

一种用于无线自组织网络的并发传输 MAC 协议

虞万荣, 王晓东, 周兴铭

(国防科学技术大学计算机学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文提出一种工作在单信道、单发射器和单发射功率模式下的并发传输 MAC 协议. 该协议在控制报文 (RTS/CTS) 和数据报文 (DATA/ACK) 之间插入附加控制时隙, 以便相邻节点有机会交换自己的控制报文. 为了保证并发传输的可靠性, 协议在控制报文中包含了冲突避免信息, 邻居节点根据这些信息判断自己的传输能否在不影响已有传输的情况下并发进行. 模拟结果显示, 与 IEEE 802.11 相比, CTMAC 协议在网络中存在并发可能时, 使系统吞吐量得到很大提高.

关键词: 无线自组织网络; 并发传输; 吞吐量; MAC 协议; IEEE 802.11

中图分类号: TN 915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 08-1433-05

Concurrent Transmission MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks

YU Wan-rong WANG Xiao-dong ZHOU Xing-ming

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073 China)

Abstract We present a novel concurrent transmission MAC protocol for MANETs which enjoys the simple design of single-channel, single-transceiver and single-transmission power architecture. The proposed protocol inserts additional control gap between the transmission of control packets (RTS/CTS) and DATA packet which allows a series of RTS/CTS exchanges to take place before the possible multiple concurrent data transmissions. To assure these concurrent data transmissions finishing correctly, the collision avoidance information is included in control packets. These information are used by neighboring nodes to determine whether begin their transmissions or not as in traditional transmission power control schemes. Simulation results show that compared with IEEE 802.11, significant throughput gain can be obtained by the proposed protocol.

Key words MANET; concurrent transmission; throughput; MAC protocol; IEEE 802.11

1 引言

由于不需要基础设施并且具有移动性和健壮性等特征, 无线自组织网络在战场网络、传感器网络等实际网络中具有广阔的应用前景. 无线自组织网络的部署和网络通信流量的路由选择很灵活, 但是如何有效利用宝贵的共享空间信道资源一直是无线自组织网络研究领域中的一项重要挑战, 在近期也得到大量的关注和研究.

IEEE 802.11^[1] 协议中所定义的 DCF 机制, 因其简单和规范, 成为无线自组织网络的基础协议. 然而 DCF 机制过于严格的约束条件, 限制了无线网络环境下的并发通信, 严重降低了系统的效率^[2]. 现有的通过 MAC 层机制挖掘并发传输以提高网络吞吐量的研究工作, 主要可以分为两类: 一类是通过控制节点的发射功率, 提高空间利用率

以完成并发传输^[3-10], 另一类是在 RTS/CTS 和 DATA/ACK 报文之间添加附加控制时隙, 完成邻近节点数据传输的并发调度^[10-12]. 由于现有硬件技术的限制, 功率控制的硬件成本高、系统延迟过长, 因而报文级的功率控制难以实用^[13]. 现有的附加控制时隙协议, 只考虑了相邻节点同为发送或者接收节点的情况, 未能充分挖掘网络中的并发潜力.

针对无线自组网 MAC 协议对并发传输支持的不足, 本文提出了一种基于功率信息的无线自组网并发传输 MAC 协议——CTMAC. CTMAC 协议工作在单信道、单发射器和单发射功率模式下, 通过在控制报文中引入相关的功率信息, 采用附加控制时隙自适应调整技术, 配合独特的 ACK 报文串行化机制, 突破了传统 MAC 协议对并发传输的限制, 有效提高了系统并发性能.

