

一种采用两级缓冲调度区分业务的帧聚合策略

何蓉* 方旭明

(西南交通大学信息编码与传输实验室 成都 610031)

摘要: 帧聚合是改善无线 MAC(Media Access Control)协议信道利用率,提高频谱效率的有效手段之一。该文针对多业务场景,采用两级缓冲区调度策略,按照不同聚合权重因子对各队列轮询聚合。根据各个队列的包超时紧迫因子动态调整各队列的聚合权重,以满足各 QoS 等级业务的时延限制。该文还将排队论模型引入到帧聚合策略的性能分析中,建立了系统的数学分析模型,定量分析了主要性能参数与系统负载的关系。通过与 IEEE 802.11n 标准中定义的两层帧聚合策略比较表明,该文提出的帧聚合策略的性能优于 IEEE 802.11n 两层帧聚合策略。

关键词: 无线通信; 帧聚合; 缓冲区调度; QoS; 区分业务

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0240-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00276

A Frame Aggregation Scheme with Two-level Buffer Mechanism and Service Differentiation

He Rong Fang Xu-ming

(Lab of Information Coding & Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Frame aggregation is one of the efficient methods to improve wireless channel utility of MAC (Media Access Control) and spectral efficiency. Aiming at multi-services, this paper adopts two-level buffer mechanism and polls each queue for aggregation according to aggregation weight factor. The aggregation weight factor of each queue is dynamically adjusted based on the packet overtime urgent factor defined to meet with the delay requirement of each QoS type of service. This paper introduces queue theory into the performance analysis of frame aggregation scheme. A mathematical analysis model is set up. Additionally, the relationship of main performance parameters and system load is quantificationally analyzed. Compared with the performance of the two-level aggregation scheme defined in IEEE 802.11n standard, the proposed scheme indicates the performance of the new frame aggregation scheme is more efficient than the two-level aggregation scheme defined in 802.11n standard.

Key words: Wireless communication; Frame aggregation; Buffer management; QoS; Differentiated services

1 引言

目前的无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)和无线Mesh网络(Wireless Mesh Network, WMN)的MAC技术主要沿用IEEE 802.11 DCF和EDCA协议,网络传输性能不够理想。为改善网络传输性能,研究者从各方面寻求解决方案,包括MIMO技术、MAC协议的改进技术等。在MAC层采用帧聚合策略是保持现有协议改动最小前提下提高MAC带宽利用率行之有效的方法^[1,2]。由于DCF和EDCA协议在发送小数据包时会产生较额外开销,帧聚合策略通过在多个数据帧间共享这些开销,提高了信道利用率。

目前对帧聚合的研究主要集中在帧聚合策略实

现方法,以及帧聚合策略如何提升WLAN、WMN和无线传感器网络的性能^[2-11]。802.11n标准中定义了3种帧聚合策略:MAC服务数据单位聚合(A-MSDU)、MAC协议数据单位聚合(A-MPDU)以及结合A-MSDU和A-MPDU的两层帧聚合策略^[1]。文献[4]将节点建模为成批服务的队列模型,研究了聚合帧长度对时延和信道利用率的影响。文献[5]基于排队论和注水准则提出一种帧聚合调度策略,将系统建模为单队列批量服务排队模型,仅考虑了单业务模式下的系统效能。文献[6]对802.11n提出的3种帧聚合策略进行了分析仿真,得出两层帧聚合策略更有效的结论。文献[7]对传感器网的数据聚合技术进行了总结,对聚合过程中涉及的路由协议、MAC协议等方面进行了讨论。文献[8]分析了WPAN中采用不同传输数据速率时的超帧容量,得出聚合帧尺寸越大,传输速率越高和开销更低。文献[9]采

