

## Ad-hoc 网络中一种低控制开销的多信道 MAC 协议

蔡凤梅\* 邝育军

(电子科技大学移动互联实验室 成都 611731)

**摘要:** 针对 Ad-hoc 网络中多信道 MAC 机制引起的控制信道瓶颈问题和隐终端问题, 该文提出一种低控制开销 MAC 协议(LCO-MAC)。与基于信道使用表一类的 MAC 机制不同, LCO-MAC 参考 Meshhadany 提出的 RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send)信道分配机制, 将数据信道映射为帧中时隙, 但不同的是 LCO-MAC 不限制 RTS 的发送时间, 且一旦申请信道后即可发送数据。仿真结果表明, LCO-MAC 无需传输太多的控制信息用于预约信道, 有效缓解了控制信道瓶颈问题和多信道隐终端问题, 网络吞吐量也得到明显提升。

**关键词:** 自组织网络; 多信道 MAC; 控制信道瓶颈; 低控制开销

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2013)05-1076-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.01048

## A New Resource Assignment with Low Control Overheads for Multi-channel Ad-hoc Networks

Cai Feng-mei Kuang Yu-jun

(Mobile Link Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Considering the control channel bottleneck issue and hidden terminal issue for multi-channel MAC in Ad-hoc networks, a new multi-channel MAC with the Low Control Overhead (LCO-MAC) is proposed. Different from the multi-channel MAC mechanism based on the channel usage table, for LCO-MAC reference to the Request To Send/Clear To Send (RTS/CTS) channel assignment mechanism proposed by Meshhadany, each data channel is mapped to a time slot of the control section, but the difference is that LCO-MAC does not restrict the sending time of the RTS, and can send data once obtaining the channel. Simulation results show that LCO-MAC not needing too much control information for channel reservation provides an effective solution to the control channel bottleneck and multi-channel hidden terminal issue, the network throughput is also significantly enhanced.

**Key words:** Ad hoc network; Multi-channel MAC; Control channel bottleneck; Low Control Overheads (LCO)

### 1 引言

针对 Ad-hoc 的单信道 MAC 协议在节点密度高时网络吞吐量迅速降低的问题<sup>[1]</sup>, 研究人员相继提出了基于多信道的 MAC 协议以有效提高网络吞吐量<sup>[2,3]</sup>, 但同时多信道 MAC 协议也引入了新的问题, 如多信道隐终端和控制信道瓶颈问题等。

在多信道 MAC 中, 节点在传输数据前先需申请一个可用信道, 当多个节点申请到同一信道时, 该信道会发生冲突, 即所谓的多信道隐终端问题<sup>[4]</sup>。为此, 文献[3,5]提出了一种基于簇的信道分配机制。簇内的隐终端问题由簇首分配不同的信道解决, 簇间隐终端问题则由邻居节点(不含通信的源目的节点)或网关节点(位于两簇交界处, 可与两簇簇首通信的节点)对当前分配的信道判断解决。基于簇的分

配机制在信道空间利用率上占有很大优势, 但在高动态移动的 Ad-hoc 网络中, 簇的形成及维护是一个重大难题, 这需要传输大量的控制信息才能完成。文献[6-8]提出的信道分配机制是一类基于信道使用表<sup>[9]</sup>的 RTS/CTS/RES(Request To Send/Clear To Send/REServe)机制, 该类机制要求节点间及时更新信道使用表以解决多信道隐终端问题。为准确及时地更新信道使用表, 在源节点成功获得一个信道后, 源节点或者邻居节点往往需要及时发送一个广播帧通知周围节点进行更新, 确保信道的无冲突分配。

上述分配机制均属于专用控制信道协议<sup>[10]</sup>, 即为完成信道分配, 划分出一个专用的控制信道用于节点传输控制信息, 然而当网络繁忙时, 因控制信道上传输的控制信息过多, 造成控制信道上的大量冲突, 网络吞吐量降低, 此时控制信道成为了网络性能的瓶颈, 这就是控制信道瓶颈问题(Control Channel Bottleneck, CCB)<sup>[4,11]</sup>。为此, 文献[12]提

