

IEEE 802.11n 自适应帧聚合机制研究

郑海峰¹, 陈国泰², 林金发¹, 余 轮¹

(1 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108; 2 福建师范大学 福清分校, 福建 福州 350300)

摘 要: 分析了传统无线局域网中网络吞吐量受限的原因, 研究了 802.11n 帧聚合机制的原理, 提出了一种自适应帧聚合机制. 仿真结果表明: 采用帧聚合机制降低了帧头额外开销, 降低了网络时延, 有效地提高了信道利用率; 而自适应帧聚合机制可根据信道状况通过动态改变聚合帧中子帧帧长以及重传次数来优化系统性能.

关键词: 802.11n; 帧聚合; 自适应

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)04-0216-05

Research on Adaptive Frame Aggregation Mechanism for IEEE 802.11n

ZHENG Hai-feng¹, CHEN Guo-tai², LIN Jin-fa¹, YU Lun¹

(1 Physics and Information Engineering College, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2 Fuqing Branch, Fujian Normal University, Fuzhou 350300, China)

Abstract: In this paper we analysis the main causes for the throughput bottleneck in the conventional Wireless Local Area Networks standard, and then study the principle of frame aggregation mechanism for 802.11n, and finally propose an adaptive frame aggregation mechanism. Simulation results show that the frame aggregation mechanism can reduce overhead of frame header and network delay, and improve the channel utilization, and the presented frame aggregation mechanism can also optimize the performance of system by dynamically selecting the subframe size and retry times according to the channel condition.

Key words: 802.11n; frame aggregation; adaptation

1 引言

IEEE 802.11n 工作组^[1-4]在 MAC 方面采用了帧聚合机制, 通过一次传输多个子帧的方法, 减少传输所要携带的额外信息, 同时采用块确认机制, 减少 ACK 帧的使用, 从而提高了网络的传输效率, 达到提高网络吞吐量的目的^[5]. 虽然 802.11n 采用多项新的技术来提高系统的吞吐量, 但是无线信道与通过电缆或者光纤等可靠媒介形成的有线网络不同, 无线传输信道具有时变衰落特性, 而信号的传输受到时变衰落信道的影响具有时间域上的随机性和

不可靠性, 因此, 容易造成丢包现象, 这将导致系统吞吐量的下降. 为了解决这个问题, 文中提出了一种基于 802.11n 的自适应 MAC 层技术, 通过根据信道状况, 自适应调整聚合帧子帧长度以及重传次数, 以提高系统传输的性能. 由于文中方法主要是针对多媒体数据 (比如视频流) 在下一代无线局域网 802.11n 中的应用, 所以, 文中主要采用 A-MPDU 聚合帧结构来研究这种自适应方法.

2 帧聚合机制简介

实现帧聚合机制的方法主要有两种: 一种是采

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2009-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(60672146); 福建省自然科学基金(2009J01286); 福州大学基金(2007-XY-16); 福建师范大学福清分校基金(KY2008024)

用 A-MSDU(MAC Protocol Service Unit Aggregation) 机制. 它主要是对 MSDU(MAC Service Data Unit, MAC 层服务数据单元)或者 MSDU 的分块进行聚合, 形成一个较长的 MAC 帧 MPDU(MAC Protocol Data Unit, MAC 层协议数据单元). 另一种是采用 A-MPDU(MAC Protocol Data Unit Aggregation) 机制. 它主要是对 MPDU 进行聚合, 形成一个较长的物理层服务帧 PSDU(PHY Service Data Unit, 物理层服务数据单元). A-MSDU 和 A-MPDU 的不同之处在于, 对于前者, 如果整帧中有一部分子帧出错, 则整帧需要重传. 而对于后者, 如果整帧中有一部分子帧出错, 则只需重传出错的那部分子帧. 因此, A-MPDU 的容错性更具有弹性, 更适合于在无线多媒体通信中的应用.

2.1 A-MSDU 聚合帧

对于 A-MSDU 聚合帧, 如果多个 MSDU 具有相同的地址和 TID 域, 则这些 MSDU 可以聚合成一长帧进行发送. 因此, 这些 MSDU 子帧聚合后只需要发送一次 PHY 帧头和 MAC 帧头的信息, 大大减少了 PHY 帧头和 MAC 帧头带来的额外负载. 这种聚合帧结构一般适合于较小的 MSDU, 比如 TCP 确认帧. A-MSDU 聚合帧的帧结构如下图所示[6]. 从 A-MSDU 帧结构上看, 由于整个聚合帧只采用了一个 FCS(Frame Check Sequence, 帧检错序列), 因此, 一个子帧的错误将导致整个聚合帧的丢弃或重传. 而且这种帧结构长度不能过长, IEEE 802.11n 草案中规定其长度最长为 7935 byte. 由于这种限制, 故 A-MSDU 聚合帧的效率提高有限.

