

## e-MAC:一种面向 Ad Hoc 网络的高吞吐量 MAC 协议\*

张克旺<sup>1+</sup>, 潘煜<sup>1,2</sup>, 张琼<sup>3</sup>, 张德运<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(西安交通大学 电子与信息学院,陕西 西安 710049)

<sup>2</sup>(西安工业大学 计算机学院,陕西 西安 710032)

<sup>3</sup>(西安邮电学院 计算机学院,陕西 西安 710061)

### e-MAC: A High Throughput MAC Protocol for Ad Hoc Networks

ZHANG Ke-Wang<sup>1+</sup>, PAN Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiong<sup>3</sup>, ZHANG De-Yun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Electronic and Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

<sup>2</sup>(School of Computer Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

<sup>3</sup>(School of Computer Science, Xi'an University of Posts and Communications, Xi'an 710061, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhangkw@xanet.edu.cn, <http://www.xjtu.edu.cn>

Zhang KW, Pan Y, Zhang Q, Zhang DY. e-MAC: A high throughput MAC protocol for ad hoc networks. *Journal of Software*, 2010,21(10):2666–2676. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3674.htm>

**Abstract:** Collision avoidance and spatial reuse are two important approaches to improving the throughput of ad hoc networks, and many MAC protocols are proposed to achieve these goals. In most MAC protocols, collisions are reduced by solving the hidden terminal problems, but the spatial reuse remains un-optimized in these protocols, which affects network throughput dramatically. Moreover, reception of exposed terminals is not allowed in current MAC protocols even if they can receive packets successfully, which leads to lower spatial reuse. In this paper, a high throughput MAC protocol named e-MAC is proposed. To improve the network throughput, two approaches are used in e-MAC. First, a power controlled busy tone is used to eliminate hidden terminals. The receiver adjusts the transmission power of busy tone, according to a received signal strength from the transmitter, so that the spatial reused is optimized while all hidden terminals are covered by a busy tone. Second, exposed terminals are allowed to receive when the ratio between signal strength of RTS (ready-to-send) and interference satisfies the SINR (signal to interference and noise ratio) requirements, which further improves the spatial reuse. Simulation results show that the average throughput of e-MAC outperforms that of DUCHA (dual channel access) by 87%.

**Key words:** ad hoc network; hidden terminal problem; spatial reuse; throughput; e-MAC

**摘要:** 解决 ad hoc 网络中隐藏节点问题、暴露节点问题的最终目的是减少节点间的冲突,提高网络空间复用率,从而提高网络吞吐量.现有 MAC 协议在解决隐藏节点问题时着重于彻底消除网络中的隐藏节点,忽略了网络空间复用率,即使能够彻底解决隐藏节点问题,也不能有效提高网络吞吐量.同样,现有协议在解决暴露节点问题时着重于如何允许暴露节点并行发送数据,忽略了暴露节点接收数据的问题,也影响了网络空间复用率.提出了一种高效的

\* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2005AA121130 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Key Technology R&D Program of China under Grant No.2008BAH37B04 (国家科技支撑计划)

Received 2008-09-09; Revised 2009-02-16; Accepted 2009-07-06

MAC 协议 e-MAC,协议采用两种方法提高网络空间复用率:首先,协议中接收节点根据接收到发送节点的信号强度动态调整忙音发射功率,使忙音恰好覆盖所有的隐藏节点,在彻底解决隐藏节点问题的同时,提高网络空间复用率;其次,隐藏节点接收到 RTS 消息后,通过判断 RTS 消息信号强度与信道中干扰信号的强度之比来决定是否接收数据,允许满足信噪比要求的接收节点接收数据,进一步提高网络空间复用率.仿真结果验证了协议的有效性,在任意拓扑结构下,e-MAC 协议的平均吞吐量比 DUCHA(dual channel access)协议高 87%.

关键词: Ad Hoc 网络;隐藏节点问题;网络空间复用率;网络吞吐量;e-MAC

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

Ad hoc 网络不依赖于基站等基础设施,具有自组织、自恢复等特点,在军事以及抢险救灾等领域具有广泛的应用前景.受功耗等因素限制,ad hoc 网络节点通信距离较短,非邻近节点间以多跳的方式进行通信.由于网络中众多节点共享同一个信道,且信道带宽受限,如何在有限的带宽条件下提高网络吞吐量,是目前 ad hoc 网络的主要研究目标之一.

媒体接入控制层(MAC)协议是数据在无线信道中发送和接收的控制者.MAC 协议的效率是影响网络吞吐量的主要因素.在网络带宽一定的前提下,MAC 层提高网络吞吐量的主要途径包括:第一,彻底解决隐藏节点问题,减小节点间数据包的冲突,防止过多的数据包重传;第二,提高网络空间复用率,允许更多的节点并行发送.

解决 ad hoc 网络中的隐藏节点问题是目前很多 MAC 协议的设计目标.现有 MAC 协议中,部分协议无法彻底解决隐藏节点问题,而彻底解决隐藏节点问题的协议又着重于完全消除网络中的隐藏节点,忽略了网络空间复用率,导致网络吞吐量较低.暴露节点问题也影响网络空间复用率,但在现有的针对暴露节点问题的研究中,着重解决了暴露节点的发送问题,忽略了暴露节点接收问题,同样会影响网络吞吐量.

