移动 Ad hoc 网络中的多信道预约 MAC 协议

邢小琴 刘 凯

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

摘 要：移动 Ad hoc 网络中为有效利用无线信道资源，提出一种多信道预约媒质接入(MRMA，Multichannel Reservation Multiple Access)协议. 该协议在公共信道上发送 Request-to-Send/Clear-to-Send(RTS/CTS)分组预约信道，采用基于 ID 的信道选择方案选择无冲突的业务信道传输数据分组，目的节点成功接收完数据分组后在另一个公共信道上回复 Acknowledgment(ACK)分组，有效避免了暴露终端问题，使得相邻通信节点对可以同时使用相同的业务信道传输数据分组，空分复用大大提高了无线资源的利用率. 采用多信道分别进行不同通信对的业务分组传输解决了在单信道上传输所带来的隐藏终端问题. 仿真结果表明，在总信道利用率和平均分组延迟性能上，MRMA 协议明显优于 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议.

关 键 词：移动 Ad hoc 网络；媒质接入；多信道预约；冲突避免；暴露终端

中图分类号：TN 929.5

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-0842-06

Multichannel reservation MAC protocol for mobile ad hoc networks

Xing Xiaoqin Liu Kai

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A novel multichannel reservation multiple access (MRMA) protocol was presented for efficient channel sharing in mobile ad hoc networks. It employed request-to-send (RTS) and clear-to-send (CTS) dialogue on a common channel and flexibly selected conflict-free traffic channel to accomplish the transmission of data packet based on a novel channel selection scheme. The acknowledgment (ACK) packet for the data packet transmission was replied to the sender over another common channel, which effectively eliminated the influence of exposed terminal problem, and the spatial reuse of the same channel was extended to communication pairs even within 2-hops. In addition, the influence of hidden terminal problem was greatly reduced because most of possible packet collisions on a single channel were avoided due to traffic load balance on multiple channels. Finally, performance comparison of the proposed protocol with the IEEE 802.11 RTS/CTS protocol was provided, and simulation results show that it outperforms the IEEE 802.11 RTS/CTS protocol on total channel utilization and average packet delay.

Key words: mobile ad hoc networks; multiple access; multichannel reservation; collision avoidance; exposed terminal

移动 Ad hoc 网络是一种不需要固定基础设施支撑的、由若干移动节点组成的无线自组织网络. 该网络没有预先确定的拓扑结构和中心控制. 它的一个关键设计问题是媒质接入，也就是多个用户共享公共信道资源的方式. 目前，为解决移动 Ad hoc 网络中多个用户共享公共信道资源的问

收稿日期：2008-09-16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(10577005)；国家863计划资助项目(2006AA11Z232)；北京航空航天大学“蓝天新星”计划项目(221235)

作者简介：邢小琴(1982—)，女，重庆人，硕士生，xingxiaoqin@ee.buaa.edu.cn.

题提出了许多媒质接入协议[1-2],这些协议大多采用随机接入方式或者随机接入方式与其它接入方式相结合的混合方式.典型的纯随机接入方式是 IEEE 802.11 MAC 协议中的 RTS/CTS(Request-to-Send/Clear-to-Send)模式[3],协议采用 RTS/CTS 握手方式将数据分组上较长的冲突时间缩小到较短的 RTS/CTS 分组传输时间上.依据用户妥善安排的媒质接入协议[4]采用混合接入方式.协议中,处于活动态的节点在中心接入节点或群首的帮助下,无冲突地随机竞争接入信道并获取轮询服务.不过,这类协议需要事先通过信息交互选择群首,并且群首的传输业务太多,携带的能量会很快耗尽,因此不能有效适用于移动 Ad hoc 网络.空基通信网络中使用的甚高频数据链模式 4 采用自组织时分媒质接入协议[5],可支持空中节点之间以及空中节点与地面节点之间的通信.但是它需要依靠全球卫星导航系统来达到严格的时间同步,大大增加了系统的复杂度.并且由于传输业务的突发性,移动节点不能立即使用释放的时隙.此外,那些基于随机预约按需服务的冲突避免方式在高业务量情况下,因存在大量的预约冲突而不适用于目前高负荷和大量移动节点的网络情况.

