

基于有效容量链路模型的无线局域网帧聚合算法研究

童旺宇 张颖江

(武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430070) (湖北工业大学计算机学院 武汉 430068)

摘要 为了在链路质量波动的情况下提供统计的延迟保证,提出一种可应用于高速 IEEE802.11 无线局域网的新型帧聚合算法。首先,通过目标延迟界限和超时概率的形式来表示 QoS 保证,并将其视为一个优化问题来构建有效容量模型。然后,应用适当的近似值推导出一个简单的公式,并通过使用比例-积分-微分(PID)控制器来求解。提出的 PID 控制器聚合算法能够独立地适应每个链接的时间限度,而这只需要在发射机端(如接入 AP)就可以实现,无需对介质访问控制(MAC)做出任何改变。NS-3 模拟结果显示,相比于最早到期优先算法,所提算法更胜一筹,表现出更加良好的性能。

关键词 有效容量,帧聚合,IEEE802.11,无线局域网,PID 控制器,链路调度,MAC,QoS

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.018

Research on Frame Aggregation Algorithm of Wireless LAN Based on Effective Capacity Link Model

TONG Wang-yu ZHANG Ying-jiang

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(School of Computer Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract In order to provide statistical delay guarantees in the case of link quality fluctuations, a novel frame aggregation algorithm was proposed, which can be used in high speed IEEE802.11 wireless local area network. First, the QoS is guaranteed by the form of the target delay bound and the timeout probability, and it is considered as an optimization problem to construct the effective capacity model. Then, a simple formula is derived by applying the appropriate approximation, which is solved using a proportional integral derivative (PID) controller. The proposed PID controller aggregation algorithm can independently adapt to the time limit of each link, and this only needs to be implemented in the transmitter side (such as access to AP), without the need for medium access control (MAC) to make any changes. NS-3 simulation results show that compared with the earliest deadline first algorithm, the proposed scheme has a better performance.

Keywords Effective capacity, Frame aggregation, IEEE802.11, Wireless local area network, PID controller, Link scheduling, MAC, QoS

随着网络的普及,如今多媒体视频流量在所有互联网消费流量中所占的比例越来越大;此外,大多数视频传输最终将通过家庭室内无线链接进行实现,特别是通过 Wi-Fi 网络^[1-2]。对于 Wi-Fi,比如无线局域网(WLAN)行业已经通过引入 IEEE802.11n 以及最近的 IEEE802.11ac 标准来应对这种需求,两者都采用多输入多输出(MIMO)技术来提高吞吐量^[3]。

为了更好地利用高速通道,研究人员提出将帧聚合的特性引入 IEEE 802.11n 中。当启用了聚合模式时,在传输机会(TXOP)期间,无线设备发送的是无竞争的多帧数,而不是单一的帧数^[5-6]。因此,物理层和介质访问控制(MAC)层的层头和争用开销都分摊给大量的帧。根据 IEEE802.11 标准的规定,有两种类型的聚合,即聚合 MAC 业务数据单元(A-MSDU)和聚合 MAC 协议数据单元(A-MPDU)^[7-8]。A-MS-

DU 是指在 MAC 层顶部实现,在 MAC 层聚合多个链路层的有效载荷。A-MPDU 是指在提交给物理层传播之前,在 MAC 层以下,用其各自的 MAC 层头聚合真实的 MAC 层帧。

为了获得最佳性能,在设置聚合尺寸的同时,应该考虑通道的条件。例如,如果码率较低,那么较大的 TXOP(即较大的聚合尺寸)会浪费宝贵的无线资源^[9-10]。同样,如果在高数据率下传输小数据包,将不能充分利用多输入多输出链接。

本文提出了一种帧聚合算法,其能在高速的无线局域网中提供统计的延迟保证。由于所提聚合算法是建立在有效容量的基础上的,且没有使用物理层或者信道状态信息,因此能够在信道波动下找到一个合适的聚合尺寸。直接使用有效容量很复杂,因为它需要通道服务过程的相关信息,因此,我们运用一个近似值推导出一个简单的公式,只考虑队列级别指标。尽管它是非凸的,但是通过使用 PID 控制器能解决这个