如图 1 所示,节点  $a$  向节点  $b$  发送数据,节点  $c$  向节点  $d$  发送数据(其中, $R_{cs}$  为载波侦听距离).无线设备接收数据需要满足一定信噪比的要求,即有效信号强度与干扰信号强度的比值大于一定阈值后,节点才能正确接收数据.节点  $a$  到达节点  $b$  的信号强度与节点  $c$  到达节点  $b$  的信号强度之比满足信噪比要求,这样,节点  $a$  与节点  $c$  同时发送数据,节点  $b$  也能够成功接收到节点  $a$  的数据,而不受节点  $c$  的干扰.以 DUCHA(dual channel access)协议<sup>[1]</sup>为例说明现有协议存在的问题:第一,当节点  $a$  正在向节点  $b$  发送数据时,节点  $c$  也需要向节点  $d$  发送数据.为了防止隐藏节点干扰数据的正确接收,节点  $b$  在接收数据过程中发送忙音(图中  $R_{in}$  为忙音最大发射距离),所有侦测到忙音的节点不发送数据.由于节点  $b$  发送的忙音覆盖节点  $c$ ,节点  $c$  因侦听到忙音而不发送数据.协议虽然解决了隐藏节点问题,但是网络空间复用率较低;第二,当节点  $c$  正向节点  $d$  发送数据时,节点  $a$  需要向节点  $b$  发送数据.节点  $b$  在接收到节点  $a$  发送的 RTS(ready-to-send)消息后,由于节点  $b$  侦测到邻近节点在发送数据,认为不能正确接收节点  $a$  的数据,发送 NCTS(not-clear-to-send)消息阻止节点  $a$  发送 DATA 消息.协议中,暴露节点不能接收数据.

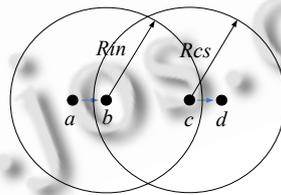


Fig.1 Misbehavior of current MAC protocols

图 1 现有协议存在的缺点

本文提出,e-MAC 协议可以同时解决上述问题,从而有效提高网络吞吐量.协议特点包括:首先,接收节点根据已经接收到的发送节点的信号强度动态调整忙音的发射功率,保证忙音覆盖所有隐藏节点,彻底消除隐藏节点,同时防止忙音覆盖范围过大造成网络空间复用率的降低;其次,协议中暴露节点通过计算信号强度与干扰信号强度的比值来决定是否接收其他节点发送的数据,允许满足条件的暴露节点接收数据,解决暴露节点接收问

题,进一步提高网络空间复用率.

本文第1节对相关研究进行分析.第2节提出 ad hoc 网络中的固定干涉距离问题和暴露节点接收问题.第3节详细描述本文所提协议 e-MAC.第4节进行协议分析与仿真对比.第5节对全文进行总结.

## 1 相关工作

在 CSMA(carrier sensing media access)协议<sup>[2]</sup>中,节点在发送数据之前首先进行信道侦听,如果信道被邻近节点占用,则进行退避.协议仅仅消除了发送节点周围的一小部分隐藏节点,隐藏节点问题没有得到彻底解决.协议导致发送节点的邻近节点在发送节点发送过程中不能发送数据,引起暴露节点问题.CSMA 协议中,隐藏节点问题与暴露节点问题导致网络在负载较重时吞吐量较低.

Tobagi 在文献[3]中针对 CSMA 协议无法解决隐藏节点问题这一缺陷,提出了 BTMA(busy tone media access)协议.在 BTMA 协议中,接收节点在接收到向本节点发送的消息后,立即发送忙音 BT(busy tone),邻近节点在发送数据前侦听忙音 BT,如果侦听到忙音 BT,则进行退避,这样可以解决 CSMA 中的隐藏节点问题.BTMA 协议要求网络为全连通网络,且所有节点由控制节点协调,不适合 ad hoc 网络.

IEEE 802.11DCF(distributed coordination function)协议<sup>[4]</sup>结合 MACA(CSMA without carrier sensing)协议<sup>[5]</sup>中提出的 RTS/CTS(ready-to-send/clear-to-send)机制与 CSMA 机制,节点在发送所有消息之前都进行信道侦听,DATA 消息的发送通过 RTS/CTS/DATA/ACK 会话完成.由于 RTS/CTS 机制只能防止最大发送距离范围内的隐藏节点,协议不能彻底解决 ad hoc 网络的隐藏节点问题<sup>[6]</sup>,在网络负载较重时吞吐量仍然较低.

文献[7]提出 DBTMA 协议.该协议基于双信道硬件结构,采用 RTS+DATA 消息构成的会话来发送数据.发送节点在向接收节点发送 RTS 消息的过程中,发送忙音 BTt.接收节点接收到 RTS 消息后,如果同意接收发送节点的数据,则发送忙音 BTr 进行应答.发送节点侦测到忙音 BTr 后,开始发送数据;在数据发送过程中,接收节点一直发送忙音 BTr,所有邻近节点检测到忙音 BTt 或者 BTr 后都进行退避.协议采用较大的功率发射忙音,可彻底解决隐藏节点问题.在发送节点发送数据的过程中,发送节点的邻近节点只要不影响接收节点接收数据就可以并行发送数据,因而协议也能够解决暴露节点问题.DBTMA 没有 ACK 机制,出错数据需要上层协议处理,对传输效率影响较大<sup>[8]</sup>.