2 相关工作

2.1 功率控制协议

在无线通信过程中,为了节省能源消耗,在保证接收节点能够正确解码数据报文的前提下,节点可以适当降低发射功率,从而减轻节点间的相互干扰,提高空间利用率。据此,MAC协议可以通过功率控制来实现相邻节点的并发传输。根据其工作方式,功率控制协议可进一步分为两个子类:单信道功率控制和多信道功率控制协议。

在单信道功率控制协议中,所有控制报文和数据报文竞争同一个信道,节点以最大可用功率发送 RTS/CTS 报文,经过控制报文的协商,用可靠传输所需的最低功率发送数据报文。但是,单信道功率控制协议在理想状态下也只能获得与 IEEE 802.11 协议相近的吞吐量^[3-5]。

在多信道功率控制协议中,数据报文和控制报文分别在一个数据信道、一个或多个控制信道上传输^[6-9]。信道数量的增加使得多信道功率控制协议可以获得优于 IEEE 802.11 协议的吞吐量。但是,现有的功率控制协议分别存在着功率控制延迟过大、与现有规范和产品不兼容和过于理想地假设在数据信道和控制信道上信道衰减程度相同等问题,限制了协议在实际中的可用性。

2.2 附加控制时隙机制

在附加控制时隙机制中,发送和接收节点在成功交换了 RTS/CTS 控制报文后,并不像 IEEE 802.11 协议那样立即开始发送 DATA 报文,而是等待额外的一段时间,使邻近节点有机会在这个附加的控制时隙内交换自己的控制报文。

在 MACA-P^[11] 协议中,如果属于不同传输的两个相邻节点同为发送或者接收节点,则对应的两个传输就可并发,否则即使相邻也不能并发。在 MACA-P 的改进中^[12],作者提出了两种性能提升策略:其一是引入了自适应学习策略,其二是假设节点能够在任意时刻接收比当前接收报文功率更高的新到达报文。由于这些协议都没有考虑到节点可以承受一定程度的来自相邻节点的干扰,因而限制了并发传输效率的发挥。POW MAC^[10] 是一个单信道、单发射器的协议,综合了功率控制和附加控制时隙机制实现并发,但是功率控制技术本身的缺陷限制了协议的可行性;此外,POW MAC 协议为所有通信都增加了额外的控制报文,使系统效率在部分情况下受到过多的损失。

其他提高吞吐量的工作^[14]只是考虑如何分解冲突和及时获取信道,也未能有效利用网络中存在的并发传输机会。

3 系统环境

为了保证 CTMAC 协议的可用性,在协议的设计过程中,我们采用了符合 IEEE 802.11 规范的无线通信节点标准硬件环境,可在当前绝大部分产品上实现。

在 CTMAC 协议中,我们为每个节点设计了一个记录邻居节点相关信息的数据结构,即活跃邻居节点表 (Active Neighbor List ANL)。ANL(i) 中保存着节点 i 周围正在或者即将发送或接收数据的节点的有关信息。对节点 i 的每个活跃邻居节点 u, ANL(i) 中保存有以下信息:

$$\left\{ U_{\text{address}}, G_{iu}, T_{\text{data}}^{(uv)}, T_{\text{ack}}^{(uv)}, P_{\text{MTP}}^{(u)}, T, R \right\}$$

这些信息的具体含义如下:

- (1) U_{address} : 节点 u 的地址。
- (2) G_{iu} : 节点 i 和 u 之间信道损耗,由节点 i 通过公式 $G_{iu} = P_{\text{rx}}^{(u)} / P_{\text{tx}}$ 得到,这里 $P_{\text{rx}}^{(u)}$ 是节点 u 的控制报文到达节点 i 的平均功率
- (3) $T_{\text{data}}^{(uv)}, T_{\text{ack}}^{(uv)}$: 节点 u 和 v 之间 DATA 报文和 ACK 报文的发送时间。
- (4) $P_{\text{MTP}}^{(u)}$: 表示接收节点 u 在接收数据时可容忍的最大干扰,由节点 u 自行计算并包含在 CTS 报文中,具体计算方法见后。
- (5) T: 发送节点标志。如果节点 u 是发送节点,则该标志位为 1,否则为 0
- (6) R: 接收节点标志。如果节点 u 是接收节点,则该标志位为 1,否则为 0

