

基于 IEEE802.11n 的长距离无线链路性能分析

黄慧芳 李 宁 王发鹏 马文峰

(中国人民解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要 IEEE802.11n-2009 在传统 802.11 协议上添加了帧聚合和块回复功能,实现了 MAC 层增强,显著提高了网络吞吐量,使其更加适用于长距离无线网络。通过长距离(45km)无线链路信道利用率的理论计算和网络仿真,论证了节点采用帧聚合与块回复功能时的信道利用率明显优于不采用的情况。仿真结果进一步表明,速率越高、聚合帧越大在长距离传输时的吞吐量越高,且距离越远时帧聚合的优势越明显。

关键词 IEEE802.11n, 帧聚合, 块回复, 信道利用率

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.024

Performance Analysis of Long-distance IEEE802.11n Wireless Link

HUANG Hui-fang LI Ning WANG Fa-peng MA Wen-feng

(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract IEEE802.11n-2009, adding the functions of frame aggregation and block ACK, realizing the MAC layer enhancement and increasing network throughput dramatically, provides better performance in long-distance wireless networks. We demonstrated that the node using frame aggregation and block ACK is observably higher than without them by the calculation and simulation of channel utilization. The simulation results also show that the faster transfer speed and the bigger aggregated frame achieve higher throughput, and this superiority increases as the distance gets further.

Keywords IEEE802.11n, Frame aggregation, Block acknowledgement, Channel utilization

1 引言

目前,人口密集的大中城市已经基本实现了移动通信网的网络覆盖,但其因昂贵的费用并没有在人口分布稀疏、地形地貌复杂、经济发展缓慢的农村地区得到广泛应用。卫星通信和微波接力也因费用昂贵而未得到民用推广。由于网络接入困难,我国中西部乡村远程医疗和远程教育的发展受到了严重制约,因此亟需发展性价比高的网络设备。基于 IEEE802.11 的长距离无线网络^[1](WiFi based Long Distance, WiLD),采用廉价的大功率无线网卡和高增益定向天线,实现了长距离信号覆盖,使用公开 ISM(Industrial Scientific and Medical)频段,无需缴纳高额频段使用费,且其功耗低,可以工作在极端恶劣的野外环境。它因成本低、带宽高、覆盖广、易于部署和维护、性价比高特点成为了当前偏远乡村地区无线宽带接入研究的主题。

传统 IEEE802.11a/b/g 的 MAC 层协议中 CSMA/CA 在长距离传输时会遇到侦听失效、ACK 超时、效率低等问题,并不适合直接用于 WiLD。印度理工学院的 Raman 教授等人

于 2005 年提出了 2P MAC 协议^[1],并在印度建立了大规模实验网络^[2];美国加州大学伯克利分校的 Brewer 教授等人对 WiLD 的 MAC 层协议进行了系统的研究^[3]。之后,研究人员又基于 JazzyMac^[4]和 JaldiMac^[5]对 2P MAC 协议进行了改进,一些国际大公司(如 Intel, IBM, Microsoft 等)也开展了相关研究和产品化工作^[6]。这些研究均采用 TDMA 代替 CSMA/CA,但是 TDMA 较低的资源利用率及时间同步问题限制着其研究与发展。

IEEE802.11n-2009 对传统 802.11 协议进行了物理层和 MAC 层增强,提高了物理层数据速率,在 MAC 层增加了帧聚合和块回复功能,提供了高吞吐量(HT)^[7],使其具备了在 WiLD 中应用的可能性^[9-10]。本文为研究帧聚合与块回复用于长距离传输时的链路性能,通过对 MAC 协议的分析建立了信道利用率的理论计算模型,之后在 Riverbed(原 OPNET) 17.5 环境中进行网络仿真,并对结果进行了对比分析。

2 系统模型

长距离无线链路的系统模型如图 1 所示,节点采用

到稿日期:2016-01-29 返修日期:2016-05-25 本文受 2014 年国家基金面上项目:异构无线网络环境下的 M2M 通信理论与方法研究(61371123),2014 年国家自然科学基金重大研究计划(培育项目):动态空间信息网络的传输容量与关键技术(91438115),2012 年江苏省青年基金项目:机会网络编码理论方法研究(BK2012055)资助。

黄慧芳(1992—),女,硕士生,主要研究方向为移动通信,E-mail:hfhuang2014@163.com;李 宁(1967—),男,硕士,副教授,主要研究方向为移动通信、认知无线电;王发鹏(1991—),男,硕士生,主要研究方向为移动通信;马文峰(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为宽带无线通信。