Zhai 等人在文献[1]中提出 DUCHA 协议.在 DUCHA 协议中,信道被划分为数据信道、控制信道和忙音信道.数据信道用于传输 DATA 消息,控制信道用于传输 RTS/CTS/NCTS 消息,忙音信道用于传输忙音.发送节点在发送 DATA 消息前先在控制信道发送 RTS 消息,接收节点接收到 RTS 消息后,如果同意接收数据,则在控制信道发送 CTS 消息,同时在忙音信道发送忙音,防止隐藏节点对接收节点造成干涉;如果不同意接收数据(例如本节点是暴露节点),则发送 NCTS 消息,阻止发送节点发送数据.DATA 消息完成后以 NACK 方式进行确认,即如果接收节点没有正确接收 DATA 消息,则持续发送 BTr.发送节点发送完成后,如果在一段时间内仍然检测到 BTr,则进行重新发送.协议解决隐藏节点与暴露节点问题的方法与 DBTMA 完全相同.与 DBTMA 相比,由于协议进行了 MAC 层确认,而且能够解决接收节点阻塞等问题,因此效率较高.

VPDBT(variable power dual busy tone)协议<sup>[9]</sup>中首次通过调整忙音的发射功率解决隐藏节点问题,同时提高网络空间复用率.协议采用双忙音 BTt 与 BTr 对 802.11 DCF 协议进行增强,主要包括:发送节点先向接收节点发送 RTS 消息,同时以最大功率发送忙音 BTt,保证在接收后续 CTS 消息时不受邻近节点干涉;接收节点接收到 RTS 消息后,发送 CTS 进行应答,同时发送 BTr 忙音,保证后续 DATA 消息不受干涉(忙音 BTr 的发送功率根据接收到 RTS 消息的信号强度计算);发送节点接收到 CTS 消息后,根据 CTS 消息的信号强度调整 BTt 的发射功率,保证后续 ACK 消息不受干涉.由于 VPDBT 协议可以解决隐藏节点问题,同时提高网络空间复用率,网络吞吐量明显提高.但协议也存在缺点:首先,由于 802.11 DCF 协议中发送节点和接收节点都需要接收消息,因而整个过程中两个节点都需要防止隐藏节点的出现,降低了网络空间复用率;其次,暴露节点问题没有得到任何解决.

## 2 协议的提出

上述相关研究的主要目标是彻底解决隐藏节点问题和暴露节点问题,以提高网络吞吐量,但现有 MAC 协议在解决隐藏节点问题的过程中导致网络空间复用率的浪费.而在解决暴露节点问题方面,绝大多数协议集中于如何解决暴露节点建立并行发送数据的问题,忽略了暴露节点的接收问题.例如,在 DUCHA 协议中,当接收节点在控制信道接收到 RTS 消息后,如果侦测到数据信道非空闲,即使发送节点发送的信号强度与干扰信号强度之比满足信噪比要求,能够被正确接收,但是协议中也发送了 NCTS 消息,拒绝接收数据,这样就降低了网络空间复用率.下面首先提出固定干涉距离问题与暴露节点接收问题.

### 2.1 无线模型

无线信号的传播模型根据传播环境的不同可以分为自由空间传播模型和近地传播模型<sup>[10]</sup>,两种传播模型可以统一表达为

$$Pr_{(a \rightarrow b)} = G \frac{Pt}{d^\lambda}, 2 \leq \lambda \leq 4 \quad (1)$$

其中,  $Pr_{(a \rightarrow b)}$  为节点  $b$  接收到节点  $a$  的信号强度,  $Pt$  为节点  $a$  的发射功率,  $d$  为发送节点与接收节点之间的距离(简称发送距离),  $\lambda$  是与传播环境相关的常数,  $G$  为与节点无线收发器及工作频段相关的常数(简称节点增益).

节点接收到的有效信号与积累干涉以及噪音信号之和的比称为信噪比 SINR(signal to interference and noise ratio),用  $\gamma$  表示.只有当节点接收的信噪比大于某个阈值时,节点才能正确接收到消息.节点  $b$  接收节点  $a$  发送的消息时,其信噪比可以表示为

$$\gamma_{(a \rightarrow b)} = 10 \log \frac{Pr_{(a \rightarrow b)}}{\phi + N_0} \geq \beta \quad (2)$$

其中,  $Pr_{(a \rightarrow b)}$  为节点  $b$  接收到节点  $a$  的信号强度,  $N_0$  为环境噪音,  $\phi$  为其他节点的信号在节点  $b$  处的积累干涉.

设  $N = 10^{\frac{\beta}{10}}$ , 则公式(2)可以表示为

$$\frac{Pr_{(a \rightarrow b)}}{\phi + N_0} \geq N \quad (3)$$

随着带宽的增大,信噪比要求也相应增大,表 1 所示为 802.11a/g 中不同带宽条件下的信噪比要求.

Table 1 SINR requirements for 802.11a/g

表 1 802.11a/g 各个速率对信噪比的要求

Speed (Mbps)	6	9	12	18	24	36	48	54
$B$ (dB)	6.02	7.78	9.03	10.79	17.04	18.80	24.05	24.56
$N$	3.98	6.03	7.94	12.02	50.12	75.86	251.19	288.40

### 2.2 固定干涉控制距离问题

为了分析方便,本文中设发送节点与接收节点之间的距离(T-R 距离)为  $d$ ,节点的最大发送距离为  $D$ ,隐藏节点的分布半径(干涉半径或干涉距离)为  $Din$ .定义协议能够控制接收节点周围邻近节点不发送数据的距离为干涉控制半径,用  $Dctrl$  表示.