为了描述相邻传输之间的并发关系,我们引入两个概念:主传输和从传输。如果某传输的发送节点 u 和接收节点 v 在分别发送 RTS 和 CTS 报文时,其邻居节点中没有活跃节点,即 $ANL(u) = ANL(v) = \emptyset$,那么该传输就是主传输,节点 u 和 v 分别被称为主发送节点和主接收节点。如果在交换控制报文时,节点 u 或 v 周围存在已调度的数据传输,则该传输就是从传输,节点 u 和 v 分别被称为从发送节点和从接收节点。需要指出的是,这里“主”、“从”二字的使用只是为了表述的方便,并不意味着需要任何全局同步。实际上,任何传输都有相同的机会成为主传输。

4 并发传输 MAC 协议 (CTMAC)

为了介绍 CTMAC 协议的设计和工作,我们考虑四个在彼此传输范围内的

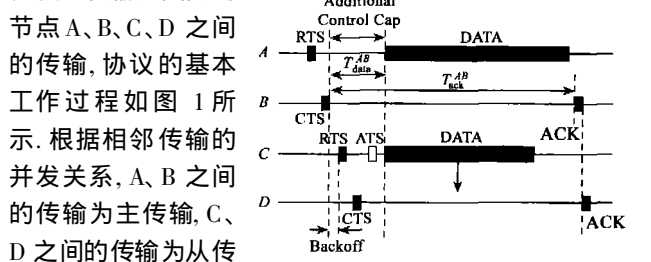


图 1 CTMAC 的基本原理

工作过程可划分为三个基本阶段:控制报文的交换;数据报文的并发传输;ACK 报文的串行化传输。

4.1 控制报文的交换

CTMAC 协议通过 RTS/CTS 控制报文的交换保证数

据报文的正确传输.如图 1 所示,节点 A 首先向节点 B 发送 RTS 报文,其中包含了 DATA 报文和 ACK 报文的预期发送时间 T_{data} 和 T_{ack} . 为避免时钟同步,这里 T_{data} 和 T_{ack} 都采用相对时间.节点 B 根据所接收的 RTS 报文发送 CTS 应答报文,其中包含了类似的时间信息.为了保证数据报文的并发传输,我们对控制报文进行了扩展,主要包括对 CTS 报文进行功能扩展和添加必要的 ATS 报文两方面.

4.1.1 CTS 报文的扩展

在 RTS/CTS 控制报文中,节点 D 通过 CTS 报文告知节点 C,数据传输是否可以正常进行.这里与 IEEE 802.11 标准不同的是,从接收节点 D 可能会根据主传输节点 A、B 之间的通信时间调整本次传输的预期时间 T_{data} 和 T_{ack} . 新的时间值包含在 CTS 报文中.

另外,从接收节点 D 在接收到节点 C 发送的 RTS 报文后,依据一定的并发调度原则,可能发现本次传输无法与主传输并发进行,则需要通知节点 C 取消该次报文传输.为此,我们为 CTS 报文扩充了“取消报文传输”的功能,以通知节点 C 取消预期的报文传输.

4.1.2 ATS 报文的引入

如上所述,如果节点 D 通过 CTS 报文通知节点 C 调整 T_{data} 和 T_{ack} , 则节点 C 需要通知其邻居节点调整后的时间信息,才能保证相邻的主、从传输之间正确的并发关系.为此,我们在 CTMAC 协议中引入 ATS (abrogate/adjust-to-send) 报文,分别满足上述两种情况下的需要.

(1) 从发送节点在接收到调整 T_{data} 和 T_{ack} 值的 CTS 报文后,将发送 ATS 报文,通知自己的邻居节点更新记录的 T_{data} 和 T_{ack} 值;

(2) 从发送节点在收到取消报文传输的 CTS 报文后,发送 ATS 报文通知邻居节点自己的传输已经取消,信道不再被占用.