IEEE802.11n 协议,配备大功率无线网卡和高增益定向天线,天线架设在很高的通信塔上,中间无遮挡,节点间可视。链路距离很长,时延大且多径效应不明显,其多用于节点分布稀疏高带宽的骨干网络,因此竞争不再是主要问题,点到点链路的性能成为 WiLD 研究的关键。本文主要通过建立点到点链路的理论计算模型和网络仿真,在设定业务类型为交互式多媒体且业务量和缓冲区足够大的前提下,调整 MAC 层参数,对常规 MAC(无帧聚合且采用常规 ACK 机制)和增强型 MAC(同时采用帧聚合和块回复机制)的链路性能进行对比分析。

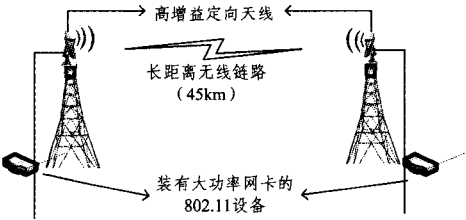


图 1 系统模型

3 IEEE802.11n 的 MAC 层增强在长距离下的性能分析

3.1 帧聚合与块回复的基本原理

帧聚合包括聚合 MAC 服务数据单元(Aggregate MAC Service Data Unit, A-MSDU)和聚合 MAC 协议数据单元(Aggregate MAC Protocol Data Unit, A-MPDU),其封装过程如图 2 所示。在 A-MSDU 下,多个从逻辑链路控制(Logical Link Control, LLC)层接收的带有 14 bytes 子帧前缀(AS)的 MSDU 被拼接在一起组成一个 QoS 数据帧的载荷,加上 34 bytes 的 MAC 头即构成 MPDU。在 A-MPDU 下,每个 MPDU 前被加上一个 4 bytes MPDU 分隔符(APS),在 MAC 层的底端聚合被作为要在单个 PLCP 协议数据单元(PLCP Protocol Data Unit, PPDU)中发送的 PLCP 服务数据单元(PLCP Service Data Unit, PSDU)发送给 PHY。

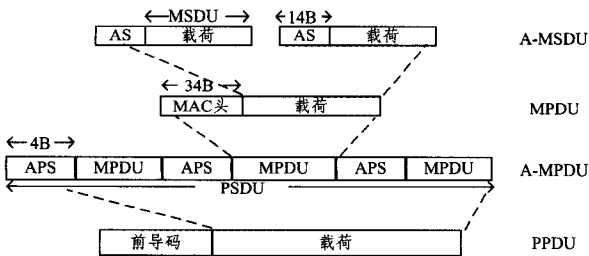


图 2 A-MSDU 与 A-MPDU 封装

采用块回复机制的会话过程如图 3 所示。

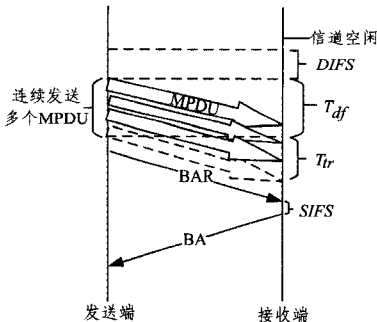


图 3 Block ACK 会话示意图

在数据传送阶段,发送端可以连续发送多个 MPDU 或者整个 A-MPDU,传送数据块后,发送端发送一个块回复请求(Block Acknowledgement Request, BAR)帧,该帧包括需要确认的帧的起始序列号,随后,接收端回复块回复(Block Acknowledgement, BA)帧,其用对应比特值表示各 MPDU 的接收状态。相比于常规确认机制,该机制减少了等待 DIFS 和传播 ACK 的次数,降低了时延,显著提高了效率。

为定量分析帧聚合和块回复对长距离传输性能的影响,首先计算并对比理想情况下有、无帧聚合的信道利用率,然后进行网络仿真。定义 *Goodput* 为数据首次发送时接收端成功接收的数据速率,信道利用率 *CU* 为 *Goodput* 和物理层数据速率 *R* 的比值^[8],平均信道利用率 $\overline{CU}$ 为仿真平均吞吐量 *Throughput* 和物理层数据速率 *R* 的比值。