采用多信道传输方式有利于具有突发性业务的移动节点更有效地使用信道资源.多信道协议包括有控制信道和无控制信道两类.无控制信道协议中,大多是将基于 CSMA/CA 的单信道协议简单应用于多信道中[6],并没有充分利用多信道的优势,信道使用效率不高.在控制信道类媒质接入协议中划分单独的控制信道用于传输控制分组预约业务信道,预约成功的节点对转移到相应的业务信道上接收/发送数据分组,如动态信道分配(DCA,Dynamic Channel Assignment)[7]协议和协同异步多信道(CAM-MAC,Cooperative Asynchronous Multichannel MAC)[8]协议.在 DCA 协议中,为了获得准确的业务信道信息,每个节点需要两台工作在半双工模式的无线收/发机.CAM-MAC 协议采用四握手的方式预约业务信道,空闲节点辅助相邻节点选择业务信道,带来较大的控制开销.不管是 DCA 还是 CAM-MAC 协议都没有解决暴露终端问题.为有效利用信道资源,提出一种可解决暴露终端的媒质接入协议,即 MRMA(Multichannel Reservation Multiple Access)协议.

1　网络模型

网络中各节点仅有一部工作在半双工模式的无线收/发信机,且拥有一个互不相同的 ID 号.无线信道资源被分成若干份(总信道数记为 N_{CH}),其中两个为公共信道(分别记为 C_1 和 C_2)用来传输控制分组(RTS 分组、CTS 分组)和 ACK(Acknowledgment)分组.其余为业务信道(TCH,Traffic Channal,第 i 个业务信道简写为 T_i)用来传输业务分组.每个节点维护一个信道使用表,用来纪录各业务信道的状态(忙/闲)和必要的参数(比如,信道忙状态的结束时间等).假定 RTS/CTS 分组中包含目的节点和发送节点的 ID 号.节点在不接收或发送任何分组时侦听公共信道 C_1,并将侦听到的各业务信道使用情况记录到信道使用表中.通过侦听信道 C_1 上传输的控制分组也可以获得各自的一跳、两跳节点信息.

忽略事件处理过程花费的时间,假设节点接收到分组后立即回复相应的分组.用 t_p 表示传播时延,t_{rt} 表示收发转换时间,那么发送节点发出最后一个比特到目的节点发送回复分组的第一个比特的时间间隔为 τ,且 $\tau = t_p + t_{rt}$.本文只考虑 MAC 协议性能,故可假定分组接收失败只由多个分组在同一个信道上同时传输时因分组发送重叠引起,而不是由信道错误引起.

2　MRMA 协议

2.1　基本协议描述

在 MRMA 协议中,若节点 A 有业务分组要发送给节点 B,节点 A 首先侦听公共信道 C_1,如果信道忙则等待直到信道空闲.如果信道空闲则随机等待一个时间间隔(如图 1 中所示的竞争窗),此后若信道仍然空闲,则立刻发送 RTS 分组,并在 RTS 分组中指定一个空闲业务信道 T_i,业务信道的选择采用基于 ID 的信道选择方案(见 2.2 节).节点 B 接收完 RTS 分组并且核查自己的信道使用表,证实其中指定的业务信道可用,则在公共信道 C_1 上回复 CTS 分组.节点 A 收到 CTS 分组后在选定的业务信道 T_i 上传输数据分组.节点 B 成功接收完数据分组后在公共信道 C_2 上回复 ACK 分组.图 1 为协议的基本原理图.

2.2　信道选择方案

假设节点 A 与节点 B 正在通信(传输的信息可能为 RTS 分组、CTS 分组、数据分组或 ACK 分组),节点 C 或 D 在节点 A 或 B 的一跳范围内.若节点 C 有数据分组要发送给节点 D,则此时可供节点 C 选择的业务信道分别为默认信道、未使用信道和无冲突信道.