4.2 并发传输控制机制

为了实现并发传输,我们采用了自适应调整附加控制时隙的设计思想,结合报文的功率信息对并发传输进行控制,有效提高了系统的并发通信能力.为了挖掘系统的并发特性,在 CTMAC 协议中,主传输节点在控制报文和数据报文之间插入附加控制时隙,为相邻节点提供交换控制报文的时机.相邻节点在接收到其他节点的控制报文后,将有关信息保存在其 ANL 中,作为并发调度的依据.

4.2.1 ANL 信息获取与维护

ANL 中的信息是并发传输控制的依据.节点对 ANL 的操作有四种动作,分别为添加、修改、删除和清空.节点只有在接收到目的地址为其他节点的控制报文 (RTS/CTS/ATS) 时才添加、修改或删除其活跃邻居节点表,而清空动作则在报文发送前或者结束后进行.

接下来讨论接收节点最大可容忍干扰 P_{MTI} 的计算.假设 $P_{rxThreshold}$ 是节点正确解码接收报文所需的最低功率,表示在环境噪音下给定硬件的接收灵敏度,由其硬件属性决

定.对网络内所有节点,该值都相同.

对接收节点 u ,在其正确接收所要求的 SINR 被超过之前,可以进一步承受的干扰总量是:

$$P_{adtable}^{(u)} = \frac{P_{rx}^{(uv)}}{SINR} - P_{rxThreshold} - \sum_j G_{uj} * P_u \quad (1)$$

j 是 ANL(i) 中的所有发送节点 (T 标志位为 1).

在此基础上,可以得到节点 u 可以承受的来自单个邻居节点的最大可容忍干扰是:

$$P_{MTI}^{(u)} = \frac{P_{adtable}^{(u)}}{N_{ACG}^{(u)} (1 + \alpha)} \quad (2)$$

这里 $N_{ACG}^{(u)}$ 是节点 u 的附加控制时隙中所包含的给定长度访问时间片片的数量,详见 4.2.3 节.

α 是传输半径外的节点所导致的干扰与传输半径内的节点所导致的干扰之比. $\alpha < 1$, 由无线通信信道决定,实际中,在 Tworay 信道下, $\alpha \approx 0.5^{[5]}$.

4.2.2 并发控制规则

在 CTMAC 协议中,从传输的并发调度必须符合以下四条规则的要求:

(1) 规则一 (时间要求): 当前主传输附加控制时隙的剩余时间不小于访问时间片.

(2) 规则二 (针对从发送节点): 从发送节点的 DATA 报文发送不能破坏任何已调度的传输.

(3) 规则三 (针对从接收节点): 从接收节点周围任何已调度传输不能破坏从接收节点正确接收 DATA 报文.

(4) 规则四 (针对所有从节点): 从节点必须将自己的 ACK 报文发送时间推迟到所有已知传输的 ACK 报文之后.

为满足规则二,从发送节点必须保证自己的传输不会干扰任何已成功调度即将进行的传输,即从节点必须保证对其 ANL 中的所有接收节点都有如下关系成立:

$$P_{rx} \leq P_{MTI}^{(u)} G_{ui} \quad (3)$$

其中 $P_{MTI}^{(u)} G_{ui}$ 值保存在 ANL 中.从接收节点在计算 P_{MTI} 的过程中,如果发现得到的 $P_{adtable}$ 不大于 Q 则规则三无法满足,从传输无法成功调度,于是从接收节点发送 CTS 报文,通知从发送节点取消预期的传输.另外,在 CTMAC 中,如果潜在的从传输周围有多个主传输,则从传输必须等到所有的主传输结束后才能开始竞争信道和调度数据传输.