2.2 A-MPDU 聚合帧

对于 A-MPDU 聚合帧, 如果多个 MPDU 子帧具有相同的地址, 则这些 MPDU 子帧可以聚合成一个较大的帧. 而且在 A-MPDU 聚合帧中, 每一个子帧都拥有自己的 MAC 帧头和 FCS. 图 2 为 A-MPDU 聚合帧结构[6]. 每个子帧之间采用一个隔离字段(MPDU Delimiter)分开, 隔离字段中包含有

MPDU 子帧的长度信息和 CRC 字段信息. 利用隔离字段信息和 FCS, 可以检测每一子帧是否出错. 因此对 A-MPDU 的各子帧的检错重传是独立的, 这样就避免了过长的帧对吞吐量的影响. IEEE 802.11n 草案中规定 A-MPDU 聚合帧的长度最长为 65535 byte, 因此可以大大提高了传输的效率.

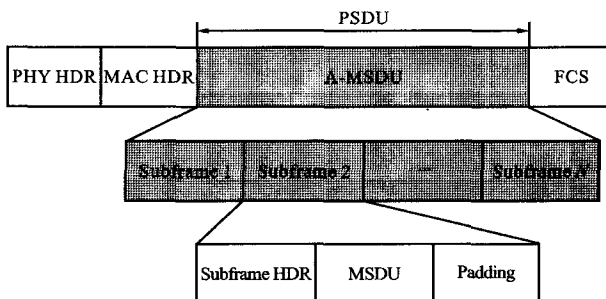


图1 A-MSDU 聚合帧结构

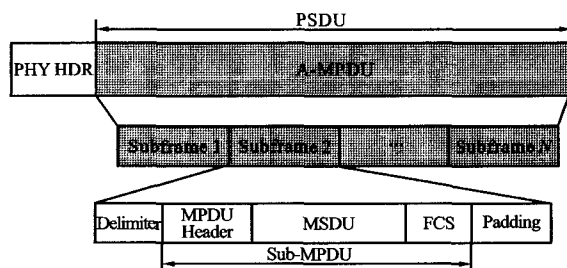


图2 A-MPDU 帧结构

对于 A-MPDU 聚合帧, IEEE 802.11n 采用了 BACK(Block ACK) 帧用来确认所接收到的数据. BACK 帧中的 bitmap 域信息用来对 A-MPDU 的所有子帧进行确认应答. 如果收到的 BACK 帧中 bitmap 域的某些比特为零, 这意味着对应于这些比特的子帧出错, 可以有选择的对出错的子帧进行重传, 这种方法减少了 ACK 帧和 SIFS 的使用, 同时也提高了传输效率.

3 自适应帧聚合机制

3.1 聚合帧性能分析

在理想信道条件下, 采用 A-MPDU 聚合帧的信道利用率可以用下式表示:

$$\eta = \frac{nT_{\text{payload}}}{T_{\text{DIFS}} + T_{\text{CW}} + T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + 3T_{\text{SIFS}} + T_{\text{BACK}} + 4T_{\text{PHYHDR}} + nT_{\text{payload}} + nT_{\text{MACHDR}} + nT_{\text{MD}}} \quad (1)$$

式(1)表明, 信道利用率随着聚合帧中子帧数目的增加而增加, 这说明采用帧聚合机制的 802.11n MAC 协议可以有效提高系统的吞吐量. 同时, 如果聚合帧的子帧越长, 那么信道利用率也越高.

3.2 聚合帧子帧帧长自适应

以上分析了在理想信道条件下, 采用聚合帧的信道利用率和子帧数目之间的关系. 但是, 在无线信道条件下, 由于通信系统受衰落信道的影响, 在传输

过程中,子帧中的比特信息可能会发生差错,导致子帧甚至整个聚合帧都将丢弃或者重传,因此,不同的信道条件对网络性能的影响也不同.下面,将以 A-MPDU 聚合帧为例来分析不同的子帧帧长在不同信道条件下(即不同的 BER)对系统性能的影响.根据上文所述,A-MPDU 聚合帧一般可以应用在多媒体数据传输中.在多媒体应用中,数据包的长度一般较小,如果采用无聚合机制的 MAC 协议,那么对每一个数据包都要加上相应的 PHY 帧头和 MAC 帧头,严重影响了系统的整体性能.而如果采用帧聚合机制,那么可以节省这些帧头所带来的开销,从而提高了系统的吞吐量.同时,在聚合帧帧长相等的情况下,如果聚合帧的子帧越长,那么帧头所带来的开销也越小.但是,在无线衰落信道条件下,子帧越长,子帧出错的概率也越大,因此,对子帧重传的概率也越大,则反过来影响了系统的吞吐量.因此,在不同信道条件下,如何有效地选择子帧帧长,使得系统的吞吐量最大,是文中要考虑的问题.