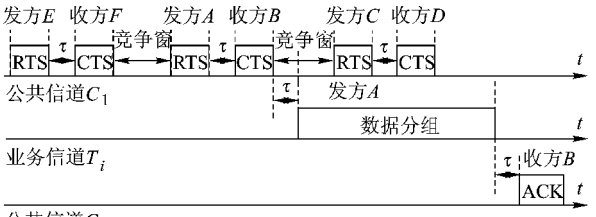


图1 MRMA协议的基本原理

通信节点对 C 和 D 的默认信道记为第 j 个业务信道 T_j，其中 $j=[(C+D)/2]\bmod(N_{CH}-2)$，(用节点标志字母代表节点的ID号). 同样地通信节点对 A 和 B 的默认信道记为第 i 个业务信道 T_i，其中 $i=[(A+B)/2]\bmod(N_{CH}-2)$.

节点 C 知道自己的邻节点和两跳可达节点内(节点 D 和自身节点除外)的任何一个可能的通信节点对(假设为节点 X 和节点 Y)，以及 X 和 Y 的默认信道 T_k，其中 $k=[(X+Y)/2]\bmod(N_{CH}-2)$. $\Phi_{adjacen}$ 表示所有可能的 X 和 Y 的默认信道集合，Φ_{TCH} 表示所有的业务信道集合，则未使用信道集合为 $\Phi_{unused}=\Phi_{TCH}-\Phi_{adjacen}$.

相对于已经存在的通信节点对 A 和 B，通信节点对 C 和 D 的无冲突信道为 T_α，T_β，T_γ 和 T_δ. 其中 α，β，γ 和 δ 分别为：$\alpha=[(A+C)/2]\bmod(N_{CH}-2)$，$\beta=[(B+C)/2]\bmod(N_{CH}-2)$，$\gamma=[(A+D)/2]\bmod(N_{CH}-2)$，$\delta=[(B+D)/2]\bmod(N_{CH}-2)$.

综上，当节点 A 和 B 已经开始传输信息时，相邻节点 C 有数据分组要发送给节点 D 则可以按照以下步骤选择无冲突的业务信道：①若通信节点对 C 和 D 的默认信道空闲可用，则首选默认信道；②若默认信道不可用，则选择可用的未使用信道；③若前两种信道皆不可用且无冲突信道存在，则依次选择可用的无冲突信道 T_α，T_β，T_γ 或 T_δ；④若仍无可用的业务信道，则节点 C 放弃发送信息给节点 D 以避免与相邻通信节点对发生冲突，并退避等待默认信道空闲后重新预约信道.

2.3 冲突避免特性

采用多信道方式平衡业务传输，可以避免大部分单信道传输中隐藏终端引起的冲突，有利于充分利用多个业务信道. 采用单信道传输，如图2所示，假设节点 A 与 B 正在通信，由于 t_p 和 t_{rt} 的存在，处于隐藏终端的节点 C 可能在时间 τ 内，没来得及侦听到节点 B 发送的CTS分组而判断信道空闲，发送RTS分组给节点 D. 这两个通信节点对分别握手成功，节点 C 和 A 同时发送数据分组，在节点 B 处发生冲突，导致节点 B 接收节点 A 发送的数据分组失败. 也就是说，即使收/发双方节点握手成功，仍然可能会发生数据分组传输冲突. 而本协议采用多信道传输，在公共信道上发送RTS/CTS分组握手，将较长数据分组传输的冲突转移到较小的控制分组传输中，收/发双方只要握手成功，数据分组将在指定的业务信道上实现无冲突传输.

