]的基础上从改善系统工作效率的角度出发,提出一种忙队列周期查询控制协议,即在 AP 进行查询时仅对有业务需求的终端进行查询,为其提供信道使用权,而无业务要求的空闲终端则采用捎带的方式进行查询,空闲终端在未被查询时可以进入低功耗状态,延长电池的使用时间,为时延 QoS 要求较高的业务提供 QoS 保障.采用嵌入马尔可夫链和概率母函数的方法建立了该系统的模型,分析了系统的平均排队队长和信息分组平均等待时间两个关键参数.通过对仿真实验的结果进行对比分析,说明了理论分析与仿真实验的一致性与合理性以及与 PCF 控制方法相比,忙队列周期查询控制协议在稳定性和时延方面得到的性能改善.

2 忙队列周期查询(BQPO Busy Queues Polled Only)控制协议

BQPO 控制协议的基本思想是:信道的使用权由 AP 来分配,AP 根据其维护的系统队列表中的各个终端的状态将其分为忙队列终端和空闲终端,并建立一个忙队列表,各忙队列终端在忙队列表中的顺序由其系统队列表中的顺序决定.在 AP 进行查询的时候仅从其维护的忙队列表中找出当前需要服务的终端,为其分配信道使用权.

2.1 忙队列终端和空闲终端数均不为零

AP 采用一种改进的 Data+ CF- Poll 帧^[1,2]进行查询.根据忙队列表中的排列,依次选择当前需要查询的忙队列终端,在帧中指定该终端在查询结束后可以使用信道进行分组传送.而在 Data+ CF- Poll 中插入对空闲终端的查询字段 Address0 构成 Data- Poll+ CF- Poll 帧,如图 2 所示,并在帧控制(Frame Control)字段中^[1],用 Data 类型的 1000 子类型加以标识^[1],查询根据空闲终端在系统队列表中的顺序依次进行.当查询到的忙队列终端在收到查询帧后,就可以发送自己的 Data+ CF- ACK 帧,并在 Data 中捎带自己是否还有服务要求的信息.AP 在收到 Data+ CF- ACK 后,检查如果该终端仍有服务要求则继续将其留在忙队列表中,如果不再有服务要求则将其从忙队列表中删除.对于空闲终端,在收到 AP 发出的 Data- Poll+ CF- Poll 后检查其中的查询字段,如果查询的是自己,而自己又有服务请求时,则以低电平发送一个服务请求信号,根据无线信道中的捕获现象,该低电平信号并不会影响数据帧的传输^[3].如果自己没有服务请求或查询到的不是自己,则根据 Data 中的时间信息调整自己的 NAV,转入低功耗状态等待下一次接受查询.而 AP 在收到忙队列终端的 Data+ CF- ACK 后,将在 SIFS 时间间隔内检查是否有空闲终端的服务请求信号存在,如果有则将查询的空闲终端加入忙队列表,等待服务,完成对空闲终端的查询,而不必花费专

门的查询帧和系统时间.

2.2 忙队列表为空

AP 采用 CF-Poll 帧对空闲终端进行查询.查询根据空闲终端在系统队列表中的顺序进行.若被查询空闲终端无业务需求,则继续保持沉默.若有业务需求,则可以发送自己的 Data+ CF- ACK 帧,并在 Data 中捎带自己是否还有服务要求的信息.AP 在收到 Data+ CF- ACK 后,将决定是否将该终端加入忙队列表中.

2.3 无空闲终端

AP 采用 Data+ CF- Poll 进行查询,Data 中不再插入对空闲终端的查询字段.查询根据忙队列终端在忙队列表中的顺序进行.当查询到的忙队列终端在收到查询帧后,就可以发送自己的 Data+ CF- ACK 帧,并在 Data 中捎带自己是否还有服务要求的信息.AP 在收到 Data+ CF- ACK 后,将检查如果该终端仍有服务要求则继续将其留在忙队列表中,如果不再有服务要求则将其从忙队列表中删除.

3 系统模型及分析

假设系统中有 N 个终端站和一个接入点 AP. N 个终端站再动态划分为忙队列子系统,即终端站存储器中有信息分组,和空闲队列子系统.AP 按顺序查询忙队列子系统,传输服务结束的终端站将移到空闲队列子系统,而空闲队列子系统中某个终端站的存储器内一旦有待传输的信息分组,该终端站可以申请加入到忙队列子系统,按顺序的接受 AP 的查询服务.由于系统是在离散时间状态下的求解过程,因此,时间轴按单位时隙进行划分,其网络拓扑如图 3 所示.

