

基于多步信道预约机制的多址接入协议研究

陈 轶 李 波

(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

摘 要 无线自组织网络(Ad Hoc 网络)中实时业务的传输需要网络协议提供较为可靠的服务质量保证(QoS 保证),而现有多址接入协议一般未能提供较好的 QoS 支持。在单步信道预约思想的基础上,提出了一种基于更为可靠的多步信道预约机制的多址接入协议,其利用实时业务分组的周期性特点,对无线信道资源进行多步预约,从而保证了实时业务的可靠传输。仿真实验表明,相较于单步信道预约机制,多步信道预约机制对网络的多址接入性能有较好的改进。

关键词 多步信道预约,多址接入协议,无线自组织网络,服务质量保证

中图法分类号 TP393.17 **文献标识码** A

Research of a MAC Protocol Based on Multiple-step Channel Reservation Mechanism

CHEN Yi LI Bo

(School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract Real-time traffic transmission over wireless Ad hoc networks requires authentic and reliable QoS assurance from wireless network protocols, which is not available from most of the current MAC protocols. Considering the periodicity of real-time traffic, a MAC protocol based on multiple-step channel reservation mechanism was proposed, which guarantees more reliable transmission for real-time frames. Simulation results and analysis obviously indicate that the protocol raises the network performance to a more excellent level.

Keywords Multiple-step reservation, MAC protocol, Ad hoc, QoS

无线自组织网络(Ad hoc 网络)是由带有无线收发装置的移动终端组成的多跳无线局域网。Ad hoc 网络的建立不需要预先建立网络基础设施,也不用设置任何中心控制节点,可广泛用于军事战场、民用通信、车载网络等场合。

随着无线网络技术的不断发展,多媒体实时业务(视频、音频等)在 Ad hoc 网络中的传输逐步成为人们的研究热点,但许多现有无线网络 MAC 协议在实时业务服务质量(QoS)上考虑不够充分。多媒体实时业务的特点在于其周期性较强,每个数据分组之间时间间隔相对固定。IEEE 802.11 标准^[1]是目前无线局域网多址接入技术公认的国际标准,它以载波侦听冲突避免(CSMA/CA)为基础,但是缺少稳定的实时性保证。文献[2]提出了基于预约的信道接入算法,该算法合理利用了实时分组的周期性,但是当无线网络的负载增加时,丢包率有较为明显的上升。文献[3]在同步的单跳 Ad hoc 网络中提出了多步预约 MAC 协议 m-DIBCR,有效地降低了误帧率,但是没有进一步考虑在多跳无线网络下的数据传输情况,并且实时业务与非实时业务的传输方式没有加以区别。

基于以上工作,本文进一步在多跳网络通信环境下提出了一种基于多步信道预约的多址接入协议,它结合 m-DIBCR 算法的思想,在信道预约机制^[2]的基础上,有效提高了预约成

功率,对多跳 Ad hoc 网络的实时分组传输性能有显著的改进。

本文第 1 节对主要 Ad hoc 网络 MAC 协议进行简要介绍;第 2 节提出多步信道预约 MAC 协议;第 3 节展示仿真结果并加以分析;最后进行总结。

1 多址接入协议

1.1 IEEE 802.11 DCF

DCF^[1]是 IEEE 802.11 工作组制定的用于无线局域网的多址接入协议。它以载波侦听和冲突避免(CSMA/CA)为基础,采用二进制退避的方法进行信道接入。退避是指在范围为 $[0, CW-1]$ 的竞争窗口中随机选取一个数值作为倒计时计数器的初始值,每过一个信道空闲时隙,退避计数器减 1 直至为 0 的过程,其中 $CW=2^i$ ($4 \leq i \leq 10$)。若退避过程中检测到信道变忙,则暂停退避直至信道空闲。当节点的退避计数器退避至 0 并且信道保持空闲,则发送分组。如果发送成功,就将竞争窗口大小恢复到最小值;否则将竞争窗口大小加倍,继续退避,图 1 为基于退避的 DCF 基本工作原理图。