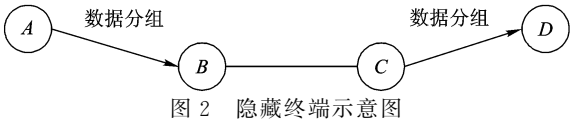
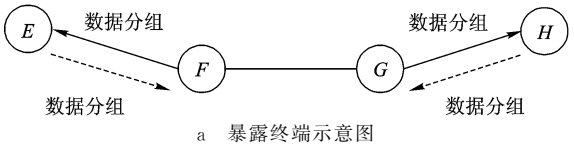
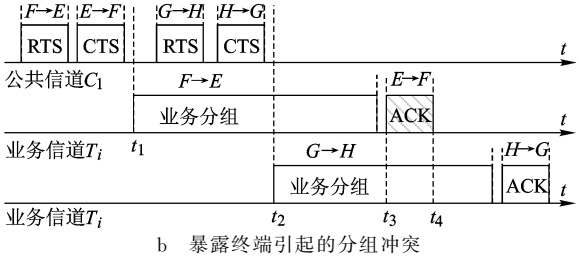


图2 隐藏终端示意图

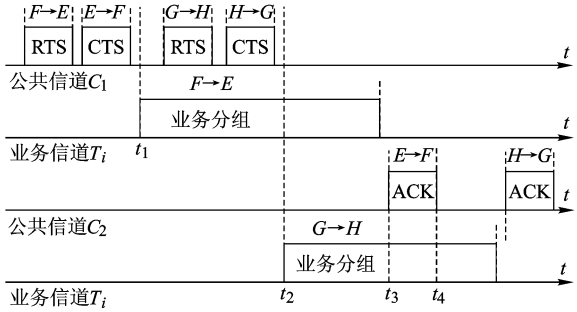
在多信道接入协议[7]中，ACK分组和数据分组一般都在业务信道上传输. 而在本协议中ACK分组在专用信道 C_2 上进行，有效避免了前者因为ACK分组和CTS分组传输带来的暴露终端问题. 在图3a中，节点 F 与节点 E，G 相距一跳，节点 G 与节点 F，H 相距一跳，并且节点 E，G 相距两跳，节点 F，H 相距两跳.



a 暴露终端示意图



b 暴露终端引起的分组冲突



c 暴露终端引起的分组冲突—冲突避免

图3 暴露终端问题及解决方案

如图3a中实线所示，当节点 F 有数据分组要发送给节点 E，节点 G 有数据分组要发送给节点 H 时，节点 G，F 互为发送型暴露终端. 如果通信节点对 F，E，通信节点对 G，H 使用相同的信道 T_i 传输数据分组，若采用一般协议中将ACK分组和数据分组在同一个业务信道上传输的方法，则会发生冲突：节点 F，G 分别在信道 T_i 上发

送数据分组(假设节点 F,E 先于节点 G,H 接入成功),当节点 F 发送完数据分组后在 T_i 上接收 ACK 分组时,节点 G 还在向 H 发送数据分组,此时在节点 F 处将发生冲突导致节点 F 接收 ACK 分组失败. 而在 MRMA 协议中,节点 F 将在信道 C_2 上接收 ACK 分组,从而避免了上述冲突,见图 3c. 同理如图 3a 中虚线所示,当节点 E 有数据分组要发送给节点 F、节点 H 有数据分组要发送给节点 G 时,采用 ACK 分组在 C_2 上传输的方法,可以同时使用相同的业务信道传输数据分组.

综上所述,采用 ACK 分组在专用信道 C_2 上传输的方法,相邻通信节点对即使同时使用同一个业务信道传输数据分组也不会发生冲突. 业务信道的空分复用大大提高了信道利用率.

3　性能评估

本文利用网络仿真工具 OPNET 对 MRMA 协议进行仿真,并与 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议比较,评估协议性能. 仿真中主要考虑 3 个性能指标,总信道利用率、平均信道利用率和平均分组延迟. 总信道利用率定义为网络中所有信道上成功传输的分组所消耗的总时间与总仿真时间的比值;平均信道利用率定义为总信道利用率与信道总数的比值;平均分组延迟定义为平均每个分组从产生到正确接收所需要的时间.