隐藏节点是指在节点接收数据过程中可能干涉接收节点正确接收数据的邻近节点.根据公式(1)与公式(3),在忽略环境噪声  $N_0$  的情况下,  $Din$  可表达为

$$Din = d \times \sqrt[3]{N} \quad (4)$$

隐藏节点的分布半径取决于 T-R 距离  $d$ 、节点信噪比阈值以及传播环境.在节点通信速率以及传播环境确定的情况下,干涉距离与 T-R 距离  $d$  成正比.

现有协议绝大多数着重于彻底消除网络中的隐藏节点,忽略了网络空间复用率,采用固定的干涉控制半径  $D \times \sqrt[3]{N}$ .这样虽然可以防止任意 T-R 距离  $d$  情况下出现的隐藏节点,但当  $d$  较小时,由于干涉控制半径过大,其中  $d \times \sqrt[3]{N} < r \leq D \times \sqrt[3]{N}$  范围内的节点不是隐藏节点,但也不能发送数据,从而导致网络空间复用率较低.

### 2.3 暴露节点接收问题

现有解决暴露节点问题的协议都集中于处理暴露节点发送的问题,忽略了暴露节点能否接收数据的问题,导致网络空间复用率的降低.

现有协议存在的暴露节点接收问题描述如下:如图 2 所示,在节点  $S$  向节点  $R$  发送数据的过程中,协议不允许节点  $E$  接收来自节点  $S'$  的数据(802.11 中通过直接丢弃 RTS,在 DUCHA 中通过发送 NCTS 消息).暴露节点能否接收数据不仅取决于暴露节点与发送节点之间的距离  $de$ ,而且取决于暴露节点与向暴露节点发送数据的节点之间的距离  $ds$ .当  $ds$  较小时,由于节点  $S'$  的信号到达暴露节点  $E$  的强度较强,满足信噪比要求,即使节点  $S$  与  $S'$  同时发送数据,节点  $E$  也可以正确接收节点  $S'$  发送的数据.

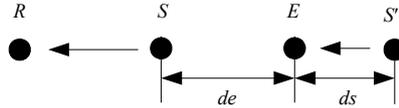


Fig.2 Exposed terminal receive problem  
图 2 暴露节点接收问题

## 3 e-MAC 协议

### 3.1 无线设备硬件结构

e-MAC 协议基于多信道硬件结构,包括数据信道  $C_{DATA}$ 、控制信道  $C_{CTRL}$  和忙音信道  $C_{BTr}$ .  $C_{DATA}$  用于传输 DATA 消息,  $C_{CTRL}$  用于传输控制消息,  $C_{BTr}$  用于传输忙音 BTr. 协议假设  $C_{DATA}$  和  $C_{CTRL}$  两个信道可以独自进行接收和发送,则可以解决文献[11]中所述的多信道隐藏节点问题.

协议中控制消息包括 RTS 消息和 CTS 消息. RTS/CTS 消息的作用是协同忙音 BTr 进行信道协商和防止隐藏节点干涉 DATA 消息.

设 ad hoc 网络由同构节点构成,所有节点以相同功率  $P_t$  发送 DATA 消息和控制消息,而在发送忙音 BTr 时,其输出功率可以在  $[0, P_{max}]$  之间任意调节. 由于数据信道  $C_{DATA}$ 、控制信道  $C_{CTRL}$  和忙音信道  $C_{BTr}$  工作于相邻频段,故无线信号具有相同传播特性. 设定节点  $C_{BTr}$  和  $C_{BTr}$  具有相同的检测阈值 CCA(channel clear assessment), 设其值为  $P_s$ .

### 3.2 忙音功率计算

接收节点接收到发送节点发送的信号后,如果所接收信号强度为  $P_r$ ,根据公式(1),T-R 距离  $d$  可以计算为

$$d = \sqrt[3]{\frac{P_t \times G}{P_r}} \quad (5)$$

根据公式(4),干涉距离为  $D_{in} = d \times \sqrt[3]{N}$ . 对于忙音,其 CCA 为  $P_s$ ,发送距离为  $D_{in}$ ,则忙音的发射功率  $P_b$  为

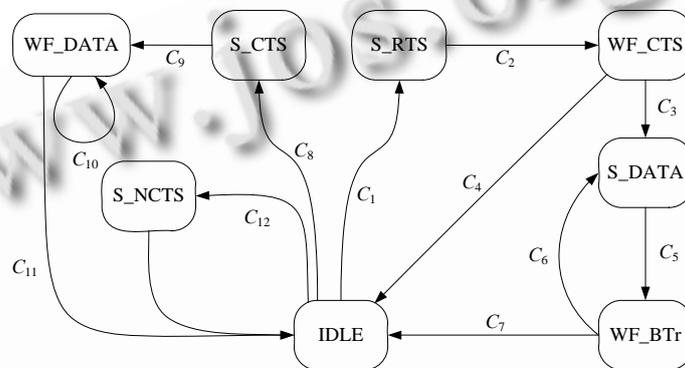
$$P_b = \frac{N \times P_t}{P_r} \times P_s \quad (6)$$

即接收节点接收到发送节点的信号强度为  $P_r$ ,则以功率  $\frac{N \times P_t}{P_r} \times P_s$  发送忙音就能够消除所有隐藏节点.