下面,将推导 A-MPDU 聚合帧中子帧帧长、BER 与系统吞吐量之间的关系.假设比特错误概率(BER)为 p_b ,聚合帧子帧帧长为 L ,比特之间错误概率遵循独立分布,则每个子帧的错误概率可以表示为:

$$p_{\text{subframe}}(L) = 1 - (1 - p_b)^L \quad (2)$$

假设加到子帧的帧头开销为 O ,数据传输速率为 R ,则可以进一步得到一个较简单的系统吞吐量的表达式^[7]:

$$T = \frac{L}{L + O} \times R \times (1 - p_{\text{subframe}}) \quad (3)$$

把式(2)代入(3),可以得到吞吐量与子帧帧长以及 BER 之间的关系:

$$T = \frac{L}{L + O} \times R \times (1 - p_b)^L \quad (4)$$

因此,通过式(4)可以看出,给定系统的数据传输速率 R 和不同信道的 BER,通过调整子帧帧长可以得出得到优化的系统吞吐量.

3.3 自适应重传次数

在 802.11n MAC 层协议中,有两种聚合帧结构: A-MSDU 和 A-MPDU.这两种聚合帧结构对于重传的机制是不一样的.对于 A-MSDU,如果子帧中存在错误,则整个聚合帧都需要重传.而对于 A-MPDU,如果子帧中存在错误,则只要重传有错的子帧就可以了.因此,这种结构特别是对多媒体数据的传输是有好处的.另一方面,对于多媒体数据来说,一般都有端到端的时延限定.如果接收端收到的数据超

过其时延限定,那么该数据会被认为是无效的.因此,一个出错的数据包也不可能无限制地重传下去.

下面将分析有限次数的重传与系统吞吐量的关系.从式(2)可得子帧与误比特率之间的关系,进一步推导出经过 N_{retry} 次重传之后,一个数据包被成功接收的概率为

$$p_d = (1 - p_{\text{subframe}}) + p_{\text{subframe}}(1 - p_{\text{subframe}}) + p_{\text{subframe}}^2(1 - p_{\text{subframe}}) + \dots + p_{\text{subframe}}^{N_{\text{retry}}}(1 - p_{\text{subframe}}) = 1 - p_{\text{subframe}}^{N_{\text{retry}}+1} = 1 - (1 - (1 - p_b)^L)^{N_{\text{retry}}+1} \quad (5)$$

经过 N_{retry} 次重传之后,系统的吞吐量将变为

$$T_{\text{retry}} = R \times p_d \quad (6)$$

因此,根据式(6),可以在给定的吞吐量的要求下得到所需的最少重传次数 N_{retry} .

4 仿真结果与性能分析

文中的仿真试验采用了开源的 NS-2 网络仿真软件,仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

性能	参数
网络基本速率	24Mbps
网络数据速率	144.4Mbps
PLCP 前导	16μs
MAC 层头	192bits
时隙	9μs
SIFS	16μs
DIFS	34μs
接入机制	CSMA/CA RTS/CTS

4.1 聚合帧性能分析

在本实验中,假设初始一个站点向外发送数据,而后每隔一秒,多一个站点加入网络.每个站点发送的数据为 HDTV 视频流数据,码率为 20Mbps,端到端时延限制为 200ms.

首先,仿真采用聚合帧和不采用聚合帧两种场合.其中,聚合帧采用 A-MPDU 结构,聚合帧子帧帧长为 1500B,聚合帧中子帧数目为 40 个,信道为无差错信道.从图 3 仿真结果中,可以看出,采用聚合帧结构系统的吞吐量可以达到 130Mbps,显著提高了系统的信道利用率,信道利用率可以达到 93%,同时可支持的 HDTV 视频流个数可达到 6 个.而不采用聚合帧结构,系统的吞吐量为 60Mbps,信道利用率仅为 43%,可支持 HDTV 视频流个数仅为 3 个.可见,采用帧聚合机制可以有效提高系统的