3.1　仿真环境

考虑无线网络中 $N=50$ 个节点均匀分布在 1 km×1 km 的区域内,节点通信范围为 $R=0.3$ km,则点到点的平均跳数为 2.4,平均邻节点数为 10. 考虑到移动 Ad hoc 网络中节点的移动性,在相同场景下随机产生 10 个不同的拓扑结构,将不同拓扑结构下运行仿真获得的结果求平均作为最终的仿真结果. 分组长度分别记为 L_{RTS},L_{CTS},L_{PKT} 和 L_{ACK},其中 $L_{RTS}=L_{CTS}=L_{ACK}=0.256$ kbit,$L_{PKT}=8$ kbit. 公共信道和业务信道传输速率分别记为 $R_{b\text{-}C1}$,$R_{b\text{-}C2}$ 和 $R_{b\text{-}TCH}$,各分组传输时间记为 t_{RTS},t_{CTS},t_{PKT} 和 t_{ACK}. 为减小网络的控制开销,这里取 $R_{b\text{-}C1}=R_{b\text{-}C2}=0.5$ Mbit/s,$R_{b\text{-}TCH}=1$ Mbit/s. 每个节点数据分组的产生服从 Poisson 过程(到达 λ 个/s).

在 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议的仿真中,信道传输速率为 1 Mbit/s,数据分组长度 $L_{PKT}=4$ kbit,其余参数均与 MRMA 协议的参数设置相同,可保证在上述两种协议中,RTS/CTS 分组握手所用时间与传输数据分组所用时间之比相同(均为 1:8).

3.2　与 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议仿真比较

图 4 和图 5 分别为 MRMA 协议在 $N_{TCH}=2,3,4,6,8,10,12,14,18$ 和 22 时,与 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议在总信道利用率和平均分组延迟上的比较. 从图中可以看出,当传输负载 G 较小的时候,无线信道资源尚能满足传输需求,分组冲突少,信道利用率高、分组延迟小. 随着业务量 G 的增大,MRMA 协议性能远远优于 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议,有较高的总信道利用率、较低的分组延迟. 其原因在于在 MRMA 协议中采用了灵活的信道分配策略,使得网络中的各节点有更大的机会成功接入信道无冲突传输数据分组. 另外,ACK 分组在专用公共信道 C_2 上传输的方式有效避免了暴露终端带来的资源浪费问题,大大提高了信道利用率.

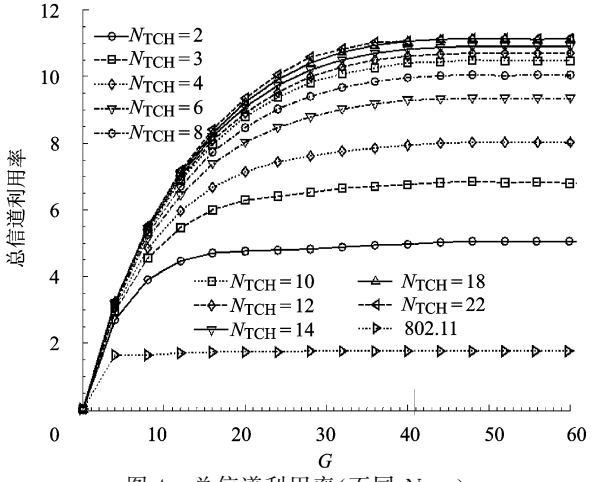


图 4　总信道利用率(不同 N_{TCH})