2012-08-14 收到, 2012-12-17 改回

国家自然科学基金(61071099)资助课题

\*通信作者: 蔡凤梅 411957048@qq.com

出了EDCC(Enhanced Dedicated Control Channel)协议,当节点有多个连续的数据包发送时,节点无需再次申请信道,而是继续利用已预约的信道进行数据传输,减少了控制信道上传输的控制信息。文献[4]的MCMI-SMAC协议将帧分为CCW(Channel Coordination Window)时段和数据时段两个部分,每个节点配备一个同步接口和一个普通接口,信道分配在同步接口的CCW时段完成,且在数据时段,同步接口也可被分配信道传输数据。该协议由于两个接口均可传输数据,单位时间内处理数据能力增加,节点预约信道冲突概率降低,所以信道分配传输的控制包数目相应减少。文献[13,14]则通过增加控制信道数来解决CCB问题,但这种方式需配备较多的半双工收发机,增加了硬件开销。以上提供的各种CCB解决方法均是基于信道使用表一类较复杂的RTS/CTS/RES信道分配机制,且各节点均需配备两个或两个以上的半双工收发机,而文献[15]则提出了另一种相对简单的信道分配方法。在该方法中,各节点仅需配备一个半双工收发机,数据信道对应帧的一个时隙,要通信的节点在某一时刻开始处发送RTS,如在同一时刻成功收到CTS,则表示该节点预约了该时隙对应的数据信道(为简便计,将该协议称为TSMD, Time Slot Mapping DATA channel)。相对基于信道使用表的一类分配机制而言,TSMD的信道分配通过简单的RTS/CTS传输就能完成,且节点不需要建立信道使用表。但是,TSMD要求节点必须在时隙开始处发送RTS,同时只能预约数据信道一帧的时间,这在网络负荷较大时,极易造成控制信道的严重冲突,所以传输的控制开销并未有效减少;另外由于节点申请信道后并不能立即传输数据,导致接入数据信道延迟增加,因此不能很好地适用于高动态拓扑变化的网络。

如前所述,现有研究中,多信道隐终端问题和

CCB问题解决方案仍存在着以下不足:一是信道分配机制复杂,各节点需要及时更新维护信道使用表,这导致交互的控制开销较大,如EDCC和MCMI-SMAC的RTS/CTS/RES机制;二是在高负载的网络中,多节点同时发送控制信息造成的冲突导致节点重新申请信道,使得传输的控制信息数增加,如TSMD由于严格限定节点在时隙开始处发送RTS,导致控制信道严重冲突。因此本文提出了一种新的基于低控制开销的新型多信道MAC协议(LCO-MAC),该协议借鉴TSMD的RTS/CTS信道分配机制思想,通过设计简单的信道分配机制来减少控制开销,从而较好地解决多信道MAC的隐终端问题和CCB问题。

本文其余部分安排如下:第2节详细介绍LCO-MAC协议;第3节给出NS2性能仿真结果;最后是结束语。

## 2 LCO-MAC

在LCO-MAC中,通过CDMA码将物理信道划分为一个控制信道和多个数据信道,每个节点仅配有一个半双工收发机,采用全向天线进行数据发射接收,节点可在信道间任意切换。同时,以下的讨论忽略多址干扰且假设各节点能量充足。

### 2.1 帧结构

LCO-MAC帧结构如图1所示。时间被分成等长重复帧,每帧包括控制时段和数据时段两部分。和TSMD一样,在控制信道上,控制时段分为同步时段和与可用数据信道一一对应的竞争时段,在同步时段内,节点间完成时间同步(可基于GPS授时等实现,不是本文重点)。在控制时段内,节点可发送控制信息申请信道并在申请信道后立即切换到相应数据信道传输数据直至数据时段结束(2.3节对该问题还有更详细的描述)。