### 3.3 协议过程描述

协议有限状态机如图 3 所示.图中,  $C_x$  为转移条件与转移动作.转移条件与转移动作由“/”分开,前部分为转移条件,后部分为转移动作.下面对有限状态机所代表的协议过程进行描述.协议中,节点总共可以处于 8 种状态. IDLE:节点处于空闲状态; S\_RTS:节点发送 RTS 消息; WF\_CTS:节点等待 CTS 消息; S\_DATA:节点发送 DATA 消息; WF\_BTr:节点等待忙音 BTr 结束; S\_CTS:节点发送 CTS 消息; S\_NCTS:节点发送 NCTS 消息; WF\_DATA:节点等待 DATA 消息.

- (1) 发送节点在发送数据之前首先侦听忙音 BTr 和控制信道  $C_{CTRL}$ ,如果检测到忙音 BTr 或者  $C_{CTRL}$  被邻近节点占用,则进入等待状态;如果控制信道空闲而且检测不到忙音 BTr,则立即在控制信道发送 RTS 消息(如图 3 中的  $C_1$ ).
- (2) 接收节点在接收 RTS 消息的过程中采集  $C_{CTRL}$  中 RTS 消息的信号强度  $Pr$ ,在此之前,节点采集本节点数据信道  $C_{DATA}$  中噪声和其他干涉节点的强度  $N$ .如果  $Pr/N < \beta + \Delta$ ,则接收节点不能正确接收后续 DATA 消息,在控制信道发送 NCTS 消息对 RTS 消息进行应答( $C_{12}$ ).如果  $Pr/N \geq \beta + \Delta$ ,则接收节点能够正确接收后续 DATA 消息.接收节点发送 CTS 消息对 RTS 消息进行应答,同时在信道  $C_{BTr}$  发送忙音 BTr.忙音 BTr 的功率  $Pb$  根据公式(6)计算( $C_8$ ).其中, $\Delta$ 的目的是在后续过程中, $C_{CTRL}$  中的  $N$  增加不明显,不会影响数据的正确接收.
- (3) 发送节点在发送 RTS 消息等待 CTS 消息( $C_2$ ).如果 TIMEOUT 时间内仍然没有接收到 CTS 消息,则重新开始( $C_4$ );如果接收到接收节点的 CTS 消息,则在数据信道中发送 DATA 消息( $C_3$ ).
- (4) 接收节点在发送完 CTS 消息后等待 DATA 消息( $C_9$ ).如果正确接收 DATA 消息,则结束忙音 BTr ( $C_{11}$ );如果没有成功接收 DATA 消息,则持续发送 BTr( $C_{10}$ ).
- (5) 发送节点在发送 DATA 消息后一段时间内持续检测忙音 BTr( $C_5$ ).如果忙音 BTr 没有结束,说明接收节点没有正确接收 DATA 消息,进行重发( $C_6$ );如果忙音 BTr 结束,说明接收节点已经正确接收 DATA 消息,数据发送过程完成( $C_7$ ).



- |                                                    |                                                 |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $C_1$ : Ready, no BTr, $C_{CTRL}$ clear/           | $C_2$ : End of transmission/set timer           |
| $C_3$ : CTS received/                              | $C_4$ : Timer out                               |
| $C_5$ : End of transmission/set timer              | $C_6$ : BTr sensed/                             |
| $C_7$ : No BTr/                                    | $C_8$ : RTS received and SINR satisfied/        |
| $C_9$ : End of transmission/set timer,transmit BTr | $C_{10}$ : Data check error/                    |
| $C_{11}$ : Timer out or data check ok/shutdown BTr | $C_{12}$ : RTS received and SINR not satisfied/ |

Fig.3 Finite state machine of e-MAC

图 3 e-MAC 有限状态机

## 4 协议分析与仿真

### 4.1 网络空间复用率

e-MAC 协议采用忙音机制解决隐藏节点问题.与现有协议相比,由于接收节点通过所接受信号的强度动态调整忙音覆盖范围,协议能够有效提高网络空间复用率.

在解决暴露节点问题方面,只要节点不是隐藏节点,不论数据信道是否空闲都可以发送数据,协议允许暴露节点并行发送数据.而且,协议中暴露节点在接收到 RTS 消息后,通过判断接收到 RTS 消息的信号强度与数据信道中干涉信号强度是否满足信噪比的要求来决定是否接收后续 DATA 消息,暴露节点接收问题也得到了解决,可进一步提高网络空间复用率.

**定理 1.** 通过解决固定干涉控制距离问题,e-MAC 协议的空间复用率为 DUCHA 协议的 2 倍.

证明:根据文献[12]中的结论,在节点的分布满足泊松分布,网络负载满足“重负载模型”时,网络空间复用率反比于单个传输所占用的面积.下面分别分析 e-MAC 协议和 DUCHA 协议下单个传输所占用的面积.

如图 4 所示,节点 N1 向节点 N2 发送数据,T-R 距离为  $d$ ,节点最大发送距离为  $D$ ,隐藏节点的分布半径为  $Din$ .由于协议能够彻底解决暴露节点问题,面积  $A1$  内的节点可以发送数据,单个传输所占面积仅仅包括忙音的覆盖范围.