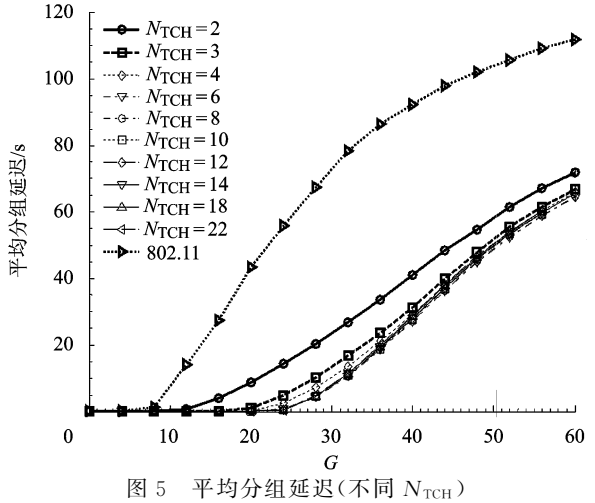


图 5　平均分组延迟(不同 N_{TCH})

3.3　数据分组长度对协议性能的影响

图 6 和图 7 是在业务信道数 $N_{TCH}=3,6$,$L_{RTS}=1,2,4,8,16$ 和 32 kbit 的条件下,信道利用率和平均分组延迟随业务量 G 的增加而变化的

曲线.从图中可以看出,在相同 N_{TCH} 情况下,L_{PKT} 越大,协议性能越好.这是因为 L_{PKT} 增加,而 L_{RTS} 和 L_{CTS} 大小不变,两者的比值增大,有利于减轻控制信道的瓶颈作用;L_{PKT} 越大,业务信道有效使用时间越长,利用率也越高.如图,在相同 L_{PKT} 的情况下,$N_{TCH}=3$ 时协议的性能显然优于 $N_{TCH}=6$ 时的协议的性能.

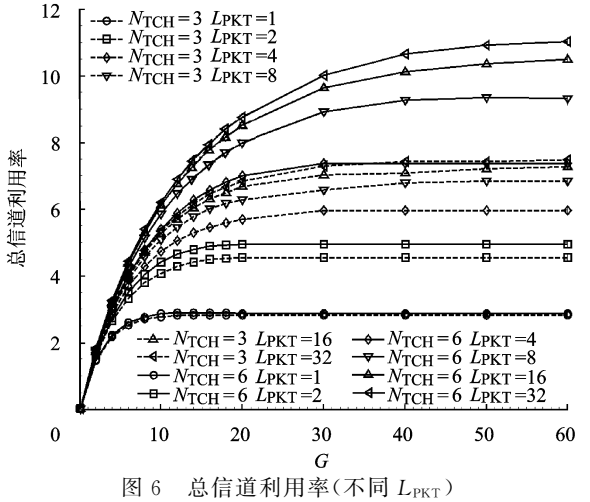


图6 总信道利用率(不同 L_{PKT})

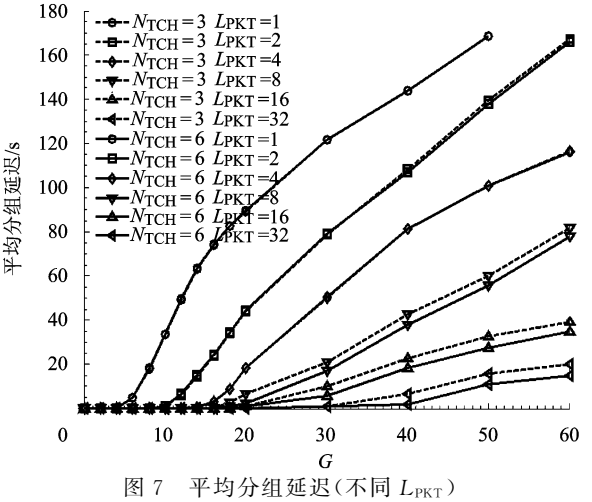


图7 平均分组延迟(不同 L_{PKT})