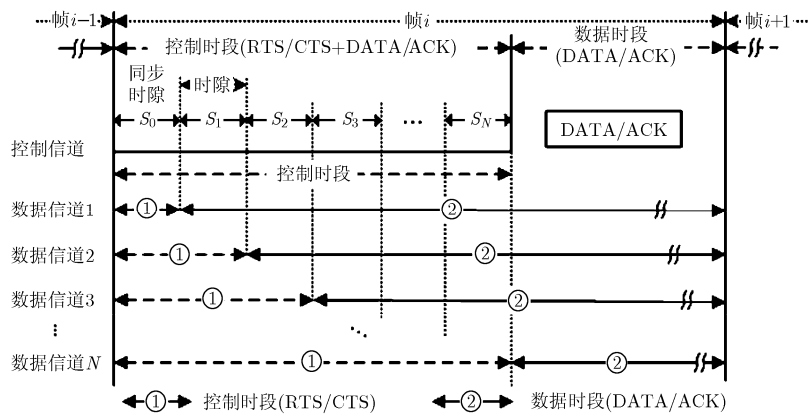


图1 LCO-MAC 帧结构

## 2.2 信道分配机制

当节点启动后, 必须首先监听同步时隙以便进行信道申请和数据传送。在控制时段内, 控制信道上的接入和冲突使用 802.11 的 RTS/CTS 握手协议完成, 但因为控制信道上只传输控制信息, 所以节点退避等待的 NAV(Network Allocation Vector)值不包括 DATA 和 ACK 传输的时间。在满足 802.11 协议的前提下, 当上层数据到达后, 节点可在控制信道上的控制时段内任意时刻发送 RTS, TSMD 而言, 控制信道上的冲突得到有效减少, 从而传输的控制信息数减少。同时节点执行二进制退避所使用的时隙大小和 802.11 协议一致, 而跟控制时段内的时隙大小无关。当目的节点收到 RTS 请求时, 如果当前没有接收其他节点的通信请求, 且当前处于控制时段, 则目的节点在 CTS 内填写当前时隙编号回复给源节点。当源节点收到 CTS 后, 根据其中的时隙编号选择对应的数据信道切换到相应数据信道进行数据传输。

在图 2 和图 3 中, 假设  $B$ ,  $C$  和  $D$  在  $A$  的通信范围内,  $A$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $E$  在  $C$  的通信范围内,  $C$  和  $D$  在  $E$  的通信范围内。在  $t_0$  时刻, 当节点  $A$  要与节点  $B$  通信时, 此时因无其他节点争用控制信道, 节点  $A$  成功发送 RTS 帧, 目的节点  $B$  在时隙  $S_1$  内开始回复 CTS, 因此节点  $A$  成功预约了时隙  $S_1$  对应的数据信道  $C_1$ , 且在收到 CTS 帧后立即切换到  $C_1$  上进行数据传输。在  $t_1$  时刻, 对于节点  $D$ , 需要与节点  $E$  通信, 但因为监听到节点  $B$  正在占用控制信道, 根据 802.11 协议的冲突避免机制, 节点  $D$  退避等待。最后节点  $D$  成功预约了时隙  $S_3$  对应的数据信道  $C_3$ 。在时刻  $t_2$ , 节点  $C$  需要与节点  $D$  进行通信, 此时因节点  $D$  正在  $C_3$  上传输数据, 无法监听控制信道的 RTS 请求, 所以当节点  $C$  发送 RTS 请求时, 并不

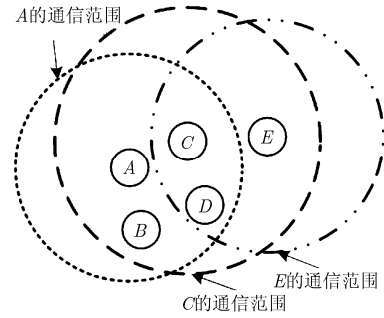


图 2 示例场景

能得到  $D$  的回复, 直到节点  $D$  通信结束开始监听控制信道,  $C$  节点才成功占用了最后一个时隙, 即  $S_N$ , 所以选择了信道  $C_N$  传输数据。由于选择的是控制时段的最后一个时隙, 所以  $C$  节点的数据传输只能在数据时段内完成。在  $t_3$  时刻, 节点  $D$  需要与节点  $E$  进行通信, 但因为此时处于数据时段, 所以  $D$  无法申请信道, 只能在下一周期的控制时段内申请。

## 2.3 帧长度分析

在 LCO-MAC 中, 竞争时隙与数据信道一一对应, 在理想情况下, 即当有与可用数据信道数相同的节点申请信道时, 无任何冲突的情况下, 应该是所有数据信道被占用, 此时时隙长度取得最小值, 有

$$t_{\min} = \text{DIFS} + t_{\text{RTS}} + \text{SIFS} + t_{\text{CTS}} \quad (1)$$