4.2.3 附加控制时隙的自适应调整

附加控制时隙对并发传输协议的性能有决定性的影响,其长度需要根据不同的网络情况进行动态调整.在 CTMAC 中,附加控制时隙由一定数量 (N_{ACG}) 的访问时间片组成.每个从传输可以占用一个访问时间片,在访问时间片内完成其控制报文的交换.如果调度成功,该从传输就可以和主传输并发进行.访问时间片的长度是确定的,是传输 RTS、CTS、ATS 报文所需时间加上最大随机等待时间 (当 $CW = CW_{min}$ 时,这里的 CW 和 CW_{min} 的含义和取值与 IEEE 802.11 规范中相同).

对任何节点, N_{ACG} 的初始值是 1 (即允许一个并发传输

的存在. 初始化结束后, 节点将根据 ANL 中保存的并发传输信息动态调整 N_{ACC} 的值. 由于过分的等待会反而降低系统的吞吐量, 因此 N_{ACC} 的值并不是越大越好. CTMAC 中, N_{ACC} 的最小值为 1, 表示允许一个并发传输同时进行. 基于网络节点密度、潜在并发流量等因素, N_{ACC} 最大值取为 3. 此时模拟得到的性能最佳. 为了防止振荡, N_{ACC} 增加和减小的单位为 1. 如果节点在前一次通信中周围的并发传输数量大于等于 N_{ACC} , 就增大 N_{ACC} , 否则就减小 N_{ACC} . 由于 N_{ACC} 是在报文级进行动态调整的, 所以 CTMAC 协议能迅速适应网络的当前现状.

4.3 ACK报文的串行化

在 MAC 协议设计过程中, 除了要考虑不同传输的 DATA 报文之间的相互干扰, 还要考虑不同传输的 ACK 报文和 DATA 报文之间可能的相互干扰. 我们将某个主传输及其所属从传输的 ACK 报文发送时间串行化, 使得从传输的 ACK 报文在主传输之后发送, 而各个从传输的 ACK 报文也依次发送.

具体的方法是, 从传输将自身的 ACK 时间调整到 ANL 中所有已调度传输 (包括其他从传输) 的 ACK 报文之后. 因为 ACK 报文的长度是固定的, 根据 ANL 中保存的 T_{ack} 信息, 节点可以很容易的计算出自己的 ACK 报文发送时间. 由于 ACK 报文只有十几 Bytes 相对于长达 2KB 的数据报文而言很小, 因而将其串行化对协议的整体性能影响很小.

5 协议性能模拟和结果分析

我们采用 GbM oSim 网络模拟器来对 CTMAC 协议的系统吞吐量进行模拟测试和比较. 在 MAC 层, 我们关心的是单跳传输, 所以模拟中目的节点和源节点之间只有一跳. 在模拟过程中, 我们选取了两种有代表性的拓扑结构: 随机网络拓扑结构和分簇拓扑结构, 具体模拟参数如表 1 所示.

5.1 随机网络拓扑

假设一个 $800m \times 800m$ 的方形区域, 被划分成 $n \times n$ 个小正方形网格, 每个网格内随机放置一个节点. 假设网络内有 m 个传输, 每个传输的发送节点饱和, 且发送节点和接收节点在相邻网格内. 我们考察在不同的 n 和 m 下网络的吞吐量.

图 2 中的模拟结果显示, 在 IEEE 802.11 模式下, 系统的吞吐量基本保持稳定, 不随节点密集度和通信密集度的变化而改变, 这主要是因为系统内所有节点都在彼此的侦听半径内, 在某一时刻只允许网络内有一个传输.

在 CTMAC 中, 由于多个传输之间存在并发的可能, 因而系统吞吐量比 IEEE 802.11 有较大提高. 从图 2 中可以看出, 节点密度对 CTMAC 协议的性能有较大影响, 随着节点密度的增加, CTMAC 协议的性能也逐渐提高. 这是因为随着节点密度的增加, 发送节点和对应接收节点之间

的距离逐渐减小, 不同传输之间的干扰相对减弱, 使可并发进行的传输逐渐增多, 而网络的吞吐量也随之提高. 另外, 参数 m 也对系统吞吐量有一定的影响. 随着 m 的增大, 网络内需要并发的传输数量也增大, 从而并发传输的机会也就增大, 但参数 m 对性能的影响远没有参数 n 明显.