到稿日期:2016-12-13 返修日期:2017-01-02 本文受湖北省科技厅重点项目(2011CDA006)资助。

童旺宇(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为计算机网络、软件工程,E-mail: ruyu319@qq.com;张颖江(1959-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络架构、计算机网络安全、软件工程。

问题。提出的方案在发射机端即可完全实现(如接入点(AP)),无需对 IEEE802.11 MAC 进行任何更改,比其他帧聚合算法更胜一筹,表现出了更加良好的性能。

1 有效容量链接模型

假设一个无线链路的固定随机服务速率为 $r(t)$,且传输信道为固定的马尔可夫衰落信道。吴和 Negi 已经在文献[8]中提出,如果链接是由信源率 μ 提供的,那么运用大的偏差理论,采用切诺夫界可以将排队和服务延迟的分布概率近似为:

$$\Pr\{D(t) \geq D_{\max}\} \approx \gamma(\mu) e^{-\theta(\mu) D_{\max}} \quad (1)$$

其中, $\gamma(\mu)$ 表示链接的利用率, $\theta(\mu)$ 表示链接的服务质量指数, D_{\max} 表示一个给定的统计延迟界限。 ϵ 为初始设置的概率值, 超时概率表示为 $\Pr\{D(t) \geq D_{\max}\}$ 。 $\{\gamma(\mu), \theta(\mu)\}$ 以 (D_{\max}, ϵ) 的表现形式完全决定了统计的 QoS 保证。

运用有效带宽理论中的双重参数, 文献[8]提出了两个期望参数: QoS 指数 θ 和信源率 μ , 其链路的有效容量可以表示为:

$$EC(\theta, \mu) = \Gamma(\theta) = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mu}{\theta t} \log E[e^{-\frac{\theta}{\mu} C(t)}] \quad (2)$$

其中, $C(t)$ 表示累积的随机信道服务分布。很明显, 链路的有效容量应该与它的通信量信源率一样大, 即 $\Gamma(\theta) \geq \mu$, 此 QoS 指数决定了统计延迟保证。相反, 信源率 μ 要求的有效容量可表示为:

$$\theta = \Gamma^{-1}(\mu) \quad (3)$$

在计算链路的有效容量或者它的倒数 $\Gamma^{-1}(\cdot)$ 时, 需要信道服务分布 $C(t)$ 的知识。这种信息不可能随时都能被利用, 即使可以运用, 以封闭形式获得 $\Gamma(\cdot)$ 一般也是不可能的。因此, 文献[8]建议运用以下近似值来获取 θ , 如果式(1)满足等式, 那么该数值就变得准确。具体的估算值 $\hat{\theta}$ 为:

$$\hat{\theta} = \frac{\gamma \mu}{\gamma \mu \bar{S} + \bar{Q}} \quad (4)$$

其中, \bar{S} 表示抽样传送的平均剩余服务时间, \bar{Q} 表示平均队列长度。

现在求解式(1)中的 θ , 要求超时概率小于或者等于 ϵ 的目标值, 即 $\Pr\{D(t) \geq D_{\max}\} \leq \epsilon$ 。得到如下条件:

$$\hat{\theta} \geq \frac{\log(\frac{\epsilon}{\gamma})}{D_{\max}} \quad (5)$$

可以通过延迟约束和目标超时概率的形式 (D_{\max}, ϵ) 来表示给定的统计 QoS 要求。因此, 对于给定的统计 QoS 要求和通信量抵达率 μ 而言, 以下条件必须满足:

$$\frac{\gamma \mu}{\gamma \mu \bar{S} + \bar{Q}} + \frac{\log(\frac{\epsilon}{\gamma})}{D_{\max}} \geq 0 \quad (6)$$