式中 DIFS, SIFS 是 802.11 协议根据优先级定义的帧间最小间隔,  $t_{\text{RTS}}$  是 RTS 传输时间,  $t_{\text{CTS}}$  是 CTS 所传输的时间。

同时为了防止两跳范围内多个节点预约到同一信道而造成的冲突问题, 竞争时隙的最大值为

$$t_{\max} = \text{DIFS} + t_{\text{RTS}} + (\text{SIFS} + t_{\text{CTS}}) \times 2 \quad (2)$$

如果  $t_{\max} > \text{DIFS} + t_{\text{RTS}} + (\text{SIFS} + t_{\text{CTS}}) \times 2$ , 则有可

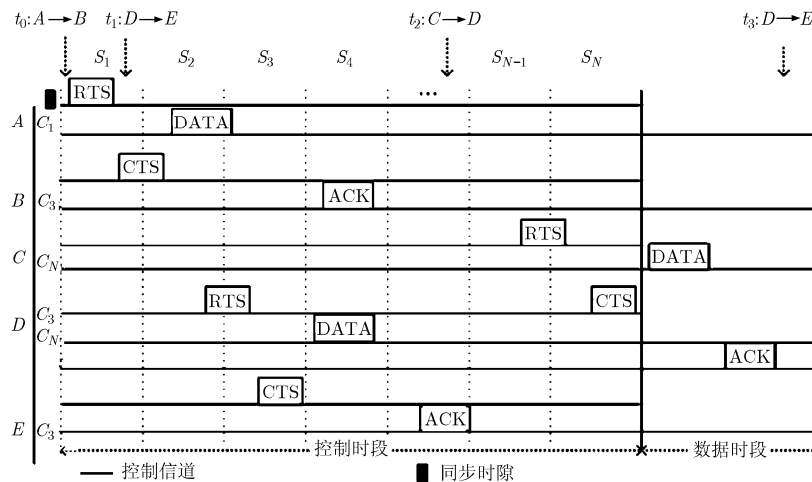


图 3 示例场景工作图

能出现两跳范围内多个节点预约到同一信道。以图 2 场景为例,如果节点  $A$  在时隙  $S_1$  发送 RTS 给节点  $B$ , 而节点  $B$  在时隙  $S_2$  开始处回复了 CTS, 则节点  $A$  成功预约信道  $C_2$ 。而当节点  $B$  回复 CTS 后, 节点  $D$  发送 RTS 给节点  $E$ , 节点  $E$  同样在  $S_2$  内回复 CTS, 结果导致节点  $A$  和  $D$  都在  $C_2$  上发送数据, 产生冲突。所以控制时段时隙长度  $t_{\min} \leq T < t_{\max}$ , 这里  $t$  取最小值

$$T = \text{SIFS} + t_{\text{RTS}} + \text{SIFS} + t_{\text{CTS}} \quad (3)$$

从而, 控制时段长度为

$$T_{\text{CS}} = T \times N_{\text{DCS}} \quad (4)$$

式中  $N_{\text{DCS}}$  是可用数据信道个数, 也是竞争时隙个数。

设置数据时段是为了保证当前周期所有竞争信道成功的节点完成数据传输, 如果没有数据时段, 则有可能出现一些节点在本周期还未完成数据传输就进入下一帧的情况, 如果其他节点在下一帧又预约到当前正使用的信道, 则会产生冲突。假设控制时段只有两个时隙, 在图 2 中, 节点  $A$  成功竞争到时隙  $S_1$ , 而  $A$  传输数据所需时间为 4 个时隙, 当下一控制时段到来时, 节点  $C$  又成功竞争到时隙  $S_1$ , 这就会出现两个节点同时在同一信道传输数据的情况。

数据时段的长度以节点竞争到最后一个时隙为参考点进行计算。从而有

$$T_{\text{DS}} = (\text{DIFS} + t_D + \text{SIFS} + t_A) \times N_{\text{RE}} + \text{SIFS} + t_{\text{CTS}} \quad (5)$$

其中  $t_D$  为网络中最长数据的传输时间,  $t_A$  为 ACK 传输时间,  $N_{\text{RE}}$  是数据被允许的重传次数, 重传次数可以设置为 1, 原因是在成功预约信道后, 数据可以无冲突地完成传输。数据时段增加 CTS 传输时间, 是因为 CTS 回复可以在控制时段最后一个时隙末开始, 这样, CTS 传输会延续到数据时段, 因此数据时段应添加 CTS 传输时间, 以免数据传输无法正常完成。