3.4 $R_{b\text{-}CCH}$ 对协议性能的影响

图8和图9是 $N_{TCH}=3$ 和6,控制信道传输速率 R_b($R_{b\text{-}C1}=R_{b\text{-}C2}$,在图中统一用 R_b 表示)分别为2,1,0.5,0.25和0.125Mbit/s的条件下,平均信道利用率和平均分组延迟随业务量 G 的增加而变化的曲线.可以看出在相同条件下,平均分组延迟随着 R_b 的增加而减小,而平均信道利用率随着 R_b 的增加呈先增长后减小的趋势.平均信道利用率跟业务信道的总传输速率与公共信道的总传输速率之比相关.若控制信道的传输速率较小,($t_{RTS}+t_{CTS}$)增大,t_{PKT} 与($t_{RTS}+t_{CTS}$)的比值减小,控制信道的瓶颈作用加重,所能分配的最大业务量减小,业务信道利用率小;若公共信道传输速率较大,有利于减轻控制信道的瓶颈作用,总信道利用率增加.但是平衡掉控制信道的开销,平均每个信道的利用率降低.要得到较高的平均信道利用率,必须选择合适的控制信道传输速率.仿真实验结果表明,如图8所示,当 $N_{TCH}=3$,$R_b=0.5$ Mbit/s时,平均每个信道的利用率达到最大;而当 $N_{TCH}=6$,$R_b=1$ Mbit/s时,平均每个信道的利用率达到最大.

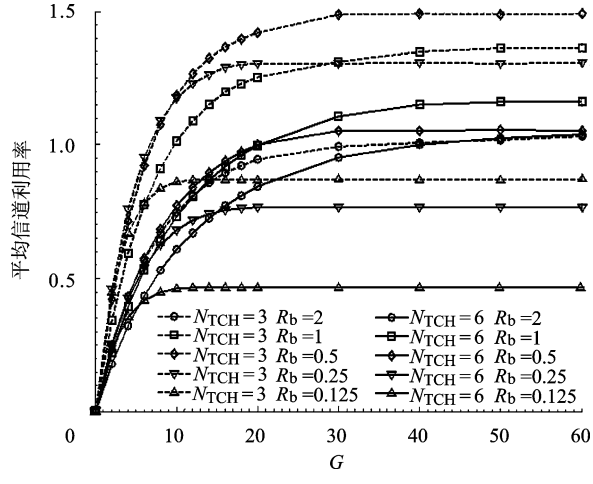


图8 平均信道利用率(不同 R_b)

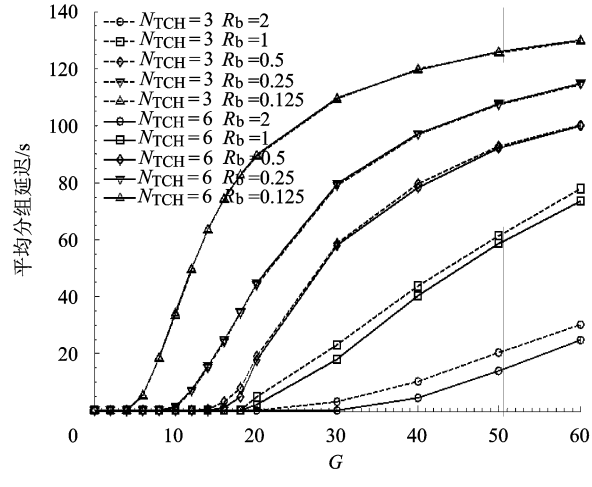


图9 平均分组延迟(不同 R_b)

4 结束语

移动Ad hoc网络中为有效利用无线信道资源,提出了一种新的多信道预约媒质接入协议.该协议在公共信道上发送RTS/CTS分组实现握手,采用灵活的信道选择方案选择无冲突的业务信道传输数据分组,接收节点成功接收完数据分组后在另一个公共信道上回复ACK分组.灵活的信道选择方案和专用信道传输ACK分组相结合的方式,有效避免了暴露终端带来的信道资源浪费问题.最后,利用网络仿真工具OPNET对

MRMA 协议进行了仿真评估,并与 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议进行比较.仿真结果表明,在总信道利用率和平均分组延迟性能上,MRMA 协议明显优于 IEEE 802.11 RTS/CTS 协议.