2010-03-23 收到, 2010-06-29 改回

国家自然科学基金(60772085)资助课题

*通信作者: 何蓉 rhe@swjtu.edu.cn

用帧聚合技术解决了WLAN多速率的信道利用率问题。文献[10]提出根据链路质量自适应选择数据速率及聚合帧长度，论文关注的QoS是包的误比特率不大于某个阈值的情况，未考虑多业务场景。总之，现有研究成果很少关注区分业务下的帧聚合策略。在设计帧聚合策略时，是否具有区分业务能力，并在满足各类业务QoS需求下有效提高系统性能是本文所要关注的问题。另外，如何建立区分业务场景下系统的数学模型并定量分析平均队列长度、包平均时延也是现有研究中很少关注的问题。本文基于排队论模型，将两级缓冲区调度思想引入到帧聚合策略中，以平均时延作为主要QoS指标，根据各个队列的包超时紧迫因子来动态调整各个队列的聚合权重值，以满足各个QoS等级业务的最大时延需求。

2 两级缓冲调度策略

假设有 m 个 QoS 等级，以平均时延作为主要指标。每个 QoS 等级对应一个最大平均时延阈值 $T_{i,thresh}$ ，每个 QoS 等级下的业务流数目为 $Q_i (i=1,2, \dots, m)$ ，为每个业务流维护一个队列。假设一个业务流对应一个用户，确保进入不同 QoS 等级队列的业务流平均时延不大于 $T_{i,thresh}$ 。QoS 等级越高，其 $T_{i,thresh}$ 越小。本文采用两级缓冲区调度策略进行帧聚合操作，如图 1 所示。其中，QoS 分类器按照数据包所要求的 QoS 归入不同队列。第 1 级在各个 QoS 类别间按比例公平策略调度，权重参数 α_i (其中 $1 \leq i \leq m$) 决定了每一类 QoS 等级的数据包在一个聚合帧内所占字节数的百分比，满足以下关系式：

$$0 < \alpha_i < 1, \text{ 且 } \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1 \quad (1)$$

为保证不同类型业务流间的比例公平性，本文将 α_i 设置为常数，即第 1 级调度是静态调度。第 2 级调度是在一个 QoS 等级内部的各个队列间进行，采用动态调度策略。由于各个队列的包超时紧急程

度不一样，为了能区分处理不同队列的包超时紧急程度不同的情况，本文采用动态调整各个队列聚合系数 $\gamma_{i,j}$ (j 为 QoS 等级 i 中的队列号， $1 \leq j \leq Q_i$) 的方法。聚合系数 $\gamma_{i,j}$ 是指 QoS 等级 i 中第 j 个队列在一次聚合操作中参与聚合的包在整个聚合帧中所占百分比。动态调整 $\gamma_{i,j}$ 值的范围仅限定在同一 QoS 类别之内，即 $\gamma_{i,j} \leq \alpha_i$ 。 α_i 与 $\gamma_{i,j}$ 之间的关系如下式：

$$\sum_{j=1}^{Q_i} r_{i,j} = \alpha_i, \text{ 或者 } \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^{Q_i} r_{i,j} \right) = 1 \quad (2)$$

本文定义包超时紧迫因子 EUI(Expire Urgency Index)来反映每个队列中各个包的超时紧急程度，每个包在进入队列时都被加上一个时间标记，即记录下当时时间。EUI 的定义如式(3)所示。

$$EUI_{i,j,k} = \frac{t_{now} - t_{enq_{-j,k}}}{T_{i,thresh}}, \quad 1 \leq j \leq Q_i \quad (3)$$

其中 i 表示 QoS 等级， j 表示 QoS 等级 i 中的队列号， k 表示包在队列 j 中的序号。 $t_{enq_{-j,k}}$ 是队列 j 中第 k 个包进入队列的时间， t_{now} 是当前时间。当 $EUI_{i,j,k}$ 大于等于 1 时，意味着该包已超过其最大时延阈值。由于一个队列对应一个用户的数据包，故一个队列内各个包的超时顺序与包进入队列的顺序一致。为简化分析，假设不同 QoS 等级的包长度不同，相同 QoS 等级业务流的包长度相等，为 l_i (单位 Byte)。一个聚合帧的长度阈值为 L_{mtu} (Byte)， L_{mtu} 应不超过 MAC 所决定的最大可传输帧长值。先计算出各队列前面 n_{ave} 个包的 $EUI_{i,j,k}$ 值之和 $\sum_{k=1}^{n_{ave}} EUI_{i,j,k}$ ，然后根据式(4)计算队列 j 的聚合系数。

$$r_{i,j} = \alpha_i \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_{ave}} EUI_{i,j,k}}{Q_i \cdot n_{ave}}, \quad 0 \leq \sum_{k=1}^{n_{ave}} EUI_{i,j,k} < n_{ave} \quad (4)$$