事实上, 将数据时段设置为网络最长数据传输时间, 如果当前帧内所有节点传输数据时间小于数据时段时间, 会使数据时段的一段时间空闲, 造成带宽浪费。但本文暂且不考虑此问题, 在以后工作中, 将会把数据时段设置为数据包传输的平均时延, 对于大于平均时延的数据包分多次传输, 从而充分利用带宽。

### 3 仿真结果分析

本仿真参考文献[15]的方法, 将不同信道数情况下的单信道速率设为一致, 本文设置为 1 Mbps。之

所以不采用文献[15]的 2 Mbps, 是因为在该速率下, 当可用信道数为 8 时, 对于 1000 Byte 的 Cbr 数据包只需要申请一次信道, 没有体现出当数据包较大时 TSMD 机制需多次申请信道的特点。仿真的其他参数设置如下: (1) 节点的单跳通信范围为 250 m, 仿真场景为 1000 m × 500 m; (2) 路由协议使用 DSDV 协议; (3) 与文献[15]一样, 每个 Cbr 数据包大小设置为 1000 Byte; (4) 各场景仿真时间 60 s。

仿真主要考虑如下两个性能指标:

(1) 网络吞吐量:  $C = L_{\text{pkt}} \times N_{\text{rp}} / T$ 。其中,  $L_{\text{pkt}}$  表示数据包长度,  $N_{\text{rp}}$  为成功传输的包数量,  $T$  为总仿真时间;

(2) 网络的信道分配比例:  $\rho_{\text{CA}} = N_{\text{CTS}} / (N_{\text{FA}} \times N_{\text{DC}})$ 。其中,  $N_{\text{CTS}}$  为网络节点接收的 CTS 总数,  $N_{\text{FA}}$  为在当前可用信道数情况下的帧周期数,  $N_{\text{DC}}$  为可用的数据信道数。在 LCO-MAC 和 TSMD 中, 一个 CTS 表示成功预约一个数据信道; 在理想状态下, 单位帧周期内, 应是所有可用数据信道被分配, 则整个仿真时间内的可用数据信道数总和为  $N_{\text{FA}} \times N_{\text{DC}}$ , 所以用  $\rho_{\text{CA}} = N_{\text{CTS}} / (N_{\text{FA}} \times N_{\text{DC}})$  来衡量 LCO-MAC 和 TSMD 的信道分配比例。

第 1 个仿真在静态和动态两种拓扑下进行。在动态拓扑下, 节点以 0~5 m/s 的速度移动。网络负载通过在  $N$  个节点中随机选择  $N$  对 Cbr 通信连接数来产生。其中, Cbr 以每秒 10 个的速率产生数据包, 可用信道数取 8, 16, 32, 且横轴表示通信连接数。从图 4 可以看出, LCO-MAC 的吞吐量在信道数固定时较 TSMD 有了很大提升, 且随着信道数增加, 其提升比例越大, 在动态拓扑信道数为 32 时提升了近 2.4 倍; 对于 LCO-MAC, 吞吐量随着信道数增加而增加, 而对于 TSMD, 可用信道数为 16 的吞吐量反而大于可用信道数为 32 的吞吐量, 这是由于节点申请信道后不能立即传送数据造成的: 当信道数增加, 帧周期变长, 节点发送数据需等待的时间(节点预约信道后需要等到下一帧到来才能发送数据)增加, 从而导致吞吐量的下降(详细内容见文献[15])。同时从动态拓扑下的吞吐量提升情况来看, 说明 LCO-MAC 较 TSMD 能更好地适用于拓扑动态变化的网络。再来看 CCB 问题, 从第 1 节的说明可知, CCB 问题会引起网络吞吐量的降低, 因此可以用达到最大吞吐量时的通信连接数来定性衡量该问题是否得到有效解决。在图 4 中, 对于 LCO-MAC, 随着信道数增加, 达到最大吞吐量时的通信连接数也相应增加, 而对于 TSMD, 在通信连接数为 100 时, 各信道数下的吞吐量均达到了最大值。所以较 TSMD, LCO-MAC 更有效地缓解了 CCB 问题, 而