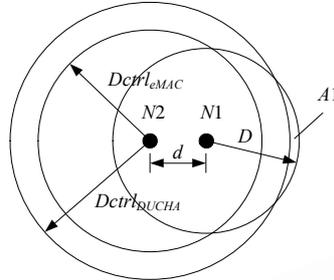


Fig.4 Spatial reuse of e-MAC

图 4 e-MAC 的空间复用率

在 DUCHA 协议下,为保证彻底解决隐藏节点问题,节点的干涉控制半径  $Dctrl_{DUCHA} = \max(Din) = D \times \sqrt[3]{\beta}$ , 于是,单个传输占用面积的数学期望  $E[S(q')]$ 为

$$E[S(q')] = D^2 \times \beta^{\frac{2}{3}} \times \pi \tag{7}$$

e-MAC 协议采用忙音功率控制机制后,为保证彻底消除隐藏节点,同时提高网络空间复用率,则需要

$$Dctrl_{eMAC} = Din \tag{8}$$

而节点的干涉距离  $Din$  根据 T-R 距离动态变化.假设网络中节点分布均匀,节点密度为  $\sigma$ ,记当节点位于位置  $q$  时传输所占用的面积为  $S(q)$ ,则  $S(q)$  的期望为

$$E[S(q)] = \iint_{q \in R} p(q) s(q) dx dy \tag{9}$$

其中  $p(q) = \begin{cases} \frac{1}{\pi D^2}, & q \in R \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ ,  $R$  为圆心在原点、半径为最大发送距离  $D$  的圆,则

$$\begin{aligned} E[S(q)] &= \int_0^{2\pi} \int_0^D \frac{1}{\pi D^2} \pi (\rho^2 \sqrt{\beta})^2 \rho d\rho dr \\ &= 2\pi \times \frac{1}{D^2} \times \beta^{\frac{2}{3}} \times \int_0^D \rho^3 d\rho \\ &= \frac{\pi}{2} \times D^2 \times \beta^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \tag{10}$$

DUCHA 协议下单个传输占用面积的期望为 e-MAC 协议下单个传输占用面积期望的 2 倍,即 e-MAC 协议下网络空间复用率是 DUCHA 协议下的 2 倍.命题得证. □

由于分析解决暴露节点接收问题所带来的网络空间复用率的提高有较大的难度,我们通过仿真来分析网络空间复用率的提高.

#### 4.2 协议性能仿真

本文使用 Glomosim<sup>[13]</sup>作为模拟仿真实验平台.为了评估 e-MAC 协议的性能,仿真选用 802.11DCF 和 DUCHA 协议与本文中的 e-MAC 协议进行对比.在 DUCHA 协议中,作者在仿真时配置控制信道与数据信道中带宽分配为 1:3,本文采用相同配置.详细仿真环境的配置参数见表 2.

以网络吞吐量作为性能比较的最主要指标,这里,吞吐量主要是指各个数据流端到端吞吐量之和。

首先,我们对如图 5 所示的简单拓扑结构下网络性能进行仿真对比。节点 A 向节点 B 发送数据,节点 C 向节点 D 发送数据。节点 A 与节点 B 之间的距离为 50m,节点 C 与节点 D 之间的距离为 50m,节点 B 与节点 C 之间的距离为  $x$ ,通过改变  $x$  的大小来测试网络吞吐量与节点间的冲突,以验证隐藏节点问题的解决情况以及网络空间利用率。节点通信速率为 18Mbps,信噪比要求为 10.79dB,节点发射功率为 15dBm。采用 CBR(constant bit rate)模型发送数据,数据包大小为 1024 字节,投递速率为 256 包/秒。

Table 2 Simulation environment configuration

表 2 仿真配置参数

TERRAIN-DIMENSIONS	1000M×1000M
PROPAGATION-PATHLOSS	TWO-RAY
NOISE-FIGURE	10.0
TEMPERATURE	290.0K
RADIO-TYPE	RADIO-ACCNOISE
RADIO-FREQUENCY	2.4GHZ
RADIO-RX-TYPE	SNR-BOUNDED
RADIO-TX-POWER	15.0dBm
RADIO-RX-THRESHOLD	-81dBm
RADIO-RX-SENSITIVE	-90dBm
RADIO-ANTENNA-GAIN	0.0DB
ROUTING-PROTOCOL	STATIC
APPLICATION-PROTOCOL	CBR
APPLICATION-PACKET-SIZE	1024Byte

图 6 与图 7 分别为不同协议下网络吞吐量以及 DATA 消息的冲突。802.11DCF 协议下,当  $299m < x < 557m$  时,网络吞吐量急剧下降。这主要是由于,当  $x$  在这个范围内时,节点 B 与节点 C 能够相互干涉,正确地接收数据。但由于两者之间距离超过最大发送距离,RTS/CTS 无法有效防止这种情况下的隐藏节点,于是节点间冲突急剧增多,导致网络吞吐量降低。当  $x > 557m$  时,两个会话之间互不干涉,吞吐量保持恒定。DUCHA 协议由于能够彻底解决隐藏节点问题,网络中冲突较少。但为了防止隐藏节点,节点的干涉控制距离为 557m。这样,当节点  $x < 557m$  时,在节点 B 接收数据过程中,节点 C 不能发送数据,吞吐量较低;在  $x > 557m$  时,两个会话互不影响,吞吐量明显提高。在 e-MAC 协议中,由于节点 A 与节点 B 之间的距离为 50m,干涉控制距离为 93m,所以当  $x > 93m$  时,两个会话能够并行进行,网络吞吐量开始增加。当  $x < 100m$  或者  $x > 557m$  时,802.11DCF 协议下,网络吞吐量明显高于 DUCHA 协议和 e-MAC 协议。这主要是由于在后两个协议中,1/3 的带宽划分为控制信道,而在数据包较大时,RTS/CTS 消息所占比例远远小于 1/3,导致在数据信道饱和的情况下,控制信道负载仍然较轻,影响了网络吞吐量。