式(6)的意义在于: 所有参数, 包括非空链路队列 γ 的概率, 平均队列长度 \bar{Q} , 以及数据包平均的剩余服务时间 \bar{S} , 都可以很容易并且准确地接入点进行估算。

2 提出的帧聚合算法

本文假设一个独立的 802.11n 基本服务集(BSS)^[21-22]具备许多无线站点和一个将通信量转发到无线站点的接入点。每个帧到达每个无线站点都需要在接入点排队, 然后以聚合

的形式发送出去, 根据本文提出的聚合方案, 其大小以信标为基础, 由接入点的信标决定。使用多态离散时间马尔可夫链对一个缓慢衰落的无线信道进行建模^[20]。

2.1 问题公式化

假设对于某个下行链路 $l(l=1, \dots, L)$, 规定的 QoS 必要条件为 (D_l, ϵ_l) 。在每个信标间隔 BI 期间, 该链路指定的时间宽限为 T_l 。链接在一个或多个传输机会中可能消耗的时间宽限取决于接入点设置的界限值。本文的目标是让接入点给下行链路安排一个给定的数量 L , 在资源使用率达到最小时, 即在式(6)的约束下, 满足 QoS 要求的总的时间宽限值。这种方法为新到达的连接以及最优通信量让出了最大的空间, 有效地将系统容量最大化。本文的问题由以下数学公式来表达:

$$\min \sum_{l=1}^L T_l \quad (7)$$

受制条件为:

$$\frac{\gamma_l(T_l) \mu}{\gamma_l \mu \bar{S}_l(T_l) + \bar{Q}_l(T_l)} + \frac{\log(\frac{\epsilon_l}{\gamma_l(T_l)})}{D_l} \geq 0; \forall l=1, \dots, L \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L T_l \leq BI \quad (9)$$

注意, 每个链路实际上就是一个 G/G/1 的队列, 对于该队列而言, $\bar{Q}(T)$ 和 $\bar{S}(T)$ 是时间宽限 T 的非凸函数。即使在 M/G/1 队列比较简单的情况下, 这些数量的封闭形式表达式也可以应用, 优化问题仍然保持非凸性, 产生的实际解决方案将在下一节中进行解释。

2.2 PID 控制算法

通过设计 PID 控制器, 为式(7)中存在的优化问题提供了一个启发式的解决方案。尽管存在着许多其他替代方法, 但是由于 PID 控制算法比较简单, 参数易于选择, 并且应用范围广泛, 因此选择将其作为本文算法。式(7)的约束可以放宽, 从而获得 L 独立的优化问题^[13-14], 可以根据以下公式为每个链路独立解决:

$$\min T_l \quad (10)$$

$$\frac{\gamma_l(T_l) \mu}{\gamma_l \mu \bar{S}_l(T_l) + \bar{Q}_l(T_l)} + \frac{\log(\frac{\epsilon_l}{\gamma_l(\mu)})}{D_l} \geq 0 \quad (11)$$

由此得出结论, 即目标值大于 BI 意味着问题未能解决, 在这种情况下, 为了解决问题, 每个链路都将重新调节各自的时间宽限 T_l 。然而, 这样会适度降低所有链路的服务质量。观察发现, 随着约束条件增加, 超时概率变得比目标值 ϵ_l 小很多。 $\beta < 0$ 和 $\beta > 0$ 的情况分别表示未充分提供和过度提供链路。很显然, $\beta = 0$ 是最佳选择, 因为我们不想过度提供链路而造成资源浪费。实际上, 本文提出在最优情况下, 所有的约束条件都将具有约束力。因此, 由于互补的松弛性, 应该用等式满足约束条件。由此得出结论: 记录 $\beta = 0$ 的误差对于构建基于 PID 控制器而言是比较合适的选择。

$$\beta_l(t) = \frac{\gamma_l(T_l) \mu}{\gamma_l \mu \bar{S}_l(T_l) + \bar{Q}_l(T_l)} + \frac{\log(\frac{\epsilon_l}{\gamma_l(\mu)})}{D_l} \quad (12)$$