式(4)中， $\sum_{k=1}^{n_{ave}} EUI_{i,j,k}$ 值越大，说明该队列的包超时紧急程度越高，分配给该队列的聚合系数也越大，这样可增加该队列的包在聚合帧中所占比例而缓解队列的包超时紧急程度。为了能适应网络中业务量的动态变化，采用周期性动态更新各个队列聚合系数的方法。设置定时器 T_a ，其值假设为 T_{update} ，当 T_a 溢出后，执行如图 2 所示流程。

3 排队模型

为方便帧聚合问题的建模与分析，引入排队论，根据排队论的 3 个组成要素^[11]，做出如下假设：用户按照参数为 $\lambda_i (1 \leq i \leq m)$ 的泊松分布产生数据包。采用混合制的排队规则，队列长度有限，包的逗留时间(等待时间与服务时间之和)有限，一个队列中的包采用先到先服务，队列数目为 $\sum_{i=1}^m Q_i$ ，其中 m

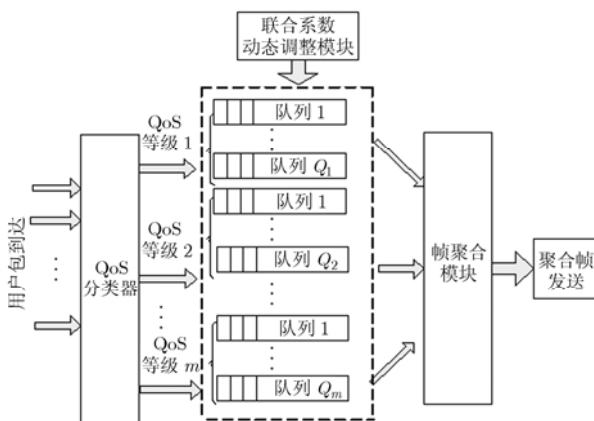


图 1 两级缓冲区调度帧聚合策略组成结构

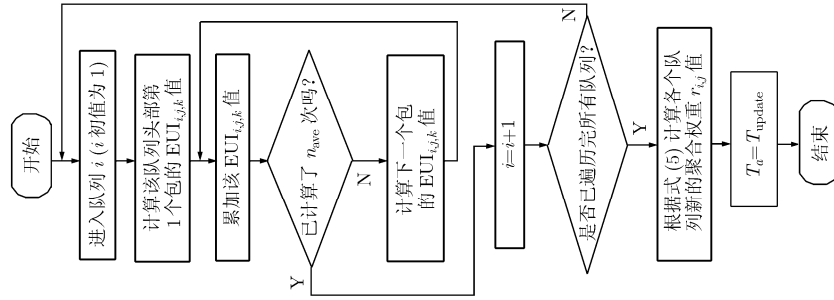


图2 定期更新各队列聚合系数流程图

为 QoS 等级数目。服务台 1 个，采用批量服务方式依次为多个队列服务。服务指帧聚合操作及数据包发送。每个队列一次被服务的包数根据聚合权重 $\gamma_{i,j}$ 确定。总的服务时间包括帧聚合操作时间和竞争信道并发送聚合帧的时间。一个聚合帧中最大包数目 N_f 的定义如下，其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。

$$N_f = \left\lfloor \sum_{i=1}^m \frac{L_{\text{mtu}} \alpha_i}{l_i} \right\rfloor \quad (5)$$

根据上述假设，可将数据包进入队列、帧聚合和发送过程建模为顾客按参数为 λ_i 的泊松分布到达服务台，队列容量有限，非对称、多队列循环批量服务模型。其中，非对称指各个队列的参数不相等。