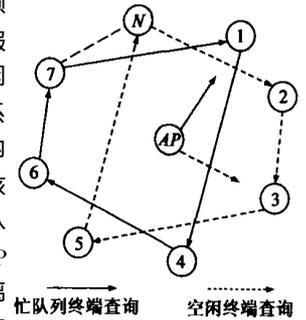


图 3 BQPO 系统拓扑图

3.1 系统工作条件

(1) 每个终端站在任何一个时隙期内都以相互独立、同分布的概率分布向各自的存储器内送入信息分组,其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $A(z)$, $\lambda = A'(1)$ 和 $\sigma_\lambda^2 = A''(1) + \lambda - \lambda^2$;

(2) 任何两个相邻的忙终端站之间的查询转换时间变量服从于一个相互独立、同分布的概率分布,其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $R(z)$, $\gamma = R'(1)$ 和 $\sigma_\gamma^2 = R''(1) + \gamma - \gamma^2$;

(3) 任何一个终端站在接受服务时,即由其存储器内向外发送一个信息分组所用的时间变量服从于一个相互独立、同分布的概率分布,其分布的概率母函数、均值和方差分别是 $R(z)$, $\beta = B'(1)$ 和 $\sigma_\beta^2 = B''(1) + \beta - \beta^2$;

在所讨论的排队服务系统中,每个终端站的存储器容量足够大,不会产生信息分组丢失现象,服务规则按先到先服务的原则进行.

3.2 概率母函数

整个排队服务系统在 t_0 时刻的状态可表示为 $(\xi_1(n), \xi_2$

Byte: 2	2	6	6	6	6	2	6	0-2312	4
Frame Control	Duration	Address0	Address1	Address2	Address3	Sequence control	Address4	Frame body	CRC

图 2 Data-Poll+CF-Poll 帧结构

$(n), \dots, \xi_i(n), \dots, \xi_N(n)]$, 其中 $\xi_i(n)$ 为第 i 号终端站在 t_n 时刻其存储器内存储的信息分组数, 系统状态变量的概率分布为 $P[\xi_i(n) = x_i; i = 1, 2, \dots, N]$.

在 $N\lambda(\gamma + \beta) < 1$ 的系统稳定条件下^[11], 其概率分布的母函数定义为

$$G_i(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N) = \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_i=0}^{\infty} \dots \sum_{x_N=0}^{\infty} \Pi_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) z_1^{x_1} z_2^{x_2} \dots z_i^{x_i} \dots z_N^{x_N} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

其中

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P[\xi_i(n) = x_i; i = 1, 2, \dots, N] = \Pi_i(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N).$$

则系统在 t_{n+1} 时刻的状态变量的母函数为:

$$G_{i+1}(z_1, z_2, \dots, z_{i+1}, \dots, z_N) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\prod_{k=1}^N z_k^{\xi_k(n+1)} \right] \\ = \frac{1}{z_i} R \left(\prod_{k=1}^N A(z_k) \right) B \left(\prod_{k=1}^N A(z_k) \right) [G_i(z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_N) \\ - G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N)] + G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, 0, \\ z_{i+1}, \dots, z_N) - G_i(0, 0, \dots, 0) + \prod_{k=1}^N A(z_k) G_i(0, 0, \dots, 0) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 $G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N)$ 为 t_n 时刻为第 i 号终端站存储器内存储的信息分组数 $\xi_i(n)$ 为 0 时的系统状态变量的概率分布母函数, $G_i(0, 0, \dots, 0)$ 为 t_n 时刻全部 N 个终端站存储器内存储的信息分组数均为 0 时的系统状态变量的概率分布母函数.

3.3 平均排队队长

定义在 t_n 时刻第 i 号终端站开始接受服务时, 第 j 号终端站的存储器内平均存储的等待传输的信息分组数为 $g_i(j)$, 由下式计算

$$g_i(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

定义:

$$g_{i0}(j) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_{j-1}, z_{j+1}, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial G_i(z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N)}{\partial z_j} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, N \quad (3)$$

定义:

$$g_i(j, k) = \lim_{z_1, z_2, \dots, z_N \rightarrow 1} \frac{\partial^2 G_i(z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_k, \dots, z_N)}{\partial z_j \partial z_k} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