3.2 信道利用率的理论计算模型

设 L_{data} 为数据长度, T_{data} 为数据传输时延, T_{df} 为整个数据帧传输时延, T_{phy} 为混合模式下物理层头部信息处理所需时延(44.8us), T_{phy} 为经典模式下物理层头部信息处理所需时延(24us), T_{ack} 为 Block ACK 或 ACK 的传输时延, T_r 为链路中的传播时延, T 为总时延,数据帧发送在物理层采用混合模式而确认采用经典模式,接收端总以基本速率 54Mbps 确认,分布式帧间间隔 *DIFS* 和短帧间间隔 *SIFS* 分别为 34us 和 16us,电磁波在自由空间的传播速率为 3×10^8 m/s,则:

$$T = DIFS + T_{df} + T_{phy} + SIFS + T_{phy} + T_{ack} + 2 * T_r \quad (1)$$

$$CU = Goodput / R = (L_{data} / T) / R = T_{data} / T \quad (2)$$

当物理层数据速率为 104Mbps 且链路长度为 45km 时,若采用增强型 MAC,数据帧进行 MSDU 和 MPDU 聚合后,构成大小为 65535 bytes 的超聚合帧发送给 AP,1 个 A-MPDU 帧大约包含 8 个 A-MSDU 帧,由于加入了聚合帧头,因此 $T_{df} = 8 * T_{as} + T_{mac} + T_{aps} + T_{data}$,AS,MAC 头及 APS 长度如图 2 所示, T_{as} , T_{mac} , T_{aps} 分别为其传输时延,接收端采用 Block ACK 机制,收到整个 A-MPDU 帧后才回复 Block ACK,Block ACK 帧长为 128 bytes,可得信道利用率 $CU = 0.9192$ 。

相同条件下,不采用增强型 MAC 时,数据到达 MAC 层之后直接发送原始大小的数据帧,平均值为 1500 bytes,此过程并没有加入额外的帧头,所以 $T_{df} = T_{mac} + T_{data}$,接收端采用常规 ACK 机制,每收到一个 MPDU 便回复一个 ACK 帧,ACK 帧长为 14 bytes,可得信道利用率 $CU = 0.2165$ 。

3.3 Riverbed17.5 仿真结果

仿真场景中物理层参数设置如下:频段为 2.4GHz,带宽为 20MHz,保护间隔为 800ns,距离为 45km,数据速率为 104Mbps。对是否采用增强型 MAC 层协议的情况在 Riverbed17.5 中进行网络仿真,仿真结果如图 4 所示。

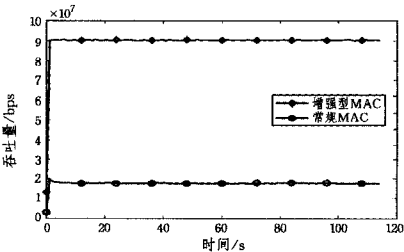


图 4 增强型 MAC 和常规 MAC 的吞吐量对比

对仿真结果进行数学统计得到平均吞吐量 (*Throughput*):

$$\overline{CU} = \overline{Throughput} / R \tag{3}$$

由式(3)可得采用增强型 MAC 协议且聚合帧长为 65535bytes 时, $\overline{CU} = 0.8612$; 不采用 MAC 增强时, $\overline{CU} = 0.1702$, 与理论模型计算的是否采用 MAC 层增强情况下的信道利用率较为一致, 仿真结果较理论计算的信道利用率有 0.05 左右的偏差, 这主要是由于理论模型考虑的是理想信道情况, 忽略了帧聚合时延、排队时延等, 而网络仿真模拟实际的数据传输过程, 更接近实际情况。

对比以上是否采用增强型 MAC 层协议得出的数据可知: 帧聚合与块回复能够有效提高长距离点到点系统的信道利用率和数据吞吐量, 验证了理论计算的结果。

4 不同数据速率、距离和聚合帧大小下的性能研究

为进一步研究不同数据速率、不同聚合帧大小、不同距离时, 帧聚合与块回复对性能的影响(帧聚合与块回复配合使用, 无单独使用其中之一的情形), 设计了以下 3 种仿真场景。

4.1 不同数据速率下有无帧聚合的性能对比

调整数据速率分别为 52Mbps, 65Mbps, 78Mbps, 104Mbps, 130Mbps(其对应的调制编码策略 MCS 如表 1 所列), 在其余参数不变的情况下, 无帧聚合与帧聚合大小为 65535 bytes 时的仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。

表 1 MCS 对应速率表

MCS	调制方式	FEC	空间流数	数据速率/Mbps
5	64-QAM	2/3	1	52
7	64-QAM	5/6	1	65
12	16-QAM	3/4	2	78
13	64-QAM	2/3	2	104
15	64-QAM	5/6	2	130