图 1 给出了 PID 控制器在一个给定的链路中的示意图。接入点经常控制 β_l , 而且在每个信标间隔的最后时刻, 它都可

以计算出误差值, $e_i = \beta_i - 0$ 适用于所有链路。然后分别将适当的增益 k_p, k_i 和 k_d 应用于误差、误差的累积总和及其变化率, 根据式(13), 应用 PID 控制法则为下一个信标间隔更新每个链路的时间宽限。

$$T_i(t+1) = T_i(t) - (k_p e_i + k_i \sum_{u=t-T}^t e_i(u) + k_d \frac{e_i(t) - e_i(t-1)}{BI}) \quad (13)$$

如果有必要, 将适当调节 T_i 以便适应长度为 BI 的信标间隔范围。即, 如果 $\sum T_i > BI$, 那么将其设置为:

$$T_i \leftarrow \frac{T_i}{\sum T_i} \quad (14)$$

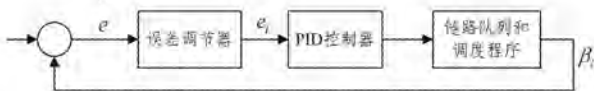


图1 调度每个链路的PID控制器

3 仿真结果

3.1 实验设置

将提出的基于PID的聚合算法的性能与另外两种算法(即最早到期优先算法^[9]和聚合算法^[10])进行比较。在NS3模拟环境中, 假设有一个独立的802.11n基本服务单元, 包含1个接入点和10个无线站点, 在下行方向从接入点接收所有的通信量。站点与AP之间, 采用分布协调功能(DCF)机制RTS/CTS模式进行通信, 如图2所示。每个站点发送的数据为HDTV视频流数据, 码率为70Mbps。本文的方案完全是在接入点一端实施, 而且没有修改802.11介质访问控制层的任何功能。在评估本文提出的PID聚合算法时, 对信道利用率、端到端的平均延迟时间和超时概率进行了仿真和分析。表1列出了本文在默认情况下的主要仿真参数。

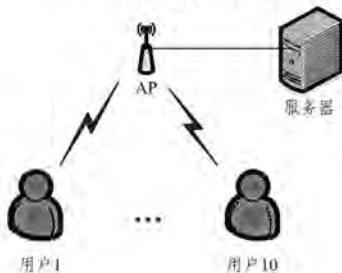


图2 仿真结构图

表1 仿真参数

参数	取值
仿真时间/s	100
网络基本速率/(Mb/s)	54
网络数据速率/(Mb/s)	144
PLCP前导/ μ s	16
MAC层头/bytes	192
总的接入点队列大小	60k个数据包
时隙/ μ s	9
数据包大小/bytes	1500
系统默认值 ϵ /%	1
默认的延迟限制/s	5

3.2 结果与分析

802.11MAC信道利用率的计算公式如下:

$$R_m = \frac{T_{data}}{T_{idle}P_{idle} + T_cP_c + T_sP_s} \quad (15)$$

其中, T_{idle} 和 P_{idle} 分别表示空闲时间和空闲概率, T_c 和 P_c 分别表示冲突时间和冲突概率, T_s 和 P_s 分别表示成功传输的时间和概率。

分别对3种不同的算法进行了仿真, 仿真时间为100s, 误比特率为 0.32×10^{-4} , 仿真结果如图3所示。从图中可以看出, 随着子帧数量的增加, 3种算法的信道利用率也逐渐增加, 但是在到达一定数值后, 曲线开始趋于平坦; 在相同子帧大小的情况下, 提出的PID帧聚合算法的信道利用率最高。