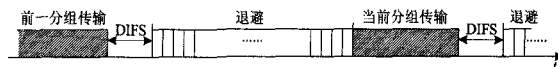


图 1 IEEE 802.11 DCF 退避机制工作原理

到稿日期:2010-04-22 返修日期:2010-07-26 本文受自然科学基金(60872045, 60572144),教育部新世纪优秀人才支持计划(CET-06-0876),西北工业大学基础研究基金(W018105),西北工业大学科技创新基金(2008KJ01005),航空科学基金项目(20095553026)资助。

陈 轶(1985—),男,硕士生,主要研究方向为无线多媒体通信网络,E-mail:crownfe@163.com;李 波(1971—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线多媒体通信网络。

IEEE 802.11 DCF 算法中采用的 CSMA/CA 随机退避机制没有考虑实时业务的周期性特点,并且没有较稳定的实时性保证,因此难以对多媒体业务提供 QoS 支持。

1.2 EDCAF

802.11 工作组在 IEEE 802.11e 标准中采用了增强的 DCF 机制^[4],称为 EDCAF。在该协议中,不同优先级的数据分组采用不同的传输方式。高优先级的数据分组在接入信道时,获得的最小竞争窗更小,数据交换过程中的帧间等待时间也较短。EDCAF 可以使得高优先级的业务具有较低的传输延迟,但是许多低优先级的数据分组(例如非实时数据分组等)可能会由于无法竞争到信道的使用权而不得不放弃数据分组的传输;另外,EDCAF 同样是基于信道竞争的接入方式,因此难以克服在网络负载较大时的冲突问题。

1.3 信道预约机制

考虑到实时业务每个数据分组之间以一定时间周期到来的特点,文献^[2]提出了信道预约机制。该算法在网络中假设实时业务分组的周期为 t_{cycle} ,当实时节点发送一个实时分组时,在当前分组中携带下一个实时分组的发送预约。邻居节点收到当前发送的分组后,将预约信息写入自己的预约表,并在预约信息指定的时间,即下一个实时分组的发送时间内避免接入信道,从而回避了可能的分组冲突。

信道预约的工作原理如图 2 所示^[2]。发送节点在第一个实时数据包 R-PKT₁ 中携带了在 t_{cycle} 之后将要发送的 R-PKT₂ 的发送预约;接收节点收到 R-PKT₁ 后,也将 R-PKT₂ 的接收预约信息携带在 R-ACK 中广播;邻节点收到 R-PKT₁ 或 R-ACK 之后,将 R-PKT₂ 的预约信息写入自己的预约表,这样邻节点在发送 R-PKT₂ 的时间段内将回避信道接入,从而避免了分组冲突。

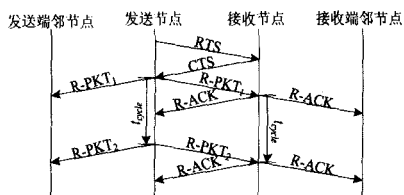


图 2 单步信道预约工作原理

单步预约虽然能够在一定程度上提高 MAC 协议对实时业务的支持,但由于无线信道的不稳定性以及各种分组冲突的存在,使得预约存在不稳定性。在节点数量较多、网络负载较大或信道条件不理想等情况下,实时业务的 QoS 支持能力将大幅下降。

1.4 m-DIBDR

文献^[3]在单跳 Ad hoc 网络下提出了多步带内预约 MAC 协议 m-DIBCR,并在文献^[5]中进行了详细的性能分析。节点发送数据分组时,将预约信息携带在数据分组中进行广播,对数据队列中的多个数据分组进行信道预约。该协议假设每个节点均可以对网络中其他所有节点的数据发送进行侦听;节点在同步的时隙中进行数据交换。

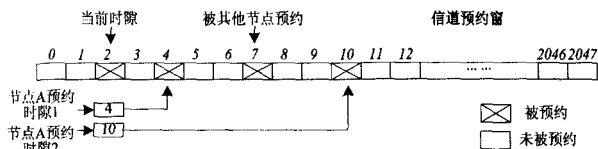


图 3 m-DIBCR 信道预约窗(2步预约)