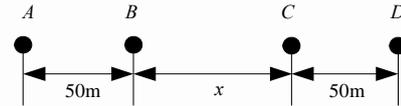


Fig.5 Simple topology

图 5 简单拓扑结构

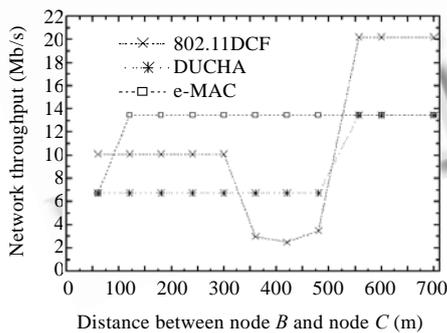


Fig.6 Network throughput under simple topology

图 6 简单拓扑结构下网络吞吐量

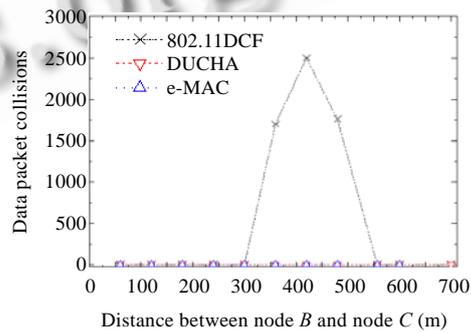


Fig.7 Data packets collisions under simple topology

图 7 简单拓扑结构下网络中数据包的冲突

然后,分析网络拓扑结构中协议的性能.如图 8 所示,网络由 100 个节点构成网络拓扑.网络中最左边节点 0~节点 90 分别向最右边节点 9~节点 99 发送数据.采用 CBR 模型发送数据,数据包大小 1 024 字节,投递速率为 256 包/秒.路由通过手动配置,使数据如图 8 所示逐跳路由.

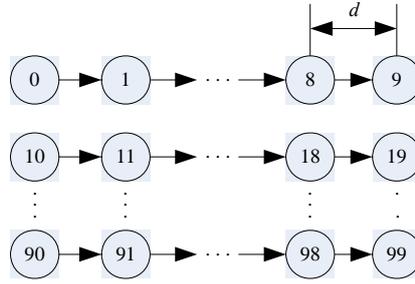


Fig.8 Grid topology 图 8 网格拓扑结构

图 9 为在不同协议下,不同带宽条件下的网络吞吐量.对于 802.11DCF 协议,根据表 1,带宽越高,信噪比要求越高,在同样发送距离条件下干扰距离越大,导致 RTS/CTS 防止隐藏节点的效率越低.当带宽为 6M 时,由于信噪比要求不高,RTS/CTS 防止隐藏节点的效率较高.随着节点间距离的增大,网络中多个节点可以建立并行发送,网络空间复用率提高,吞吐量增大.当带宽为 18M 时,如果节点间距离大于 270m,网络中隐藏节点开始增多,导致网络吞吐量降低.但当带宽为 54M,节点间距离非常接近时,协议采用的 CSMA/CA 机制使网络中冲突较小,随着节点间距离的增大,网络中隐藏节点导致网络吞吐量急剧下降,直至网络瘫痪.对于 DUCHA 协议,由于协议可以彻底解决隐藏节点问题,从而能够消除网络中的冲突.在图 9 所示的 3 种带宽条件下,随着节点间距离的增大,空间复用率增大,网络吞吐量也逐步提高.在 e-MAC 协议中,3 种带宽条件下网络都保持基本稳定的网络吞吐量.通过上文分析,节点的干扰距离与 T-R 距离成正比;而在本仿真拓扑中,随着 T-R 距离 d 的增大,可能的干扰节点距离也按比例增大,d 的变化不影响网络中的并行发送数,网络吞吐量保持基本恒定.而且我们还可以发现,节点带宽的提高并没有提高网络吞吐量.这主要是由于节点通信速率提高的同时信噪比要求也会提高,干扰控制半径增大,空间复用率降低,通信速率提高对网络吞吐量的影响被空间复用率的降低所抵消.

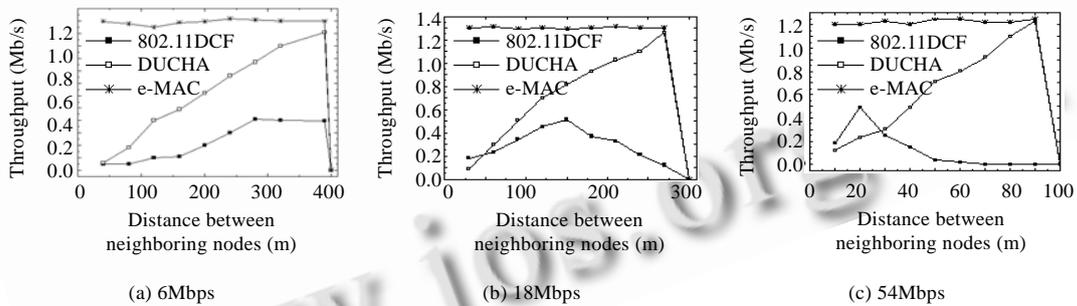


Fig.9 Network throughput under different bandwidth

图 9 不同带宽条件下网络吞吐量

最后,我们构造随机拓扑结构进行仿真.在 1000m×1000m 的平面范围内随机生成 n 个节点,任意选择 n/10 个节点作为发送节点,在剩余节点中任意选择 n/10 个接收节点,然后分别针对 3 个协议进行仿真.路由协议采用 TBP(ticket based probing)协议<sup>[14]</sup>.仍然采用 CBR 模型发送数据,数据包大小为 1 024 字节,投递速率为 256 包/秒.