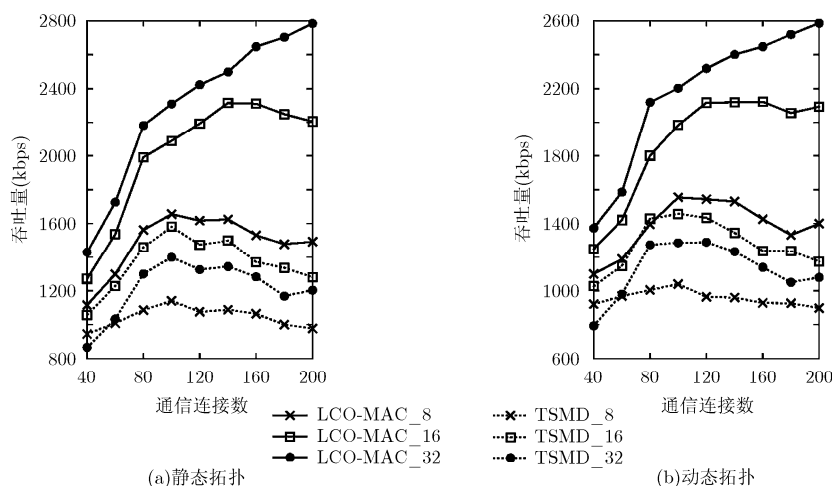


图4 两种拓扑下不同连接数的吞吐量

其缓解的直接原因可从图5得出。图5给出了两种拓扑下信道分配比例的情况,可以看到,LCO-MAC较TSMD有了很明显的提升,在信道数为32时,其分配比例几乎是TSMD的3倍。而提高的主要原因是节点发送RTS的时间不受时隙限制,从而 $\rho_{CA}$ 增加。当通信连接数一定时,由于各信道数下的网络负载一定,两协议的 $\rho_{CA}$ 随着可用信道数增加而减小;当信道数一定时,由于冲突影响, $\rho_{CA}$ 随着通信连接数的增加先增加然后达到一个稳定值。

第2个仿真在节点数为200时对不同Cbr数据包产生速率下进行仿真。从图6可以看出,吞吐量随Cbr产生速率的变化情况基本上和第1个仿真一致。随着信道数增加,LCO-MAC的吞吐量优势也越明显,在信道数为32时提高了近2倍,而达到最大吞吐量值的Cbr速率也因为信道数增加相应延后,但对于TSMD,在Cbr速率为每秒6个数据包时,所有信道的吞吐量基本上就达到了最大值。这表明在不同的Cbr速率下,LCO-MAC较TSMD更

有效地缓解了CCB问题。从图7给出的信道分配比例可知,LCO-MAC在不同的Cbr速率下,其 $\rho_{CA}$ 较TSMD优势也很明显,这说明在不同的Cbr速率下,LCO-MAC控制信道冲突也相应降低了很多。同时,随着Cbr速率的增加,LCO-MAC各信道数下的 $\rho_{CA}$ 值也随之增加,而TSMD在速率达到每秒8个数据包时便趋于稳定值。

从前两个仿真得出的结果可知,LCO-MAC在网络负载较大时性能优势很明显,下面讨论在低负载时LCO-MAC的性能表现。该仿真在固定节点数40和较小的Cbr速率每秒2个数据包的设置下,讨论各协议在不同信道数下成功传输的数据包比例。从图8可以看出LCO-MAC在低负载下仍略优于TSMD。在单信道速率相同的前提下,由于数据时段长度固定,因此对于LCO-MAC,信道数越少,控制时段占用帧周期比例越小,节点发送RTS几率降低,但同时,对于TSMD,当信道数小于等于12时,节点必须为每个数据包申请两帧或两帧以上的