图 3 所示为采用 2 步预约的 m-DIBCR 协议工作原理示意图^[3],假设当前时隙为时隙 2,节点 A 发送数据分组时,对后续两个数据分组进行信道预约,预约时隙为时隙 4 与时隙 10。邻居节点收到该数据分组后,在信道预约窗中将时隙 4 与时隙 10 置忙,并在这两个时隙中不进行信道接入与数据发送,从而避免了与节点 A 可能发生的数据分组发送冲突,降低了冲突概率。

该协议中实时业务与非实时业务的发送方式没有加以区别,并且网络节点均处于一跳范围内,要求严格的时隙同步。在实际多跳 Ad hoc 网络中,节点之间的同步常常难以实现,并且有必要将不同的业务类型区分对待。

2 多步信道预约机制

2.1 基本思想

在 1.3 小节提到的信道预约机制中,实时业务收发节点只对下一个周期的实时分组发送进行预约。由于无线信道的不稳定与网络中大量存在的分组冲突,使得数据分组的传输本身具有不可靠性,因此单步预约在节点数量较多、网络负载较大或信道条件不理想等情况下,无法对实时业务提供较为可靠的 QoS 保障。针对这一问题,结合 m-DIBCR 协议,引入了多跳 Ad hoc 网络中多步信道预约协议的概念。

与单步信道预约机制相同,本协议认为实时业务每个分组之间的时间间隔为固定长度,即实时分组的产生具有周期性特征,而非实时分组的产生时间间隔服从指数分布。网络节点可以合理利用实时业务的周期性,对无线信道进行周期性的预约。在发送节点发送实时分组(RPK)或接收节点发送实时 ACK(RACK)时,分组的数据头部增加一个数据域,以表示所预约的数据分组个数,称为预约步数。如“3”表示预约接下来将要发送的三个数据分组,即预约 3 步,“0”表示不进行信道预约。以 m 代表预约步数,则任何收到预约信息的节点为预约信息的源节点进行 m 个周期的信道预约。

如图 4 所示,若采用 3 步预约,则发送节点在发送实时分组 RPK 时,对之后连续三个周期的数据传输进行信道预约,正确收到该分组的节点将 3 步预约信息写入自己的预约信息表;接收节点返回 RACK 时,同样对接下来 3 个周期进行接收预约;收到 RACK 的节点将 3 步预约信息存入自己的预约信息表。在预约表标识的时间段内,邻节点将不能进行信道接入,避免分组冲突。

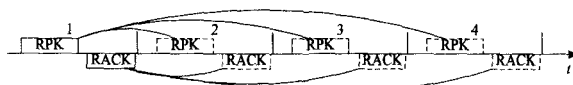


图 4 实时业务 3 步信道预约原理

2.2 信道接入过程

非实时分组与实时分组(RPK)的收发节点在信道接入过程上有较大区别。

非实时节点在发送每个数据分组时,首先按照 IEEE 802.11 DCF 协议中采用的 CSMA/CA 退避机制进行随机退避,退避值递减为 0 后,节点将检查预约表中的预约信息,若预约表中的预约时间与当前分组的数据收发时间不发生冲突,则开始 RTS/CTS 握手,否则将重新开始退避。

实时节点信道接入过程如图 5 所示。在发送第一个实时分组时,与非实时节点一样,首先完成随机退避,然后在预约信息与当前数据分组收发不冲突的情况下进行 RTS/CTS 握

手;在发送 RPK 或 RACK 时,进行 m 步信道预约,对将要发送或接收的 m 个实时分组进行信道预约。

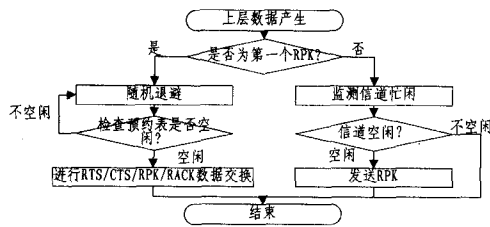


图5 实时节点信道接入流程

在完成第一个实时分组的发送或接收以后,节点在第二个周期中将不会重新进行 RTS/CTS 握手,而是进行信道监听,若信道空闲,则直接进行实时数据分组的发送。由于前一个 RPK 中已经携带了对当前 RPK 的预约信息,因此正确接收到预约信息的邻节点将不会在该时段内同时进行数据收发,从而保证了当前实时分组的正确接收,并确保了对数据传输的 QoS 支持。