吞吐量,提高信道利用率。

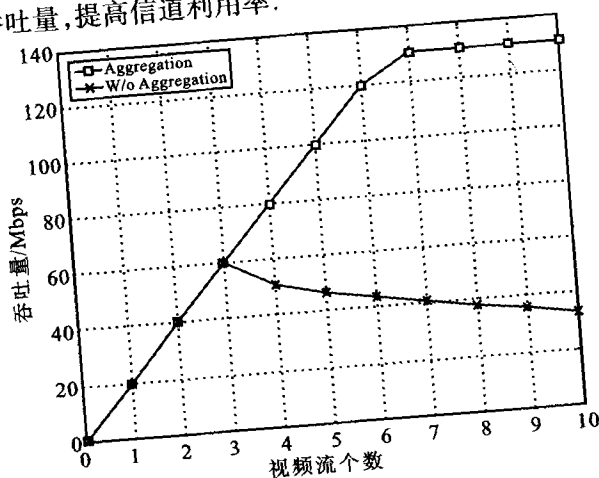


图3 吞吐量性能

其次,仿真采用聚合帧和不采用聚合帧结构的端到端时延情况。从图4的仿真结果,我们可以看出,采用聚合帧结构也可以显著降低端到端时延。从图中可以看出,当视频流为3个时,不采用聚合帧结构的平均时延要小于采用聚合帧结构的情况,这是因为采用聚合帧结构后整个聚合帧要等待一定的子帧个数到来之后才进行传输,而这种额外的等待时间是在端到端传输时延的允许时间之内。从图中可以看出,随着 HDTV 视频个数的增加,采用聚合帧结构的优势在传输时延方面表现明显,即使视频流个数超过6个,传输时延仍然在 200ms 范围内。

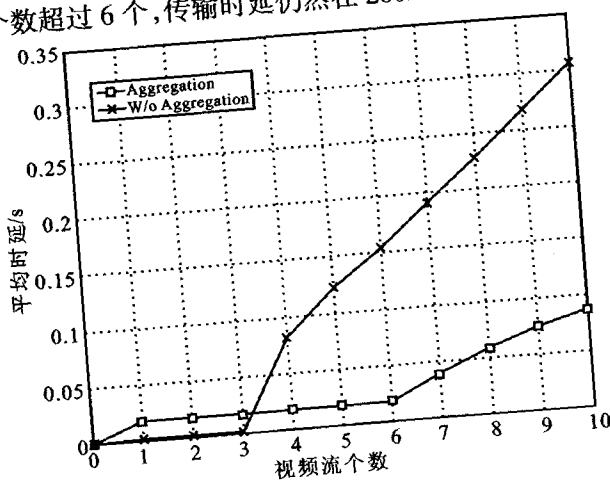


图4 端到端时延性能

4.2 聚合帧子帧帧长与吞吐量关系的性能分析

在图5中,仿真了不同子帧帧长在不同信道条件下与系统吞吐量的关系。在本实验中,假设聚合帧(A-MPDU)帧长为60KB,仿真的子帧帧长分别为250,500,750,1500字节且信道误比特率BER分别为 $1E-4$, $1E-5$, $1E-6$ 的情况。图中的两组曲线分别为通过仿真实验与3.2节中的理论分析得到的仿

真图。从图中可以看出这两组结果基本吻合。同时,用箭头在图中标出了在相同BER下,采用子帧帧长为哪种时,系统吞吐量为最大。可以看出,在BER分别为 $1E-4$, $1E-5$, $1E-6$ 时,子帧帧长为250B,750B,1500B时的吞吐量最大。因此,可以根据信道情况,来选择不同的子帧帧长以优化系统吞吐量。

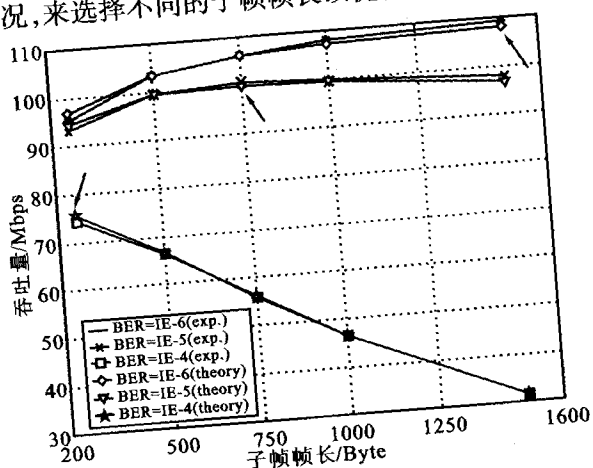


图5 不同子帧帧长与吞吐量的关系

4.3 重传次数与吞吐量关系的性能分析

在图6中,仿真了不同的重传次数对每个节点的吞吐量的影响。从图中我们可以看出,适当增加重传次数可以有效提高节点的吞吐量。对每个节点而言,假设允许有1%的吞吐量损失,则对于子帧帧长 $L=1500B$ 和 $BER=1E-6$, $L=750B$ 和 $BER=1E-5$,以及 $L=250B$ 和 $BER=1E-4$ 情况下,最少的重传次数分别为1,1,3次。因此,在给定系统吞吐量下,可根据不同子帧帧长和不同BER的情况,通过选择不同的重传次数来改善系统的性能。