4 系统数学模型

由于该排队模型无法用一个简单公式来表示队列平均长度、包平均逗留时间等性能。本文采用文献[12]的方法，用联立方程组来建立系统的数学模型。为了数学建模的方便，做出以下假设条件，并定义以下变量和参数：系统有 $\sum_{i=1}^m Q_i$ 个队列，每个 QoS 等级下有 Q_i 个队列。队列容量为 c_i 。包到达为相互独立的泊松流，到达率为 λ_i 。各队列每次服务的包数目 $k_i = \lfloor N_f \cdot r_{i,j} \rfloor$ ， $1 \leq k_i \leq N_f \alpha_i$ 。采用定额服务方式，即包数目不足 k_i 时不服务，超过 k_i 时，剩余包留待下次服务。各队列的批量服务时间 t_{is} 服从相同分布，其分布函数为 $F_{is}(t)$ ，其均值为 k_i/μ ，其中 μ 为服务单个包的平均速率。服务台竞争信道并发送包的时间 t_c 的分布函数为 $F_c(t)$ 。

t_T 为服务台完成帧聚合并发送的总时间随机变量。 T 为 t_T 的均值， $F_T(t)$ 为 t_T 的分布函数。 $\pi_{i,j}$ 为服务台轮询到队列 i 时，该队列有 j 个包的概率， $j = 0, 1, \dots, m_i$ 。 $p_{i,k}(t_T)$ 为队列 i 在 t_T 中到达 k 个顾客的概率。 r_i 为队列 i 的溢出率， $r_i = 1 - P_{is}(k_i/\mu) / [\lambda_i T]$ ，其中 k_i/μ 为队列 i 的服务时间。 P_{is} 为服务台轮询到队列 i 时，为该队列服务的概率， $P_{is} = \sum_{j=k_i}^{c_i} \pi_{i,j}$ 。

λ_{ie} 为队列 i 的有效到达率， $\lambda_{ie} = \lambda_i(1 - r_i)$ ； L_i 为队列 i 的平均队长， $L_i = \sum_{j=0}^{c_i} j \pi_{i,j}$ 。 W_i 为队列 i 中的包平均逗留时间， $W_i = L_i/\lambda_{ie}$ 。 Λ 为系统总到达率， $\Lambda = \sum_{i=1}^m Q_i \lambda_i$ 。由于 $\pi_{i,j}$ 与上个周期起始点状态以及该周期中包到达的数目有关，而上个周期起始点可分为不服务和服务两种状态，根据马尔可夫过程理论，借鉴文献[12]，列出以下状态方程组：

$$\begin{aligned} \pi_{i,0} &= \pi_{i,0} p_{i,0}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,0}(t_T) \\ \pi_{i,1} &= \pi_{i,0} p_{i,1}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,0}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,1}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i+1} p_{i,0}(t_T) \\ \pi_{i,2} &= \pi_{i,0} p_{i,2}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,1}(t_T) + \pi_{i,2} p_{i,0}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i} p_{i,2}(t_T) + \pi_{i,k_i+1} p_{i,1}(t_T) + \pi_{i,k_i+2} p_{i,0}(t_T) \\ &\quad \vdots \\ \pi_{i,k_i-1} &= \pi_{i,0} p_{i,k_i-1}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,k_i-2}(t_T) + \dots \\ &\quad + \pi_{i,k_i-1} p_{i,0}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,k_i-1}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i+1} p_{i,k_i-2}(t_T) + \dots + \pi_{i,c_i} p_{i,2k_i-c_i-1}(t_T) \\ \pi_{i,k_i} &= \pi_{i,0} p_{i,k_i}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,k_i-1}(t_T) + \dots \\ &\quad + \pi_{i,k_i-1} p_{i,1}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,k_i}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i+1} p_{i,k_i-1}(t_T) + \dots + \pi_{i,c_i} p_{i,2k_i-c_i}(t_T) \\ \pi_{i,k_i+1} &= \pi_{i,0} p_{i,k_i+1}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,k_i}(t_T) + \dots \\ &\quad + \pi_{i,k_i-1} p_{i,2}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,k_i+1}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i+1} p_{i,k_i}(t_T) + \dots + \pi_{i,c_i} p_{i,2k_i-c_i+1}(t_T) \\ &\quad \vdots \\ \pi_{i,c_i-1} &= \pi_{i,0} p_{i,c_i-1}(t_T) + \pi_{i,1} p_{i,c_i-2}(t_T) + \dots \\ &\quad + \pi_{i,k_i-1} p_{i,c_i-k_i}(t_T) + \pi_{i,k_i} p_{i,c_i-1}(t_T) \\ &\quad + \pi_{i,k_i+1} p_{i,c_i-2}(t_T) + \dots + \pi_{i,c_i} p_{i,k_i-1}(t_T) \\ \pi_{i,c_i} &= \pi_{i,0} \sum_{k=c_i}^{\infty} p_{i,k}(t_T) + \pi_{i,1} \sum_{k=c_i-1}^{\infty} p_{i,k}(t_T) + \dots \\ &\quad + \pi_{i,k_i-1} \sum_{k=c_i-k_i+1}^{\infty} p_{i,k}(t_T) + \pi_{i,k_i} \sum_{k=c_i}^{\infty} p_{i,k}(t_T) + \pi_{i,k_i+1} \\ &\quad \cdot \sum_{k=c_i-1}^{\infty} p_{i,k}(t_T) + \dots + \pi_{i,c_i} \sum_{k=k_i}^{\infty} p_{i,k}(t_T) \sum_{j=0}^{c_i} \pi_{i,j} = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\sum_{k=k_i}^{\infty} p_{i,k}(t_T) = 1 - \sum_{k=0}^{k_i-1} p_{i,k}(t_T)$ 。