5.2 分簇拓扑

通信的本地化是保持大规模无线自组网可扩展的主要前提, 所以接下来我们考察 CTMAC 协议在分簇拓扑结构下的性能. 图 2 随机网络拓扑下系统吞吐量在分簇结构下, 节点主要和簇内的节点通信, 偶尔和簇外节点通信. 假设有一个 $400m \times 400m$ 的方形区域, 在该区域的四个角上各划出一个 $100m \times 100m$ 的小区域, 每个小区域内随机放置四个节点, 构成四个簇. 假设任一节点和簇外节点通信的概率为 p , 和簇内节点通信的概率为 $1-p$, 发送节点的报文产生速率为 k 报文/秒. 假设网络内存在随机选取的四个传输, 则在 $p = 0.25$ 时, 系统吞吐量如图 3 所示. 在网络负载高的情况下, CTMAC 协议相对于 IEEE 802.11 可以获得 70% 的性能提升. 当 $p = 0$ 时, CTMAC 取得最佳性能, 此时四个传输可以并发进行, 网络吞吐量是 IEEE 802.11 的 250%, 如图 4 所示.

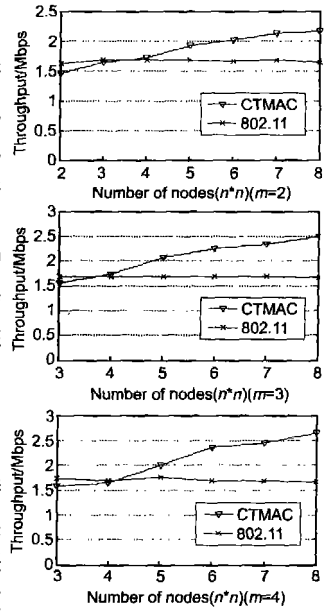


图 2 随机网络拓扑下系统吞吐量

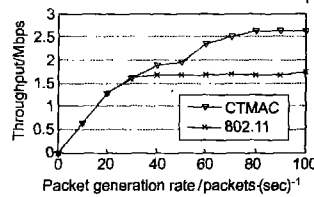


图 3 分簇拓扑下系统吞吐量 ($p=0.25$)

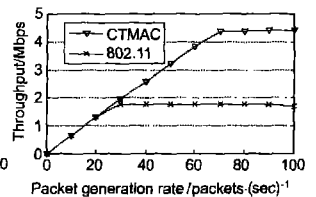


图 4 分簇拓扑下系统吞吐量 ($p=0$)

6 结束语

本文提出了一种用于无线自组织网络的并发传输 MAC 协议. 并发传输的实现结合了以下两种策略, 首先是在控制报文和数据报文之间引入额外的附加控制时隙, 使得更多的节点有机会交换控制报文并进行数据传输. 其次是根据信号的到达功率和接收节点的信噪比要求, 只允许彼此噪声干扰在可容忍范围内的传输并发进行, 确保并发传输的正确性. 另外, 本文提出了独特的 ACK 报文串行化

技术,解决了不同传输 DATA 报文和 ACK 报文之间可能的干扰问题。CTMAC 协议只要求节点具有符合 IEEE 802.11 规范的基本硬件,工作在单信道、单发射器和单发射功率模式下,可以方便的在实际网络中部署。模拟结果显示,该协议在网络节点密度较高、网络负载比较大的情况下,系统吞吐量得到很大的提高。

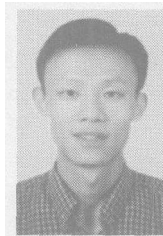
表 1 模拟参数取值

信道模型	TwoRayGround	侦听阈值	-94dBm
射频模型	Acnoise	接收阈值	-82dBm
数据报文大小	2KB	发射功率	30mW (15dBm)
信道速率	2M bps	传输半径	400m
信噪比 (SINR)	6dB	侦听半径	800m