对式(1)求二阶偏导可以得到

$$g_{i+1}(j, k) = \bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + \gamma + 2\gamma\beta + \beta + B''(1)] + \lambda(\gamma + \beta) [g_i(j) + g_i(k)] - \lambda(\gamma + \beta) [g_{i0}(k) + g_{i0}(j)] + g_i(j, k) + C\lambda^2 \quad i \neq j \neq k \quad (5)$$

$$g_{i+1}(j, i) = \bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + \gamma + 2\gamma\beta + \beta + B''(1)] \\ = \bar{\theta} \lambda^2 (\gamma + \beta) + \lambda(\gamma + \beta) [g_i(j) + g_i(i)] - g_i(j) + [1 - \lambda(\gamma + \beta)] g_{i0}(j) + g_i(j, i) + C\lambda^2 \quad i \neq j; \quad (6)$$

$$g_{i+1}(j, j) = \bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + (\gamma + \beta)A''(1) + 2\lambda^2\gamma\beta + \lambda^2 B''(1)]$$

$$+ 2\lambda(\gamma + \beta)g_i(j) - 2\lambda(\gamma + \beta)g_{i0}(j) + g_i(j, j) + CA''(1) \quad i \neq j \quad (7)$$

$$g_{i+1}(i, i) = \bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + (\gamma + \beta)A''(1) + 2\lambda^2\gamma\beta + \lambda^2 B''(1)] \\ + 2\bar{\theta} \lambda [1 - \lambda(\gamma + \beta)] - 2[1 - \lambda(\gamma + \beta)] g_i(i) + g_i(i, i) + CA''(1) \quad (8)$$

式中 $C = G_i(0, 0, \dots, 0)$, $\bar{\theta} = \frac{NC}{1 - N\lambda(\gamma + \beta)}$.

由式(5)和式(6)计算 $\sum_{i=1}^N g_{i+1}(j, k)$, 得到

$$\bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + 2\gamma\beta + B''(1)] + \bar{\theta} \lambda^2 [1 - 2(\gamma + \beta)] - g_k(j) \\ - g_j(k) + g_{i0}(j) + g_{j0}(k) + \lambda(\gamma + \beta) \left[\sum_{i=1}^N g_i(j) + \sum_{i=1}^N g_i(k) \right] \\ - \lambda(\gamma + \beta) \left[\sum_{i=1}^N g_{i0}(j) + \sum_{i=1}^N g_{i0}(k) \right] = 0 \quad (9)$$

由式(7)和式(8)计算 $\sum_{i=1}^N g_{i+1}(j, j)$, 得到

$$\bar{\theta} \lambda^3 [R''(1) + 2\gamma\beta + B''(1)] + \bar{\theta} \lambda^2 (1) + 2\bar{\theta} \lambda [1 - \lambda(\gamma + \beta)] \\ - 2g_j(j) + 2\lambda(\gamma + \beta) \sum_{i=1}^N g_i(j) - 2\lambda(\gamma + \beta) \sum_{i=1}^N g_{i0}(j) = 0 \quad (10)$$

对式(9)计算 $\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N$, 对式(10)计算 $\sum_{j=1}^N$, 两式化简后得到

平均排队队长为

$$g_i(i) = \frac{\bar{\theta} \lambda^2}{2[1 - N\lambda(\gamma + \beta)]} \left\{ [1 - (N-1)\lambda(\gamma + \beta)] \frac{A''(1)}{\lambda^2} + N\lambda B''(1) + N\lambda R''(1) + (N-1)\lambda(\gamma + \beta) - 2N(\gamma - \lambda\beta) + \frac{2}{\lambda} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

3.4 平均等待时间

定义信息分组平均等待时间为信息分组进入终端存储器到其开始被传出去前的这段时间, 由下式计算^[4, 5]

$$E[w_L] = \frac{g_i(i)}{\lambda^2 \bar{\theta}} - \frac{1}{\lambda} - \frac{A''(1)}{2\lambda^2} \\ = \frac{1}{2[1 - N\lambda(\gamma + \beta)]} \left\{ \frac{(\gamma + \beta)A''(1)}{\lambda} + N\lambda B''(1) + N\lambda R''(1) + (N-1)\lambda(\gamma + \beta) + 2N\lambda\beta \right\} \quad (12)$$

4 性能仿真及结果分析

为了便于比较分析, 我们对 PCF 系统和 BQPO 系统在相同工作条件下的性能进行了仿真. 仿真条件如下:

(a) 在仿真过程中所有无线终端一直处于 AP 覆盖范围内, 并且不发生移动, 这对于图书馆、会议现场一类的应用场所是合理;

(b) 查询转换时间 γ 的长度为单位时隙 1;

(c) 每个终端站在任一单位时隙内送入其存储器中的分组数服从 Poisson 分布, 并且分组长度一定;

(d) 考虑的是对称系统, 即系统中的各个终端到达的信息分组服从相同的规律分布;

(e) 系统稳定条件为 $N\lambda(\gamma + \beta) < 1$.