上述状态方程组的各个方程为超越方程，难以用常规数学方法求解。本文采用文献[12]中的集中参

数替代和逼近方法，以一个具体实例来求各队列参数的近似解，定量分析各队列平均长度、包平均逗留时间等主要性能参数与系统负载之间的关系。

5 模型求解与数值分析

不失一般性和有效性，为数值分析简便，假设理想无线信道环境，即不考虑信道误差、干扰及退避等问题。假设 3 个队列分别对应 3 个 QoS 等级，初始聚合系数 γ_i 分别设为 0.5, 0.3 和 0.2，各业务流的包长度固定且相等；3 个队列的容量 c 均等于 5，包到达率为 λ 。一个聚合帧中最多有 6 个包，3 个队列在一次批量服务中被服务的包数目 k_i 分别为 3, 2, 1，包长度为 512 Byte，根据式(6)可写出 3 个队列的状态方程组，因篇幅所限不再赘述。本文定义吞吐率 S_i 为有效到达率和包长度的积，如式(7)所示。

$$S_i = \lambda_e l_i = \lambda_i (1 - r_i) l_i \quad (7)$$

参照文献[12]中的集中参数替代和逼近近似求解方法，得到了 3 个 QoS 等级队列的平均队长、溢出率、包平均逗留时间 W 和吞吐率 S_i 随系统总到达率 Λ 的变化关系，如图 3~图 6 所示。 Λ 的变化可看作是系统的负载变化。从图 3 可看出，在系统负载较低时， Λ 越小，QoS 等级 1 和 2 队列的 W 越大，且 3 个队列均存在 W 的最小值 W_{min} 。随着 Λ 增加，各队列的 W 将上升并趋于饱和，且聚合系数越大的队列， W 越小。从图 4~图 6 中可看出，随 Λ 增加，各队列的平均队长和溢出率都会上升，但上升幅度不同，聚合系数越大的队列，其溢出率和平均队长越小；且平均队长将趋于饱和值 5。各队列 S_i 会随着 Λ 的增加而增大，到达饱和值后又开始缓慢下降，并趋于平稳；聚合系数越大的队列，其 S_i 也越大。

