

面向多跳无线网络的无冲突 MAC 协议*

张克旺¹⁺, 张德运¹, 杜君²

¹(西安交通大学 电子与信息学院, 陕西 西安 710049)

²(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

Collision Free MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks

ZHANG Ke-Wang¹⁺, ZHANG De-Yun¹, DU Jun²

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

²(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhangkw@ieee.org, http://www.xjtu.edu.cn

Zhang KW, Zhang DY, Du J. Collision free MAC protocol for multi-hop wireless networks. *Journal of Software*, 2009,20(7):1895–1908. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3397.htm>

Abstract: Collision rate increases significantly with the appearance of hidden nodes in multi-hop wireless network, which results in unsuccessful transmissions and leads to performance degradation of the network. The RTS/CTS handshakes of 802.11DCF can not eliminate hidden nodes, and the situation becomes worse when the nodes are equipped with higher speed wireless devices, which require higher signal to interference and noise ratio (SINR) for successful reception. This paper analyzes the prevalence of hidden nodes in multi-hop wireless network and proposes an MAC protocol named double channel collision free media access protocol—DCCFMA to solve the hidden nodes problem. DCCFMA is a dual channel MAC (media access control) protocol, receiver adjusts the transmitting power of the control channel according to the signal power received from the transmitter so as to cover all hidden nodes around the receiver. Simulation results show that DCCFMA solves hidden nodes problem better than RTS/CTS (ready-to-send/clear-to-send) handshakes and achieves 24% additional network throughput as compared to that of 802.11 DCF.

Key words: multi-hop wireless network; hidden nodes problem; IEEE 802.11DCF; DCCFMA; dual channel

摘要: 多跳无线网络中隐藏节点导致节点之间的冲突频繁、数据重传率高、网络吞吐量下降。而 802.11 DCF 中的 RTS/CTS(ready-to-send/clear-to-send)机制不能有效地防止隐藏节点,特别是随着网络中节点通信速率的提高,由于节点的信噪比要求也相应提高,接收节点受到更大范围内隐藏节点的干涉,RTS/CTS 机制防止隐藏节点效率急剧降低。首先,在考虑网络累积干涉以及环境噪音的情况下分析了多跳无线网络中的隐藏节点问题。然后,提出一种双信道无冲突 MAC(media access control)协议 DCCFMA(double channel collision free media access)。DCCFMA 协议采用双信道结构,接收节点根据数据信道中发送节点的信号强度动态调节控制信道的发射功率,以完全覆盖接收节点周围所有的隐藏节点,保证接收节点在接收过程中不受干涉。DCCFMA 协议能够有效地解决多跳无线网络中的

* 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))

Received 2008-01-06; Revised 2008-02-27; Accepted 2008-06-11; Published online 2009-05-07

隐藏节点问题.仿真结果表明,与 802.11DCF 相比,DCCFMA 机制下的平均网络吞吐量增加了 24%.

关键词: 多跳无线网络;隐藏节点问题;IEEE 802.11 DCF;DCCFMA;双信道

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

Ad hoc 网络由不需要任何基础设施的一组具有动态组网能力的节点组成,这种无中心自组织的特点,使得 ad hoc 网络在军事、抢险救灾等应用场合具有独特的优势^[1].人们普遍认为,由于当前无线设备带宽的限制,ad hoc 网络吞吐量较低.随着高带宽设备的出现,基于现有通信协议,节点采用高带宽设备就可以提高 ad hoc 网络的吞吐量.

Ad hoc 网络的吞吐量受到节点带宽、硬件信噪比要求以及网络各层次协议效率等诸多因素的影响,单纯地提高其中一项性能参数而忽略其他因素,并不能有效地提高网络吞吐量.随着节点带宽的提高,正确接收数据所需的信噪比要求也相应提高,隐藏节点分布范围增大,成为影响网络性能的主要因素.现有 802.11DCF 等协议认为,节点的发送范围能够覆盖所有的隐藏节点,但在实际节点接收模型中,隐藏节点的分布范围远大于节点的发送范围,协议中 RTS/CTS 机制在较低信噪比要求的情况下可以防止大部分隐藏节点,但是随着信噪比要求的逐步提高,网络中的隐藏节点分布范围急剧增大,RTS/CTS 机制防止隐藏节点的效率也随之降低.

本文首先在考虑积累干涉以及环境噪音的情况下,分析隐藏节点问题;在此基础上,提出一种能够有效防止隐藏节点的 MAC 协议 DCCFMA(double channel collision free media access),协议以双信道硬件结构为基础,接收节点通过“放大器”机制根据接收到发送节点的信号强度动态调整控制区域的大小,保证接收节点周围一定范围内不出现隐藏节点,“放大器”机制通过合理调整控制区域,在解决隐藏节点问题的同时防止由于控制区域过大而降低网络的空间利用率,保证较高的网络吞吐量.

本文第 1 节是相关工作介绍.第 2 节在考虑网络中节点的积累干涉以及环境噪音的情况下,定义并分析隐藏节点问题以及 RTS/CTS 机制解决隐藏节点的效率.第 3 节详细描述 DCCFMA.第 4 节对 DCCFMA 协议与 802.11DCF 协议性能进行仿真对比.第 5 节对全文进行总结.

1 相关工作

MAC 层协议是 ad hoc 网络协议的重要组成部分,是数据在无线信道上发送和接收的主要控制者.CSMA/CA 是 802.11DCF 等众多协议的基础,隐藏节点问题是其最大的缺点之一^[2].隐藏节点影响数据的正确接收,引起数据的频繁重传;而且过多的重传使 MAC 层认为接收节点失效,向网络层报告链路失败,网络层重新启用路由选择过程,导致网络中冲突加剧,吞吐量急剧降低^[3].