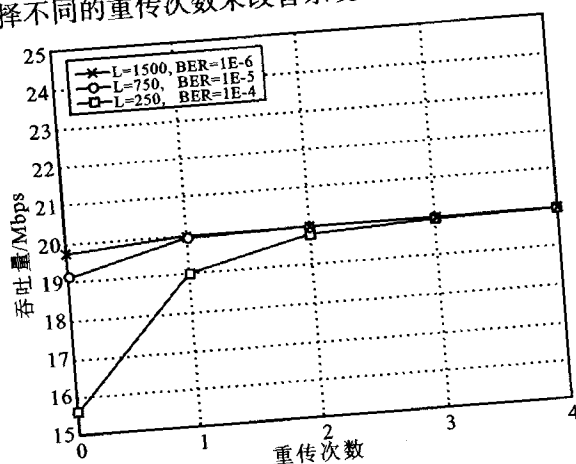


图6 重传次数与吞吐量的关系

5 结束语

由于传统的无线局域网采用的MAC接入机制

造成网络额外开销过大,使得系统实际可获得的吞吐量不高.文中研究了 IEEE 802.11n 所采用的帧聚合机制,仿真研究表明了这种帧聚合机制能有效降低网络开销,提高系统吞吐量,改善信道利用率.此外,文中还研究了自适应的帧聚合机制,理论推导并分析了不同子帧帧长在不同信道条件下的吞吐量性能表现,以及不同重传次数与系统吞吐量的关系,仿真表明这种自适应机制可根据信道状况通过动态选择子帧帧长和重传次数来优化系统性能.

参考文献:

- [1] IEEE std 802.11n D6.0. Part11: wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications: enhancements for higher throughput[S].2008.
- [2] Xiao Y, Rosdahl J. Throughput and delay limits of IEEE 802.11[J]. IEEE Communication Letters, 2002, 6(8): 355-357.
- [3] IEEE Std. 802.11a. Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: high-speed PHY in the 5 GHz band[S]. 1999, reaffirmed 2003.
- [4] IEEE Std. 802.11g WG. Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: further high data rate extension in the 2.4 GHz band [S]. 2003.
- [5] Dionysios, Skordoulis, Qiang Li, et al. IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput WLANs[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(1): 40-47.
- [6] Boris Ginzburg, Alex Kesselman. Performance analysis of A-MPDU and A-MSDU aggregation in IEEE 802.11n [S]. IEEE Sarnoff Symposium, 2007: 1-5.
- [7] Schwartz M. Telecommunication networks: protocols, modeling, and analysis[M]. Boston: Addison-Wesley, 2005.

作者简介:

郑海峰 男,(1978-),硕士,讲师.研究方向为无线通信技术、多媒体通信技术、无线网络接入技术.

陈国泰 男,(1975-),博士研究生,讲师.研究方向为信号处理、信源信道编码、无线通信技术.

林金发 男,(1982-),硕士研究生.研究方向为无线通信技术、多媒体通信技术、无线网络接入技术.

余 轮 男,(1952-),硕士,教授,博士生导师.研究方向为信号处理、多媒体通信、计算机网络技术.

(上接第 215 页)

- [4] Coudoux F X, Gzalet M, Corlay P. Reduction of blocking effect in DCT-coded images based on a visual Perception criterion[J]. Signal Processing: Image Commun., 1998, 11(3): 179-86.
- [5] Anderson G L, Netravali A N. Image restoration based on a subjective criterion[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 1976, SMC-6(12): 845-853.
- [6] Karunaseker S A, Kingsbury N G. A distortion measure or blocking artifacts in image based on human visual sensitivity[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1995, 4(6): 713-724.
- [7] Gopal Lakhani, Norman Zhong. Derivation of prediction equations for blocking effect reduction[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 1999, 9(3): 415-418.
- [8] 雷超阳, 廖海洲, 周训斌. 采用一种新的滤波方法去除图像噪声[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 162-165.
- [9] 武英. 一种图像椒盐噪声自适应滤除方法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 148-150.

作者简介:

米伟哲 女,(1966-),高级工程师.研究方向为现代通信技术与自动控制理论.