对无线终端数为 20 和 30 的不同规模的系统进行了仿真实验, 对 BQPO 系统的理论计算与仿真实验结果进行了比较, 结果如表 1、表 2 和图 4、5 所示. 在图 6—图 9 中给出了随系

统负载的增大, PCF 系统和 BQPO 系统信息分组平均等待时间及归一化处理后的平均队长的系统仿真结果比较。

表 1 BQPO 系统 $E[w_L]$ ($N=20, \beta=1, \gamma=1$) (时隙)

$N\lambda$	$E[w_L]$ 理论	$E[w_L]$ 实验	$N\lambda$	$E[w_L]$ 理论	$E[w_L]$ 实验
0.048	0.106	0.108	0.384	3.310	3.329
0.072	0.169	0.166	0.408	4.435	4.480
0.120	0.316	0.312	0.432	6.353	6.247
0.144	0.404	0.405	0.456	10.364	10.434

表 2 BQPO 系统 $E[w_L]$ ($N=20, \beta=2, \gamma=1$) (时隙)

$N\lambda$	$E[w_L]$ 理论	$E[w_L]$ 实验	$N\lambda$	$E[w_L]$ 理论	$E[w_L]$ 实验
0.048	0.252	0.250	0.256	4.966	4.986
0.080	0.474	0.472	0.272	6.652	6.705
0.096	0.607	0.608	0.288	9.529	9.443
0.112	0.759	0.759	0.304	15.545	15.704

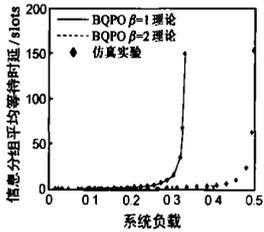


图 4 $N=20$ 的 BQPO 系统理论与仿真比较

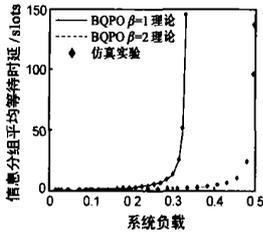


图 5 $N=30$ 的 BQPO 系统理论与仿真比较

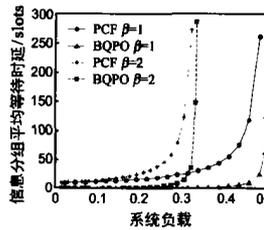


图 6 $N=20$ 的系统平均等待时间

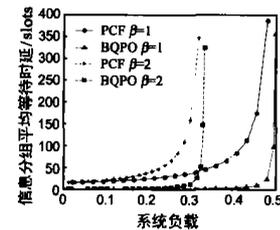


图 7 $N=30$ 的系统平均等待时间

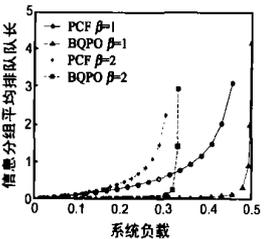


图 8 $N=20$ 的系统平均排队队长

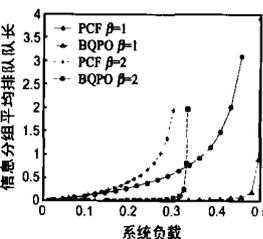


图 9 $N=30$ 的系统平均排队队长

首先, 从表 1、表 2 和图 4、图 5 中可以看到, 本文采用的理论分析方法能较为合理的描述 BQPO 系统, 理论计算值与计算机仿真实验值近似程度较好。

其次, 从仿真结果可以看到, BQPO 系统比 PCF 系统的性能有了较大提高:

1. 由于省去了对空闲终端单独的查询处理, 如图 6 和图 7 所示, BQPO 系统的信息分组平均等待时间随系统负载增大

的变化趋势较 PCF 系统而言相对平缓, 并能一直维持在一个较低的水平; 而 PCF 系统变化则随系统负载增加而迅速增加, 还未增大到系统稳定条件极限时就已经变得很大. 如图 7, 在终端数为 30 的系统中, 服务时间 β 为 1 个单位时隙, 系统负载增大到 0.432 时, PCF 系统的信息分组平均等待时间已经达到了 112.97 个单位时隙, 而 BQPO 系统只有 6.35 个单位时隙. 这说明随着系统负载不断增大, BQPO 系统具有较好的稳定性, 而且对于时延要求严格的业务而言, 其时延特性不会因为系统负载的变化产生较大波动, 仅当系统参数变化接近系统稳定条件极限的时候, 才会发生较大变化。