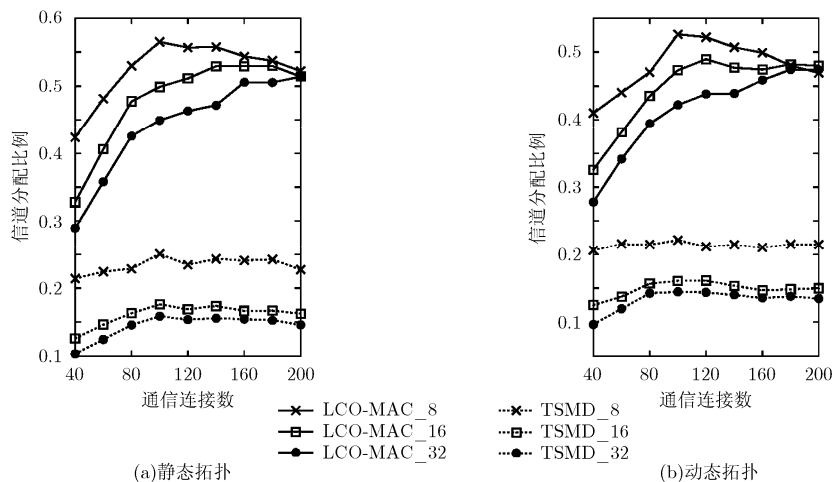


图5 两种拓扑下不同连接数的信道分配比例

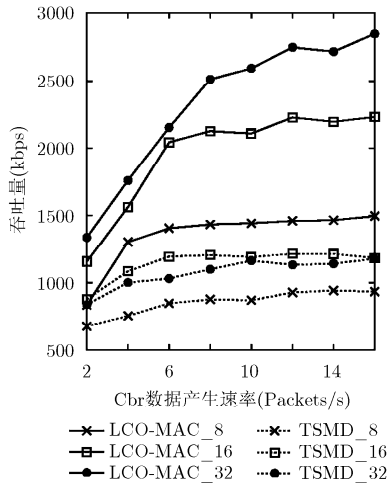


图6 不同 Cbr 速率下的吞吐量

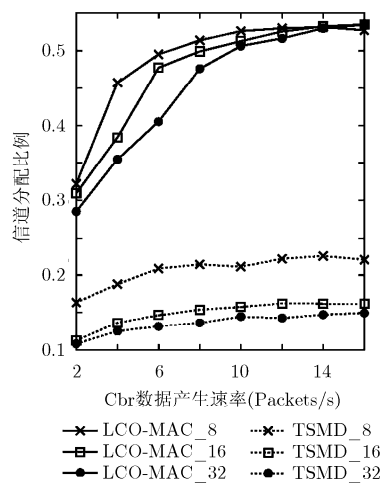


图7 不同 Cbr 速率下的信道分配比例

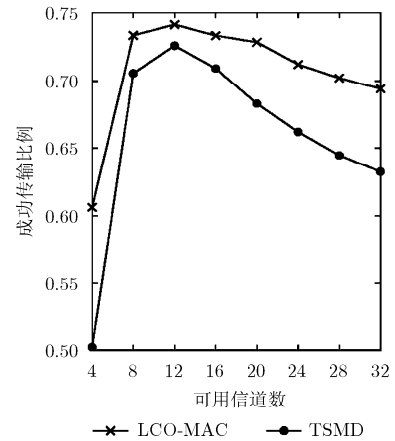


图8 可用信道数与成功传输的数据包比例的关系

传输时间(根据 2.3 节的控制时段长度可计算, 因为控制时段与 TSMD 帧长一致), 这增加了传输的控制开销, 降低了网络吞吐量, 而当信道数大于 12 时, 对于 TSMD, 由于帧周期变长, 预约信道成功的节点等待下一帧传输数据的时间增加, 节点接入延迟也增加, 所以 LCO-MAC 在低负载的情况下, 协议性能略优于 TSMD。

#### 4 结束语

本论文提出了一种低控制开销的 LCO-MAC 协议来解决多信道 MAC 的 CCB 问题和隐终端问题。LCO-MAC 将 802.11 协议 RTS/CTS 机制和数据信道对应竞争时隙的信道分配机制结合解决了多信道隐终端问题。同时, 约定节点预约的数据信道为 CTS 回复时隙所对应的数据信道, 所以相对一系列基于信道使用表的 RTS/CTS/RES 分配机制而言, 减少了 RES 控制信息和控制帧内携带的数据信息, 且节点预约信道因不需要及时更新信道使用表而不必传输太多控制信息; 相对 TSMD 而言, 节点可在控制时段任意时刻发送 RTS 请求, 所以极大程度减少了控制信息冲突, 有效解决了 CCB 问题。通过仿真表明, LCO-MAC 在低负载或者高负载的网络情况下, 其吞吐量和传输的控制开销均有良好表现, 这正是有效解决了隐终端问题和 CCB 问题带来的直接成果。