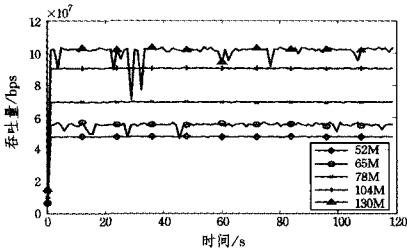


图 5 不同速率下帧聚合的吞吐量

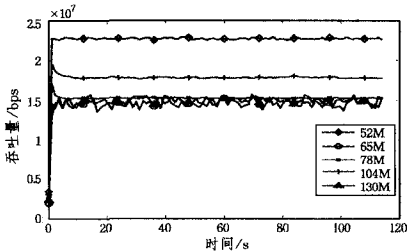


图 6 不同速率下无帧聚合的吞吐量

对比图 5 和图 6 可得: 采用帧聚合和块回复时, 随着数据速率的提高, 吞吐量有明显提升; 而没有帧聚合时, 数据速率

的提升并不会引起吞吐量的提高。此外, 从图 5 中观察到当速率为 130Mbps 和 65Mbps 时, 吞吐量曲线有明显的抖动, 通过观察图 7 中数据包重传曲线可知, 这些抖动是由重传造成的, 因为这两种方式下的 FEC 编码方式均为 5/6, 编码效率的提高导致纠错能力下降, 进而导致数据的重传降低了短时间内的吞吐量。同样, 观察图 8 中无帧聚合情况下的数据包重传曲线可以得知: 图 5 中 52Mbps 和 104Mbps 对应的吞吐量稍高而其余速率对应的吞吐量稍低的原因是由于数据包重传造成的。

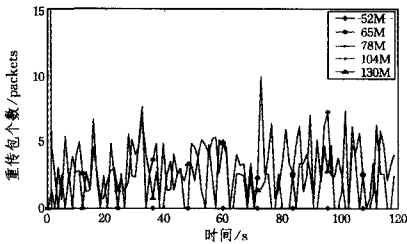


图 7 不同速率下帧聚合重传包个数

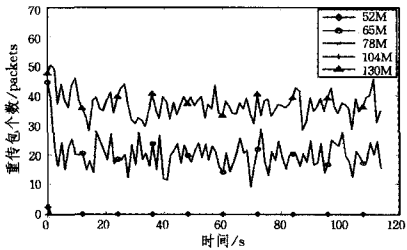


图 8 不同速率下无帧聚合重传包个数

4.2 不同距离下有无帧聚合的性能对比

调整两个站点之间的距离, 分别为 1km, 10km, 20km, 30km 和 40km, 数据速率均为 104Mbps, 且在其余参数不变的情况下, 帧聚合大小为 65535bytes 及无帧聚合时的仿真结果分别如图 9 和图 10 所示。

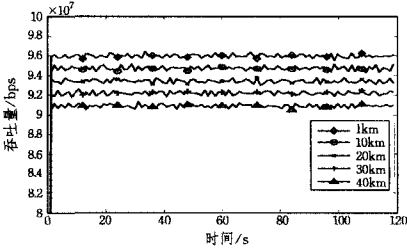


图 9 不同距离帧聚合吞吐量

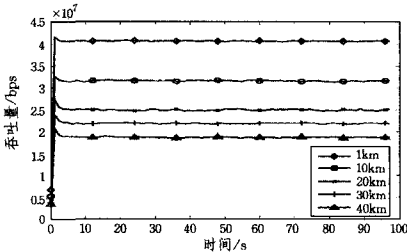


图 10 不同距离无帧聚合吞吐量

由图 9 和图 10 中数据统计可得 $\overline{Throughput}$, 并由式(3)计算的 $\overline{CU}$ 如图 11 所示。

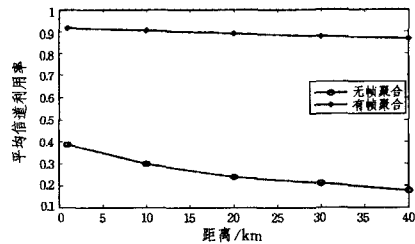


图 11 不同距离下的平均信道利用率

由图 11 可知,在无帧聚合的情况下,随着距离的增加,传播时延逐渐增大,由于传输时延较短,占总时延长度的比例小,导致信道利用率明显下降,40km 时仅能达到 0.1777,大部分时间都用于等待发送机会以及数据和 ACK 在信道中的传播,而节点无法继续发送数据,造成了资源的浪费;在聚合帧长为 65535 bytes 时,节点获得一次发送机会后可以发送一个较大的聚合帧,传播时延与传输时延相比为一个极小的值,即使距离增长也并没有对总时延产生很大的影响,此时,传输时延仍然占总时延的绝大比例,所以信道利用率并没有明显下降。