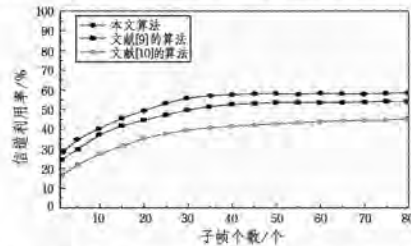


图3 3种算法在不同子帧数量时的信道利用率对比

同样, 在不同误比特率条件下对3种不同的帧聚合算法进行了仿真, 误比特率在 10^{-5} 到 10^{-9} 之间变化, 仿真结果如图4所示。从图中可以看出, 随着误比特率的增加, 3种算法的信道利用率也随之逐渐降低; 在相同误比特率的条件下, 提出的PID帧聚合算法的利用率最高。因此, 在干扰的信道中, 采用提出的帧聚合算法能够获得最高的信道利用率。

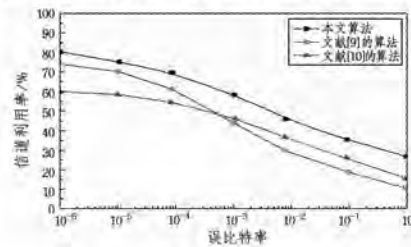


图4 不同误比特率时的信道利用率结果

此外, 当无线站点的数量从1到10变化, 目标超时概率为1%时, 图5给出了每种聚合算法的平均延迟。文献[10]的聚合算法在无线站点达到6个时, 保持着平均延迟略低于5s的延迟界限, 然而在达到6个之后平均延迟很快就会变大; 最早到期优先算法在无线站点的数量较少时, 能提供很小的延迟, 这表明最早到期优先算法过度供应了数据包, 这也正是它比文献[10]的算法的信道效率略低的原因; PID的平均延迟保持在最早到期优先算法和文献[10]的算法之间, 但仍远远低于目标延迟界限, 这是可以接受的。

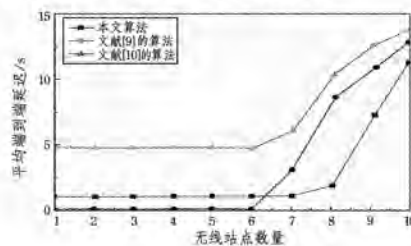


图5 平均端到端时延性能对比

结束语 本文提出一种新型的帧聚合算法, 为高数据率的无线局域网提供统计延迟保障。本文的聚合算法不需要考虑信道的任何信息, 因为它只利用平均的队列级别度量, 结

合有效容量的概念,实现统计延迟保障。本文的方法是基于一接入点实施的 PID 控制器,以此决定分配给每个链接的时间宽限值。仿真结果表明,本文提出的基于 PID 的聚合算法比现有的聚合算法更胜一筹,具有较高的信道利用率。