6 与 802.11n 中帧聚合策略的性能比较

文献[6]通过仿真得出 802.11n 的两层帧聚合策略是三种策略中最有效的。为了能更好评价本文帧聚合策略的性能，故与 802.11n 的两层帧聚合策略

进行比较。本文提出的帧聚合策略考虑了不同业务类型的 QoS 需求，而 802.11n 中的帧聚合机制则对所有业务类型一视同仁。为方便比较，将 802.11n 的两层帧聚合策略应用到多队列、多业务场景下，不考虑具体帧结构。3 个队列采用公平轮询服务方式，每个队列每次被聚合的包数目均为 2。由于 802.11n 的两层帧聚合策略将在两个层次上进行聚合操作，故计算 T 的均值时需考虑第 2 次帧聚合操作所需的时间均值 \bar{t}_{2f} ，用 $T = \bar{t}_c + \sum_{i=1}^3 \frac{P_{is} k_i}{\mu} + \bar{t}_{2f}$ 来计算(这里 \bar{t}_{2f} 取 1)，其他假设条件和参数与第 5 节相同。802.11n 的两层帧聚合策略下 3 个队列各性能参数是相同的，可按照前面类似方法求解。而本文帧聚合策略下 3 个队列的系统性能是不同的，故采用将 3 个队列性能参数取平均值的方式进行比较，从图 7~图 10 可知，本文的帧聚合策略的平均队长、平均队列溢出率、 S_i 等性能总体均优于 802.11n 两层帧聚合策略。当 Λ 大于一定值时(如 0.6)，802.11n 两层帧聚合策略的 W 略优于本文策略，这是由于本文策略是按照聚合权重值进行聚合，权重值小的队列一次被服务的包数目少，该队列的 W 较长，使系统 W 增大。当 Λ 较小(如小于 0.8)时，802.11n 两层帧聚合策略的队列溢出率略优于本文的策略，这是由于本文采用定额服务方式，聚合权重值大的队列在负载较小时被服务的概率较小，该队列溢出率增加，从而增加了系统的平均队列溢出率。

7 结论

本文在帧聚合策略中引入两级缓冲区调度思想，根据各个队列的包超时紧迫因子调整各个队列的聚合系数，既保证了各个 QoS 等级业务的最大时延限制需求，又满足了各业务类型间的比例公平性。本文还基于排队论建立了系统的数学分析模型，并以一个实例讨论了求解状态方程组的方法，定量分