4.3 聚合帧大小对传输性能的影响

调整聚合帧大小,使其分别为 8191bytes, 16383bytes, 32767bytes, 65535bytes, 数据速率均为 130Mbps, 在其余参数不变的情况下,得到的仿真结果如图 12 所示。

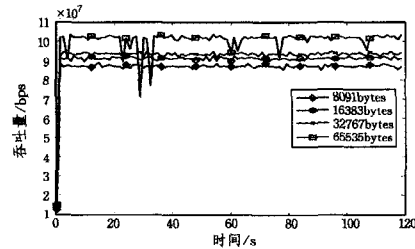


图 12 不同聚合帧大小时的吞吐量

由图 12 所示的吞吐量曲线以及无聚合时的吞吐量曲线统计得到CU,如图 13 所示。

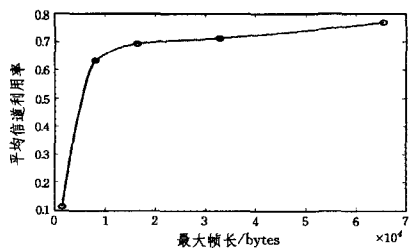


图 13 不同聚合帧大小时平均信道利用率

分析图 13 中的数据可知,帧聚合能有效提高信道利用率,且聚合帧越大,信道利用率越高。

结束语 本文通过计算和仿真分析了 IEEE802. 11n 在长距离无线网络中的性能,主要是 MAC 层增强对信道利用率的提高。帧聚合技术的引入使得数据帧的长度增加,整体上减少了数据包的头部信息,从而提高了数据吞吐量。与帧

聚合技术配合使用的是块确认机制,即针对一个大的聚合帧进行 ACK 确认,整体上减少了确认次数,提高了 MAC 层效率。通过进一步的仿真发现,随着速率的提高,采用帧聚合的网络的吞吐量有明显提升;聚合帧较大时,信道利用率较高;随着距离的增加,无帧聚合的网络的信道利用率急剧下降,而有帧聚合的网络的信道利用率下降得并不明显。

参 考 文 献

[1] RAMAN B,CHEBROLU K. Design and evaluation of a new MAC protocol for long-distance 802. 11 mesh networks[C]// Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM,2005:156-169.

[2] CHEBROLU K, RAMAN B, SEN S. Long-distance 802. 11 b links;performance measurements and experience[C]// Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM,2006:74-85.

[3] PATRA R K, NEDEVSKI S, SURNAN S, et al. WiLDNet: Design and Implementation of High Performance WiFi Based Long Distance Networks[C]// Symposium on Network Systems Design and Implementation. 2007.

[4] NEDEVSKI S, PATRA R K, SURNAN S, et al. An adaptive, high performance mac for long-distance multihop wireless networks[C]// Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2008: 259-270.

[5] BEN-DAVID Y, VALLENTIN M, FOWLER S, et al. Jaldi-MAC: taking the distance further[C]// Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions. ACM, 2010.

[6] ZHAO Z H, WANG N, DOU Z B, et al. Long-Distance IEEE 802. 11 Wireless Mesh Networks; A Survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1209-1222. (in Chinese)

赵增华,王楠,窦志斌,等. 基于 IEEE 802. 11 的长距离无线 Mesh 网络[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1209-1222.

[7] Perahia E, Stacey R. 下一代无线局域网: 802. 11n 的吞吐率、强健性和可靠性[M]. 罗训, 赵利, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010. 9.

[8] GINZBURG B, KESSELMAN A. Performance analysis of A-MPDU and A-MSDU aggregation in IEEE 802. 11n[C]// 2007 IEEE Sarnoff Symposium. IEEE, 2007: 1-5.

[9] ZHAO Z H, ZHANG F C, GUO S P, et al. RainbowRate: MIMO rate adaptation in 802. 11n WiLD links[C]// 2014 IEEE International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). IEEE, 2014: 1-8.

[10] LUDEÑA P, SIMÓ J, ROHODEN K, et al. Performance Evaluation of Long-Distance 802. 11 n Networks[M]. New Contributions in Information Systems and Technologies. Springer International Publishing, 2015: 1033-1043.