参考文献(References)

[1] Jurdak Raja, Lopes Cristina Videira, Baldi Pierre. A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(1):2－16

[2] Kumar Sunil, Raghavan Vineet S, Deng Jing. Medium access control protocol for ad hoc wireless networks: a survey [J]. Elsevier Ad-Hoc Networks Journal, 2006, 4(3):326－358

[3] IEEE 802. 11-1999. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]

[4] Liu Kai, Li Jiandong, Han James, et al. Performance analysis of UPMA protocol for wireless multihop mobile ad hoc networks[C]//IEEE WCNC 2003. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2003:971－976

[5] ICAO Standard, Doc 9816, AN/448. Manual on VHF digital link (VDL) mode 4[S]

[6] Nasipuri A, Zhuang J, Das S R. A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks[C]// IEEE WCNC 1999. New Orleans, LA, USA: IEEE, 1999:1402－1406

[7] Wu S L, Lin C Y, Tseng Y C, et al. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks[C]//International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. Dallas, TX, USA: IEEE, 2000:232－237

[8] Luo Tie, Motani Mehul, Srinivasan Vikram. CAM-MAC: a cooperative asynchronous multiChannel MAC protocol for ad hoc networks[C]//The 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems. San Jose, CA, USA: IEEE, 2006:1－10

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 788 页)

[2] 王玮,周海云,尹国举.使用混合 Beta 分布的 Bayes 方法[J].系统工程理论与实践,2005(9):142－144
Wang Wei, Zhou Haiyun, Yin Guoju. Bayes method with mixed beta distribution[J]. System Engineering-Theory & Practice, 2005(9): 142－144 (in Chinese)

[3] Martz H F, Waller R A. Bayesian reliability analysis[M]. New York: Wiley, 1982

[4] Bernardo J, Smith A F M. Bayesian theory[M]. New York: Wiley, 1994

[5] 茆诗松.统计手册[M].北京:科学出版社,2003
Mao Shisong. Bayes statistics handbook[M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)

[6] Kotz Samuel,吴喜之.现代贝叶斯统计学[M].北京:中国统计出版社,2000
Kotz Samuel, Wu Xizhi. Modern Bayesian statistics [M]. Beijing: China Statistics Press, 2000 (in Chinese)

[7] 《现代数学手册》编纂委员会.现代数学手册:随机数学卷[M].武汉:华中科技大学出版社,2000
Compiling Committee of Modern Mathematics Handbook. Modern mathematics handbook: stochastic mathematics volume[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000 (in Chinese)

[8] Natarajan R, McCulloch C E. A note on the existence of the posterior distribution for a class of mixed models for binomial responses[J]. Biometrika, 1995, 82(3):639－643

[9] 王建霞,郭波.融合研制各阶段试验信息的成败型产品可靠性 Bayes 评估[J].兵工自动化,2006(12):31－32
Wang Jianxia, Guo Bo. Bayes assessment for reliability of success or failure product based on fusing test information of development phases [J]. Ordnance Inustry Automation, 2006(12): 31－32 (in Chinese)

[10] Zhou Meili. Principles and practice of similarity system theory[J]. International Journal of General Systems, 1994, 23(1):39－48

[11] Zhou Meili. Principles of similarity formation between similar systems[J]. International Journal of General Systems, 1999, 27(6):495－504

[12] 周美立.相似性科学[M].北京:科学出版社,2004
Zhou Meili. Similarity science[M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)

[13] 周美立.单元化系统集成设计中的相似性与复杂性[J].中国机械工程,2004,15(7):604－607
Zhou Meili. Similarity and complexity in unitization system integrated design [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(7):604－607 (in Chinese)

[14] 常传勇,周美立.系统相似度量中特征选择方法[J].机械工程师,2005(6):68－70
Chang Chuanyong, Zhou Meili. The method of characteristics selection in measuring similar system[J]. Mechanical Engineer, 2005(6):68－70 (in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)