由于信道衰落以及各种数据冲突的存在,实时节点的邻节点可能不会正确接收到预约信息,并占用本属于实时分组收发的信道资源,导致实时分组不能正常发送或接收。在这种情况下,实时节点应放弃之前的信道预约,重新开始竞争信道,发起新的信道预约。

多步预约相对于单步预约最大的改进在于,对于某一个周期的实时分组传输可以进行多次预约,从而增强该实时分组的预约稳定性。如图6所示,若采用3步预约,第1个 RPK 会对第4个实时分组传输进行预约,同样在发送第2,3个 RPK 时,也会第4个分组进行预约,这样第4个 RPK 在实际传输之前已经分别进行了3次预约,从而大大提高了预约的稳定性。

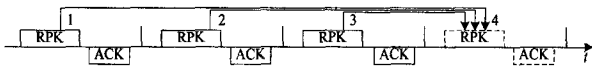


图6 3步预约的信道预约稳定性分析

3 仿真结果

为了评估多步信道预约机制的性能,本文利用 OPNET Modeler 网络仿真软件对单步预约与多步信道预约协议分别进行了仿真^[6]。由于在相关文献中已经对实时业务与非实时业务进行了对比,因此本文重点关注 MAC 协议对实时分组传输质量的影响,仿真侧重于实时业务的网络性能。

仿真中所有的网络节点分布在 $750\text{m} \times 750\text{m}$ 的矩形区域内,分别在表1所列两种网络规模下测试实时分组传输性能,以较全面地反映各种不同网络环境下的性能。在编号为1的拓扑中,非实时节点等间距分布成4列,代表规模较小的 Ad hoc 网络,节点个数较小;在编号为2的拓扑中,非实时节点等间距分布成5列,代表规模较大的 Ad hoc 网络,节点个数较多,业务量较大;一对实时业务节点收发对位于整个网络中间,两者相距100m。

设置数据分组长度均为1k字节,非实时分组产生时间间隔服从指数分布,作为网络负载与背景业务;实时分组发送周期为0.03s,分别令实时节点预约步数为1,2,3步,在不同非实时业务分组负载下,统计实时数据分组冲突概率,以反映其传输稳定性。本文物理层仿真模型的参数设置完全依照

IEEE 802.11a 的相关规定,其中卷积编码速率为 $3/4$,调制方式为 QPSK。

表1 仿真网络拓扑配置

拓扑编号	网络规模	非实时节点间距(米)	非实时节点个数(个)	非实时节点分布特点
1	较小	100	16	间距适中,分布相对集中
2	较大	50	60	间距较小,节点相对集中,网络整体规模较大

图7为在表1所列编号为1的拓扑下,各种预约步数下实时分组的误帧率,其中横坐标为非实时节点业务量,即网络中每个非实时分组发送节点在每秒钟内产生的数据分组个数,纵坐标为实时业务分组的误帧率。由于网络节点较为稀疏,因此整体误帧率均较低。