图 10 为不同节点数 n 条件下的网络吞吐量.在节点数较小时,节点密度较小,网络负载轻,发送节点与接收节点的平均路径较短,网络吞吐量较高.随着节点数的增多,节点密度增大,网络负载增大,路由跳数也增大,导致

网络吞吐量降低.由于 802.11DCF 不能有效地解决隐藏节点问题,在网络负载较大时,吞吐量急剧降低.DUCHA 协议与 e-MAC 协议能够彻底解决隐藏节点问题,吞吐量较高.对比这两种协议,由于 e-MAC 通过两种途径来提高网络空间复用率,因此可以有效提高网络吞吐量.e-MAC 协议下平均网络吞吐量比 DUCHA 协议提高 87%.

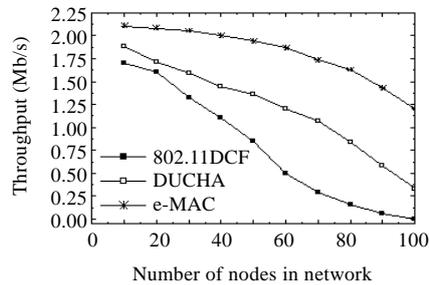


Fig.10 Throughput under random topology

图 10 任意拓扑结构下网络吞吐量

## 5 总 结

现有 MAC 协议在解决隐藏节点问题时着重于彻底消除网络中的隐藏节点<sup>[15]</sup>,忽略了网络空间复用率问题,引起固定干涉控制距离问题.现有协议在解决暴露节点问题时着重于如何允许暴露节点并行发送数据,忽略了暴露节点接收问题.固定干涉控制距离问题和暴露节点接收问题影响了网络空间复用率,导致网络吞吐量降低.本文的 e-MAC 协议采用忙音功率控制方法和信号强度计算方法分别解决上述问题,提高了网络空间利用率,最终提高了网络吞吐量.

**致谢** 在此,向对本文提出有益建议的审稿专家表示感谢.

## References:

- [1] Zhai HQ, Wang JF, Fang YG. DUCHA: A new dual-channel MAC protocol for multihop ad hoc networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006,5(11):3224–3233.
- [2] Kleinrock L, Tobagi F. Packet switching in radio channels: Part I—Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE Trans. on Communications*, 1975,23(12):1400–1416. [doi: 10.1109/TCOM.1975.1092768]
- [3] Tobagi F, Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part II—The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution. *IEEE Trans. on Communications*, 1975,23:1417–1433. [doi: 10.1109/TCOM.1975.1092768]
- [4] IEEE standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements—Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. 2007.
- [5] Phil K. MACA—A new channel access method for packet radio. In: *Proc. of the ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf. Ontario: ARRL*, 1990. 134–140. <http://ranger.uta.edu/~li/1-25-lecture-2.pdf>
- [6] Xu K, Gerla M, Sang B. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks. In: Wang Chin Liang, ed. *Proc. of the 2002 IEEE Global Telecommunications Conf. Taipei: IEEE Press*, 2002. 72–76.
- [7] Haas ZJ, Deng J. Dual busy tone multiple access (DBTMA)—A multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2002,50(6):975–985. [doi: 10.1109/TCOMM.2002.1010617]
- [8] Kumar S, Raghavan VS, Deng J. Medium access control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(3):326–358. [doi: 10.1016/j.adhoc.2004.10.001]
- [9] Leng SP, Zhang L, Chen YF. IEEE 802.11 MAC protocol enhanced by busy tones. In: Hyung Jin Choi, ed. *Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Communications*. Boston: IEEE Press, 2005. 2969–2973.
- [10] Goldsmith A. *Wireless Communications*. Prentice Hall PTR, 2005.

- [11] So J, Vaidya N. Multi-Channel MAC for ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In: Perkins C, ed. Proc. of the 5th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2004. 222–233.
- [12] Kleinrock L, Silvester J. Spatial reuse in multihop packet radio networks. Proc. of the IEEE, 1987,75(1):156–167. [doi: 10.1109/PROC.1987.13711]
- [13] Zeng X, Bagrodia R, Gerla M. GloMoSim: A library for parallel simulation of large-scale wireless networks. In: Nicol D, ed. Proc. of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation. Banff: ACM Press, 1998. 154–161.
- [14] Chen SG, Nahrstedt K. Distributed quality-of-service routing in ad hoc networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999,17(8):1488–1505. [doi: 10.1109/49.780354]
- [15] Liu K, Li JD, Zhang WZ. A novel multiple access protocol for multihop wireless ad hoc networks. Chinese Journal of Computers, 2003,26(8):925–932 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [15] 刘凯,李建东,张文柱.一种用于多跳分布式无线网络的多址接入协议及其性能分析.计算机学报,2003,26(8):925–932.



张克旺(1977—),男,甘肃会宁人,博士生,主要研究领域为 ad hoc 网络,无线传感器网络,实时网络.



张琼(1977—),女,助教,主要研究领域为无线网络,网络安全.



潘煜(1975—),男,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.



张德运(1941—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络.