2. 在图 7 和图 8 中可以看到系统的平均排队队长变化趋势与平均等待时间相似, BQPO 系统同样具有较好的稳定性, 对于队列缓存空间有限的情况, 在系统负载较高的时候, 降低了系统因缓存空间溢出而导致丢包的可能性. 由于考虑的是对称系统, 因此在系统负载 $N\lambda$ 相同的情况下, 20 个终端的系统中每个终端的负载要比 30 个终端系统中的每个终端的负载大, 所以对图 7 和图 8 可以看出, 与 30 个终端的系统相比, 20 个终端的系统在相同负载情况下平均排队队长要稍大些。

3. 从图 6- 图 9 的仿真实验结果中还发现, 在系统负载不太重的情况下, $N\lambda < 0.3$ 时, 服务时间 β 为 2 个时隙的 BQPO 系统的性能甚至比服务时间 β 为 1 个时隙的 PCF 系统还要好。

5 结束语

由于无线局域网的应用越来越普遍, 其承载的业务也日益多样化, 现有协议已不能很好地支持对时延敏感的语音、视频业务. 本文在现有协议的基础上, 提出一种忙队列周期查询控制协议, 即不对系统中无业务要求的终端进行单独查询, 仅查询并为有业务请求的终端提供信道使用权. 从理论分析与仿真实验的分析比较可以看出, BQPO 控制协议提高了系统的稳定性, 随着系统负载增加, 能维持相对稳定的服务水平, 为时延敏感业务提供时延 QoS 保障。

参考文献:

- [1] Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ANSI/IEEE Std. 802.11[S]1999.
- [2] Brian P. Crow et al. IEEE 802.11 wireless local area networks[J]. IEEE Commun Mag, 1997, 35(9): 116-126.
- [3] Oran Sharon, Eitan Altman. An efficient polling MAC for wireless LANs [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2001, 9(4): 439-451.
- [4] H Takagi. Mean message waiting times in symmetric multi queue systems with cyclic service[J]. Performance Evaluation, 1985, 5(4): 271-277.
- [5] 赵东风, 李必海, 郑苏民. 周期查询限定服务排队系统研究[J]. 电子科学学刊, 1997, 19(1): 44-49.
- [6] J L Sobrinho, A S Krishnakumar. Quality of service in Ad hoc carrier sense multiple access wireless networks[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1999, 17(8): 1353-1368.
- [7] Z J Haas, Jing Deng. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a mult

- multiple access control scheme for Ad hoc networks[J]. IEEE Trans Commun, 2002, 50(6): 975- 985.
- [8] Christos Papachristou, F N Pavlidou. Collision-Free operation in Ad hoc carrier sense multiple access wireless networks[J]. IEEE Comm Letters, 2002, 6(8): 352- 354.
- [9] Liuqiang Zhao, Changxin Fan. M-PCF: Modified IEEE 802.11 PCF protocol implementing QoS[J]. Electron Letters, 2002, 38(24): 1611 - 1613.
- [10] Daqing Gu, Jinyun Zhang. QoS enhancement in IEEE 802.11 wireless local area networks[J]. IEEE Commun Mag, 2003, 41(6): 120- 124.
- [11] O C Ibe, Xian Cheng. Stability conditions for multiqueue systems with cyclic service[J]. IEEE Tran Automat Control, 1988, 33(1): 102- 103.

作者简介:

李 剑 男, 1977 年 7 月出生于云南省大理市, 分别于 2000 年和 2003 年在云南大学获得工学学士和工学硕士学位, 现为复旦大学电子工程系博士研究生, 主要研究方向为 WLAN 及 Ad hoc 无线网络协议分析, B3G、4G 中的移动性管理及无线资源管理. E-mail: lijian@fudan.edu.cn.

胡 波 男, 1968 年出生, 1996 年获复旦大学电子工程系博士学位, 现为复旦大学电子工程系教授, 博士生导师, 主要研究领域有数字信号处理、通信、电路分析与设计.

赵东风 男, 1957 年出生, 现为云南大学通信工程系教授, 复旦大学电子工程系兼职教授, 博士生导师, 主要从事轮询多址通信理论、随机多址通信理论、网络通信工程等方面的研究工作.