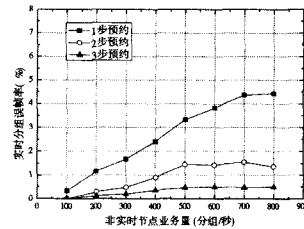


图7 规模较小的网络中实时分组误帧率

由图7可知,相比于单步预约,多步预约可以较为显著地降低实时分组的误帧率。随着业务量不断增加,网络进入饱和状态,表现在误帧率曲线进入相对平坦的区域。从图中可以看到,即便是在饱和状态下,基于多步信道预约机制的 MAC 协议的性能也明显优于单步信道预约机制下的 MAC 协议。值得注意的是,单步信道预约机制在非实时节点业务量为700分组/秒时网络基本达到饱和,而多步信道预约机制在非实时节点业务量为500分组/秒时网络就已经基本达到饱和,其主要原因在于,采用多步信道预约机制的 MAC 协议可以为实时业务提供更为稳定的信道资源,实时分组有较高的优先权使用信道带宽,而单步信道预约机制的信道预约稳定性较差,非实时业务更容易抢占信道资源,即在单步信道预约机制下,网络可以容纳更多的非实时分组传输,因此网络进入饱和状态在图中较为靠后。

图8是编号为2的拓扑下,各种预约步数下实时分组的误帧率。由于网络规模扩大,节点个数较多,且密度较大,因此实时分组误帧率随着非实时节点业务量的增加而有较大程度的上升,特别是非实时节点业务量达到一定水平后,单步预约的实时分组误帧率达到了不可接受的水平;但由于节点分布较为密集,有较多的节点能够接收到预约信息,因此多步预约的稳定性比单步预约更好,误帧率有较为明显的改善。

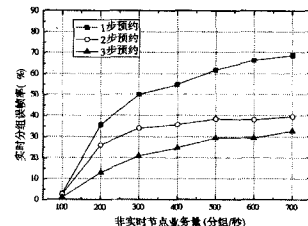


图8 规模较大的网络中实时分组误帧率

从以上曲线可以看出:

a) 网络负载较重时,多步信道预约机制在丢包率上有较

(下转第110页)

表1 不同编码数下基本密钥提取器 GSR 和 IFR 情况

编码维数	463	503	588	618	688
FVC2004 GSR	2.04e-1	1.74e-1	1.01e-1	8.79e-2	3.75e-2
FVC2004 IFR	9.76e-1	9.81e-1	9.92e-1	9.93e-1	9.97e-1
URU4000B GSR	5.90e-1	5.62e-1	4.57e-1	4.37e-1	3.41e-1
URU4000B IFR	9.85e-1	9.89e-1	9.97e-1	9.98e-1	9.99e-1

表2 不同编码数下改进的密钥提取器 GSR 和 IFR 情况

编码维数	463	503	588	618	688
FVC2004 GSR	2.31e-1	1.99e-1	1.18e-1	1.04e-1	4.79e-2
FVC2004 IFR	9.80e-1	9.83e-1	9.93e-1	9.94e-1	9.97e-1
URU4000B GSR	6.14e-1	5.86e-1	4.83e-1	4.63e-1	3.65e-1
URU4000B IFR	9.86e-1	9.90e-1	9.97e-1	9.98e-1	9.99e-1

综合表1和表2的情况来看,考虑了质量因素后,指纹密钥提取器的性能提高了,同样编码维数情况下,一致指纹的解码成功率提高了,不一致指纹的解码错误也提高了。同时,从两个表中两个数据库的相关参数比较也可以看出,中科院 URU4000B 数据库指纹质量要好于 FVC2004。在编码维数逐渐提高的情况下,GSR 逐渐提高,IFR 也提高了,这主要是因为,编码维数低时,纠错能力提高了。

结束语 密钥管理是信息安全实践中的一个重要课题。本文融合了一种快速评价指纹图像质量的方法,构建了高性能的基于指纹的密钥提取器方案,从用户指纹中提取出了恒定值用作密码学中的密钥。

中国科学院自动化研究所的 URU4000B 数据库和 FVC2004 DB3 数据库是两个公开的指纹数据库,在其上进行了指纹密钥提取器的实验,测试了基本指纹密钥提取器和改进指纹密钥提取器的性能。给出了两种数据库上五种编码维数下的一致指纹密钥恢复成功率和不一致指纹密钥恢复失败率,说明了指纹提取器的有效性,也说明了融合指纹质量考量的密钥提取器性能更好,实用性更强。