参考文献:

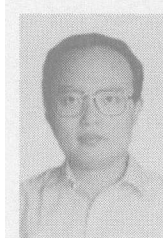
- [1] Wireless LAN Medium Access Protocol (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE Std 802.11-1999 [S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1999.
- [2] H Zhai, Y Kwon, Y Fang. Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs [J]. Wiley Journal of Wireless Communication and Mobile Computing, 2004, (4): 917-931.
- [3] E-S Jung, N H Vaidya. A power control MAC protocol for Ad Hoc networks [J]. ACM/Kluwer Wireless Networks (WINET), 2005, 11(1-2): 55-66.
- [4] P Kam. MACA-A new channel access method for packet radio [A]. Proceedings of the 9th ARRL Computer Networking Conference [C]. Canada: ARRL, 1990: 134-140.
- [5] M B Pursley, H B Russell, J S Wycarski. Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread spectrum radios [A]. Proceedings of the Eurocomm Conference [C]. Munich: IEEE, 2000: 1-5.
- [6] J Monks, V Bhargavan, W M Hwu. A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks [A]. Proceedings of the IEEE Infocom Conference [C]. Anchorage: IEEE, 2001: 219-228.
- [7] S-L Wu, Y-C Tseng, J-P Sheu. Intelligent medium access for mobile ad hoc networks with busy tones and power control [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(9): 1647-1657.
- [8] A M uqattash, M Krunz. Power controlled dual channel (PC-DC) medium access protocol for wireless ad hoc networks [A]. Proceedings of the IEEE Infocom Conference [C]. San Francisco: IEEE, 2003: 470-480.
- [9] J Deng, Z Haas. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(6): 975-985.
- [10] A M uqattash, M Krunz. POWMAC: A single-channel power control protocol for throughput enhancement in wireless ad hoc networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2005, 23(5): 1067-1084.
- [11] A A Charya, A M isra, S B Bansal. MACA-P: a MAC for concurrent transmissions in multihop wireless networks [A]. Proceedings of the First IEEE PeCom 2003 Conference [C]. Texas: IEEE, 2003: 505-508.
- [12] A A Charya, A M isra, S B Bansal. Design and analysis of a cooperative medium access scheme for wireless mesh networks [A]. Proceedings of the First International Conference on Broadband Networks [C]. San Jose, California: IEEE, 2004: 621-631.
- [13] V Kawadia, P R Kumar. Principles and protocols for power control in ad hoc networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Ad Hoc Networks, 2005(1): 76-88.
- [14] 刘静, 李建东, 周雷, 张光辉. 有效提高吞吐量的 UMA++ 协议 [J]. 电子学报, 2005, 33(4): 683-687.
Liu Jing, Li Jiantong, Zhou Lei, Zhang Guanghui. The high efficient UMA++ protocol with improved throughput [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(4): 683-687 (in Chinese).
- [15] T S Rappaport, L B Milstein. Effects of radio propagation paths on DS-SS cellular frequency reuse efficiency for the reverse channel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992, 41: 231-242.

作者简介:



虞万荣 男, 1976 年生于江苏丹阳, 博士研究生, 1999 年毕业于国防科技大学计算机系, 2002 年获得国防科技大学计算机学院硕士学位, 2002 年起在国防科技大学计算机学院攻读博士学位。主要研究方向为普适计算、无线自组织网络、无线传感器网络等。

E-mail: smilingfish1976@hotmail.com



王晓东 男, 1973 年生于湖南长沙, 博士, 副教授, 硕士生导师。2001 年于国防科技大学获博士学位, 主要研究方向为移动计算技术。

周兴铭 男, 1938 年生于上海, 教授, 博士生导师, 中科院院士。主要研究方向为高性能计算技术、网络与分布式计算技术。