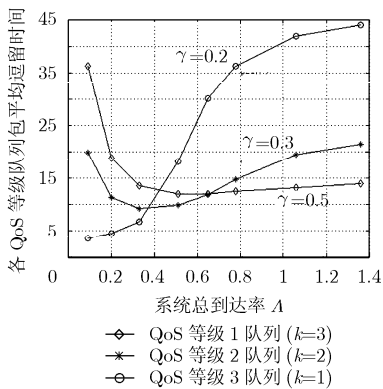


图 3 包平均逗留时间与系统总到达率关系

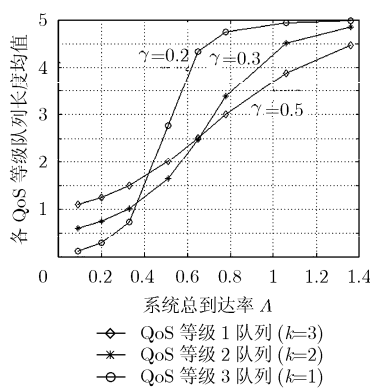


图 4 平均队长与系统总到达率关系

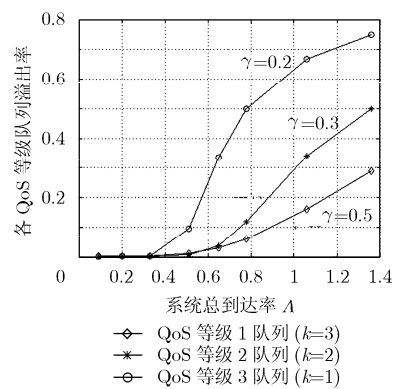


图 5 溢出率与系统总到达率关系

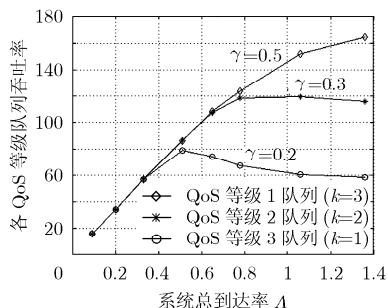


图6 吞吐量与系统总到达率关系

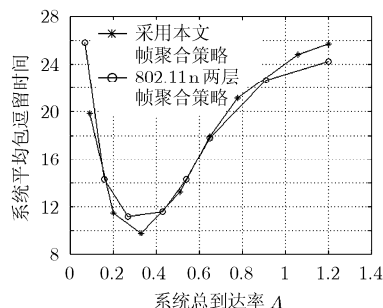


图7 两种策略平均包逗留时间比较

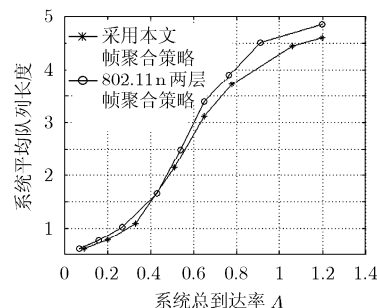


图8 两种策略平均队列长度比较

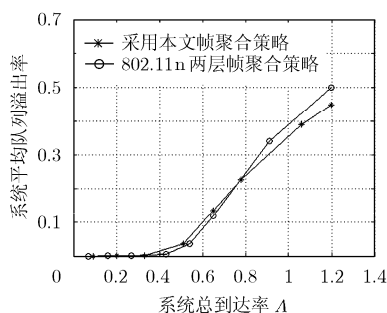


图9 两种策略平均队列溢出率比较

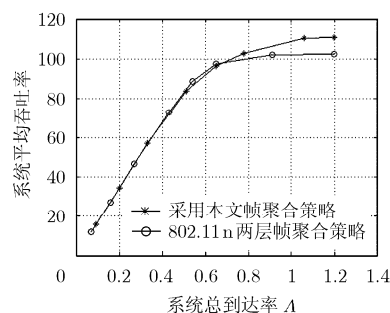


图10 两种策略系统平均吞吐量比较

析平均队长、包平均逗留时间等指标。通过与802.11n中的两层帧聚合策略进行分析比较,表明本文提出的帧聚合策略在考虑业务区分的场景下是有效的,相关性能指标优于802.11n两层帧聚合策略。

参考文献

- [1] IEEE Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements, part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. October 2009.
- [2] Kim Seongkwan, Choi Sunghyun, and Kim Youngsoo, *et al.* MCCA: a high-throughput MAC strategy for next-generation WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(1): 32-39.
- [3] Hoefel Roger Pierre Fabris. Frame aggregation and concatenation schemes for IEEE EDCF 802.11e: a first order MAC and PHY cross-layer model to estimate the throughput. *IEEE VTC*, Barcelona, April 26-29, 2009: 1-5.
- [4] Kuppa Srikant and Dattatreya G R. Modeling and analysis of frame aggregation in unsaturated WLANs with finite buffer stations. *IEEE International Conference on Communications*, Istanbul, June 2006: 967-972.
- [5] Ciftcioglu Ertugrul Necdet and Gurbuz Ozgur. Access scheduling based on time water-filling for next generation wireless LANs. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Dublin, April 2007: 2966-2970.
- [6] Skordoulis Dionysios, Ni Qiang, and Chen Hsiao-hwa. IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-

generation high-throughput WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(1): 40-47.

- [7] Fasolo E, Rossi M, Widmer J, and Zorzi M. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(2): 70-87.
- [8] Mahmud S A, Khan S, and Ni Qiang, *et al.* Capacity issues in meshed high data rate WPANs. *22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Okinawa, 2008: 1285-1290.
- [9] Yun Sangki, Kim Hyogon, and Lee Heejo. 100+ VoIP calls on 802.11b: the power of combining voice frame aggregation and uplink-downlink bandwidth control in wireless LANs. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(4): 689-697.
- [10] Ashtaiwi A and Hassanein H. Utilizing IEEE 802.11n to enhance QoS support in wireless mesh networks. *33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*. Montreal, Que. October 2008: 689-696.
- [11] 《运筹学》教材编写组. 运筹学. 清华大学出版社, 2005年6月: 301-340.
- [12] 王思明, 汪虹. 批量服务容量有限的多队列循环系统. *系统工程理论与实践*, 1998, (9): 100-109.
Wang Si-ming and Wang Hong. Multi queue cyclic system of batch service and finite capacity. *System Engineering Theory & Practice*, 1998, (9): 100-109.

何蓉: 女, 1974年生, 副教授, 研究方向为无线 Mesh 网络、无线传感器网络、网络资源管理。

方旭明: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线资源管理、无线多跳中继网络。