虽然本文在指纹密钥的应用方面做了大量工作,但是,在

不采用其他手段的情况下,单独使用密钥提取器作为唯一的安全措施乃是不安全的。最主要的问题在于,目前还不能实现使得 GSR 很高,而 1-IFR 小到几乎可以忽略的密钥提取算法。目前,如果要把指纹密钥提取器应用于信息安全实践中,须与其他的安全措施相配合,比如加入口令等。

参考文献

- [1] Dodis Y,Reyzin L,Smith A. Fuzzy extractors: How to generate strong keys from biometrics and other noisy data[C]// Cachin C, Camenisch J, eds, 23rd Annual Eurocrypt Conference. Inter-laken, SWITZERLAND, 2004: 523-540
- [2] Dodis Y, Ostrovsky R, Reyzin L. Fuzzy extractors: How to generate strong keys from biometrics and other noisy data[J]. Si-am Journal on Computing, 2008, 38(1): 97-139
- [3] Girgis M R, Sewisy A A, Mansour R F. A robust method for partial deformed fingerprints verification using genetic algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2008-2016
- [4] Hulea M, Astilean A, Letia T, et al. Fingerprint recognition distributed system[C]// 2008 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (Aqtr 2008). 2008: 423-428
- [5] Marcialis G L, Roli F, Didaci L. Personal identity verification by serial fusion of fingerprint and face matchers[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2807-2817
- [6] Alonso-Fernandez F, Fierrez J, Qrtega-Garcia J, et al. A comparative study of fingerprint image-quality estimation methods[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(4): 734-743
- [7] Jain A K, Prabhakar S, Hong L, et al. Filterbank-based fingerprint matching [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5): 846-859

(上接第 72 页)

为明显的改进;当网络负载较轻时,多步信道预约的改进程度有所下降,但仍然能够比单步预约提供更为稳定的数据传输;

b) 3 步预约与 2 步预约相比,网络性能较为接近;

c) 在密度较大的网络拓扑下,多步预约对单步预约的实时业务传输性能的改进更为明显,在单步预约误帧率保持在较高的水平上时,多步预约可以降低 50% 左右的误帧率。

引入多步信道预约机制的无线网络 MAC 协议可以使网络性能有较大的改进。当预约步数增加时,网络性能趋于收敛,预约步数过大会增加额外的运算负担与算法复杂度,因此 3 步预约是较为理想的预约步数,没有必要无限增加预约步数。在该机制中,实时业务相比于非实时业务有较高的优先级,但是实时分组的产生周期较长,所占用的网络开销也较小,因此非实时业务的性能并不会受到较大的影响。

结束语 现有的无线网络协议一般难以对实时分组传输提供 QoS 支持。本文提出的基于多步信道预约的多址接入协议可以对实时数据分组提供较好的 QoS 支持,在原有信道预约协议的基础上提高了实时分组的预约稳定性,从而使网络性能得到较为明显的改善,在实际应用中,可以与 H. 263, H. 264 等视频编解码标准以及 MPEG 等音频编解码标准相

结合使用。

参考文献

- [1] IEEE. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification[S]. IEEE 802. 11-1999
- [2] Zhou Ying, Ananda A L, Jacob L. A QoS enabled mac protocol for multi-hop ad hoc wireless networks[C]// Performance, Computing, and Communications Conference, 2003. Conference Proceedings of the 2003 IEEE International. April 2003: 149-156
- [3] Li Bo, Tang Wen-zhao, Zhou Hu, et al. m-DIBCR: MAC Protocol with Multiple-Step Distributed In-Band Channel Reservation [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(1): 23-25
- [4] Benveniste M, Ghesson G, Hoebein M, et al. EDCF proposed draft text [S]. IEEE working document 802. 11-01/13 1rl, March 2001
- [5] Bo Li, Wei Li, Valois F, et al. Performance Analysis of an Efficient MAC Protocol with Multiple-Step Distributed In-Band Channel Reservation[J]. IEEE Transaction Vehicular Technology, 2010, 59(1): 368-382
- [6] 刘军, 李喆, 岳磊. IEEE802. 11 自组织网络仿真平台的设计与实现[J]. 计算机科学, 2008, 35(1): 24-26