未来工作中, 我们将对协议进一步做以下完善: 首先, 如 2.3 节指出的, 将数据时段设置为数据包传输的平均时延, 对于大于平均时延的数据包分多次传输; 其次, 由于篇幅限制, 本文暂且没有对基于信道使用表一类的 MAC 机制作性能仿真比较, 在未来工作中, 这部分工作将会完善; 最后, 对于

LCO-MAC, 在数据时段内, 节点因无法在控制信道上申请信道而造成控制信道在数据时段内空闲, 为充分利用信道资源, 通过在控制时段末增加控制信道对应的时隙, 使得控制信道也可被分配给节点传输数据。

#### 参考文献

- [1] Kao Hui-hsiang, Wu Peng-jung, and Lee Chung-nan. Analysis and enhancement of multi-channel MAC protocol for Ad hoc networks[J]. *International Journal of Communications*, 2011, 24(3): 310-324.
- [2] Velempini M and Dlodlo M. Saturation of the control channel in multi channel wireless access networks[C]. 3rd IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology, Abuja, 2011: 144-148.
- [3] Moon Y and Syroitiuk V. A cooperative dual access multi-channel MAC protocol for Ad hoc networks[C]. IEEE Globecom, Miami, 2010: 1-5.
- [4] Li Fang-min, Ma Xiao-lin, Hu Fei, et al. Synchronisation-based, multi-channel multi-interface medium access scheme in Ad hoc network[J]. *IET Communications*, 2011, 5(14): 2082-2090.
- [5] Wu Chien-min. Hybrid dynamic channel assignment in clustered wireless multihop CDMA/TDMA Ad hoc networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2007, 42(1): 85-105.
- [6] Pourgolzar V and Ghorashi S A. A CDMA based MAC protocol for Ad hoc networks with directional antennas[C]. 2011 International Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (CNDS), Tehran, 2011: 73-77.
- [7] Maiya M and Hamdaoui B. An improved IEEE 802.11 MAC protocol for wireless Ad-hoc networks with multi-channel access capabilities[C]. 2011 International Conference on High

- Performance Computing and Simulation (HPCS), Istanbul, 2011: 162–168.
- [8] 方理财, 雷磊, 许宗泽. 基于节点合作的 Ad hoc 网多信道 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2010, 36(18): 98–100.
- Fang Li-cai, Lei Lei, and Xu Zong-ze. Multi-channel MAC protocol based on node cooperation in Ad hoc network[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(18): 98–100.
- [9] 李向丽, 李金明. 改进的 Ad hoc 网络多信道 MAC 协议[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12): 94–96.
- Li Xiang-li and Li Jin-ming. Improved multi-channel MAC protocol for Ad hoc networks[J]. *Computer Engineering and Application*, 2010, 46(12): 94–96.
- [10] 刑小琴, 刘凯. 移动 Ad hoc 网络中基于 ID 的信道预约多址接入协议[J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2690–2700.
- Xing Xiao-qin and Liu Kai. ID-based channel reservation multiple access for mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(10): 2690–2700.
- [11] 张德升, 李金宝, 郭龙江. 异步多信道无线传感器网络 MAC 协议[J]. 软件学报, 2012, 23(3): 613–628.
- Zhang De-sheng, Li Jin-bao, and Guo Long-jiang. Asynchronous multi-channel MAC protocol for WSNs[J]. *Journal of Software*, 2012, 23(3): 613–628.
- [12] Lei H and Ren Z. A new multi-channel MAC protocol for 802.11-based wireless mesh networks[C]. 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), Hangzhou, 2012: 27–31.
- [13] Pathmauntharam J S, Das A, and Gupta A K. Primary channel assignment based MAC (PCAM) — A multi-channel MAC protocol for multi-hop wireless networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Atlanta, 2004: 1110–1115.
- [14] Kyasanur P and Vaidya N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad hoc wireless networks[J]. *Mobile Computing and Communications Review*, 2006, 10(1): 31–43.
- [15] Al-Meshhadany T and Ajib W. New CDMA-based MAC protocol for Ad hoc networks[C]. 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference, Baltimore, 2007: 91–95.
- 蔡凤梅: 女, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为无线移动通信.
- 邝育军: 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为通信网络技术、无线与移动通信、现代通信中的信号处理.