参 考 文 献

- [1] LIU J, YAO M, QIU Z. Enhanced Two-Level Frame Aggregation with Optimized Aggregation Level for IEEE 802. 11n WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12):1.
- [2] NOMA A M, OTHMAN M, LUN K Y, et al. Two-Level Frames Aggregation with Enhanced A-MSDU for IEEE 802. 11n WLANs[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(3): 1601-1614.
- [3] HONG K, KIM J P, KIM M S, et al. Channel measurement-based access point selection in IEEE 802. 11 WLANs[J]. Pervasive & Mobile Computing, 2016, 30(C): 58-70.
- [4] GHAFAROKHI B S. Distributed Q. E-aware channel assignment algorithms for IEEE 802. 11 WLANs[J]. Wireless Networks, 2014, 21(1): 1-14.
- [5] BELLALTA B. IEEE 802. 11ax: High-efficiency WLANs[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 23(1): 38-46.
- [6] SARRET M G, ASHAT J S, MOGENSEN P, et al. A Multi-QoS Aggregation Mechanism for Improved Fairness in WLAN [J]. Vehicular Technology Conference IEEE, 2013, 14(6): 1-5.
- [7] SHAO X M. Study of 802. 11n IEEE frame aggregation mechanism [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
邵新明. IEEE 802. 11n 帧聚合机制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [8] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4): 630-643.
- [9] FERNG H W, LEONOVICH A. Periods Scheduling Under the HCCA Mode of IEEE 802. 11e[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 7037-7049.
- [10] LIU W J, FENG K T, TSENG P H. Optimality of Frame Aggregation-Based Power-Saving Scheduling Algorithm for Broadband Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 577-591.
- [11] DAVY A, MESKILL B, DOMINGO-PASCUAL J. An Empirical Study of Effective Capacity Throughputs in 802. 11 Wireless Networks[C]//2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, 2012: 1770-1775.
- [12] CHEN K F, LV N, ZHANG W L. Frame structure optimization and analysis of fast dynamic time slot allocation MAC protocol [J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(15): 68-74. (in Chinese)
陈柯帆, 吕娜, 张伟龙. 快速动态时隙分配 MAC 协议的帧结构优化与分析[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(15): 68-74.
- [13] VIJAYAREKHA K, RAO C M. Frame aggregation and fragment retransmission for very high throughput WLANs[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(10): 25607-25616.
- [14] GE Q, BAI G W, SHEN H, et al. Opportunistic network coding mechanism for wireless network link quality aware[J]. Computer Science, 2013, 40(11): 29-34. (in Chinese)
葛青, 白光伟, 沈航, 等. 无线网络链路质量感知的机会网络编码机制[J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 29-34.
- [15] CHEN G X. Exploring on Anti-jamming of Outdoor Signals in High-Speed Wireless Local Area Network [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011, 25(7): 92-95. (in Chinese)
陈国先. 高速无线局域网室外信号抗干扰探讨[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2011, 25(7): 92-95.
- (上接第 67 页)
- works[C]//32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW). IEEE: Piscataway, NJ, 2013: 279-284.
- [8] DAI Y W, YAN L H, CHEN Z P. A Study on Time Synchronization Algorithm Based on Energy Effective Strategy[J]. Advanced Materials Research, 2012, 49(5): 1976-1980.
- [9] YAMANAKA S, HASHIMOTO M, WAKAMIYA N. An Efficient Scheduling Method Based on Pulse-coupled Oscillator Model for Heterogeneous Large-scale Wireless Sensor Networks [J]. Procedia Computer Science, 2016, 83(4): 568-575.
- [10] MO W T, CHEN Z P, TANG C L, et al. Realization of Time Synchronization in Dynamic WSN by Mobile Pulse-Couple Oscillator[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(7): 1090-1095. (in Chinese)
莫文婷, 陈珍萍, 唐超礼, 等. 移动式脉冲耦合振荡器实现动态 WSN 时间同步[J]. 传感技术学报, 2016, 29(7): 1090-1095.
- [11] JIN Y, BAI Z, XU L, et al. Applying Firefly Synchronization Algorithm to Slot Synchronization[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 26(2): 1017-1029.
- [12] JIN Y, MA W, BAI Z, et al. Blind and buffer phase area based on M&S model fireflies synchronization in WSNs[C]//First International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous Healthcare. IEEE: Piscataway, NJ, 2013: 1-4.
- [13] WANG Z C, MA M L, LI Y. Optimal Power Allocation in Broadband Cognitive Radio Networks Based on SC-FDMA[J]. Computer Science, 2015, 42(4): 56-59. (in Chinese)
王振朝, 马明磊, 李延. 基于 SC-FDMA 的宽带认知无线网络中最优功率分配的研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(4): 56-59.
- [14] LI D, HAN X C. Multipath Routing Optimization Scheme for Wireless Mesh Network Based on Mixed Integer Linear Programming Model[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2016, 38(3): 54-58. (in Chinese)
李岱, 韩小纯. 基于 MILP 模型的无线 Mesh 网络多径路由优化方案[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2016, 38(3): 54-58.
- [15] KWON S, KIM B, ROH B H. Preemptive Opportunistic MAC Protocol in Distributed Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1155-1158.
- [16] 王忠思, 黄辉, 于爽. 认知无线电技术及其在军事通信上的应用[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(7): 125-126.