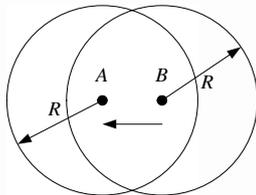


Fig.1 Traditional hidden nodes problem model

图 1 传统隐藏节点问题模型

802.11 DCF 是目前无线局域网和移动 ad hoc 网络中使用最广泛的协议^[4].802.11DCF 中以 RTS/CTS 机制解决隐藏节点问题:数据在发送之前进行 RTS/CTS 握手,如图 1 所示(R 为节点发送半径),节点 B 向节点 A 发送 DATA 帧之前首先向节点 A 发送 RTS 消息,节点 A 接收到 RTS 消息后,如果允许节点 B 发送数据,则以 CTS 消息进行响应,RTS/CTS 消息中含有后续会话所需时间,节点 A 和节点 B 周围所有接收到 CTS 或者 RTS 消息的节点根据消息中包含的时间进行退避,在此时间内不进行数据发送.

802.11DCF 协议中,由于 RTS/CTS 消息之间发生冲突等原因导致邻近节点没有正确接收 RTS/CTS 消息,在这种情况下,隐藏节点问题依然存在^[5].DBTMA(dual busy tone media access)协议^[6]采用双信道硬件结构试图彻底解决隐藏节点和暴露节点问题.与 802.11DCF 比较,DBTMA 协议中发送节点在发送 DATA 消息之前首先向接收节点发送 RTS 消息,接收节点以控制信道的忙音应答,发送节点紧接着发送 DATA 消息,控制信道的忙音持续到 DATA 消息传输完成,邻近节点在侦听到忙音后不发送数据.由于接收节点在接收过程中一直在控制信道发送忙音,所以不会出现因未能正确接收控制消息而导致的隐藏节点.

802.11DCF 协议解决隐藏节点问题主要基于一种假设,认为所有隐藏节点位于接收节点的发送范围内.在

DBTMA 协议中,由于控制信道以频带外信令技术来实现,控制信道信号的强度与数据信道信号的强度相同,因而协议还是基于同样假设.实际无线设备接收数据必须满足一定的信噪比要求,并且现有无线设备的信噪比要求远远大于 0dB,因而隐藏节点的分布范围大于节点的发送范围.

Xu 等人在文献[3]中首先指出了上述假设的不足,通过推导得出,如果节点的信噪比要求为 10dB,隐藏节点的分布范围为接收节点发送范围的 1.78 倍.为解决隐藏节点问题,文献[3]提出了一种 CCR(conservative CTS reply)协议,在 CCR 协议中,接收节点只响应距离在 0.56(1/1.78)倍发送范围内节点的 RTS 消息,由于这些节点发送的信号到达接收节点的能量较强,发送半径外的节点信号不足以干涉接收节点的正确接收,从而防止了隐藏节点的出现.但是 CCR 协议不能保证原有网络的连通性,而且随着设备速率的提高,节点的信噪比要求也大幅提高,如果采用 CCR 协议,网络的连通性将急剧降低,影响网络的可用性.而且,文献[3]在分析隐藏节点问题过程中忽略了多个节点的积累干涉以及环境噪音对隐藏节点问题的影响.

文献[7]在 DBTMA 协议的基础上,通过调整降低忙音信道的 CCA(channel clear assessment)阈值增大节点的侦听范围,保证接收节点周围两跳范围内临近节点在接收节点接收数据过程中不发送任何数据,从而解决隐藏节点问题.但当 CCA 阈值降低到一定程度时,为保证载波侦听的精度,要求节点天线具有很高的灵敏度^[3],而满足这样要求的天线存在体积大、成本高的缺点,所以,降低 CCA 阈值的方法无法解决更高信噪比要求情况下的隐藏节点问题.

Zhai 等人在文献[8]中提出一种 DUCHA 协议用于解决隐藏节点问题、暴露节点问题以及接收节点阻塞问题. DUCHA 协议中信道被划分为 3 个: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 消息,忙音信道用于传输忙音. DATA 消息与控制消息分开传输的目的是解决接收节点阻塞问题.在解决隐藏节点问题方面, DUCHA 协议也认为隐藏节点最远只出现在 2 倍(1.78 取整)发送范围内,所采取的方法与上述文献[7]中的方法相同.同时, DUCHA 协议也没有考虑网络中积累干涉以及环境噪音对隐藏节点问题的影响.

2 隐藏节点问题描述以及 802.11DCF 对隐藏节点的控制

在提出解决隐藏节点问题的协议之前,本节中,我们在考虑网络积累干涉以及环境噪音的情况下,分析隐藏节点问题及隐藏节点分布范围的影响因素.

2.1 无线传播模型

无线信号的传播模型根据传播环境不同可以分为自由空间传播模型和近地传播模型^[9],两种传播模型可以统一表达为

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

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), λ 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).

2.2 节点物理接收模型

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值称为信噪比 SINR(signal to interference and noise ratio)^[10],用 γ 表示.只有当节点接收的信噪比大于某个阈值时,节点才能够正确接收到消息.节点 b 接收节点 a 发送的消息时,其信噪比可表示为

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

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, ϕ 为其他节点的信号在节点 b 处的积累强度,即

$$\phi = \sum_{x \in S, x \neq a} Pr_x \quad (3)$$

式中, S 为网络中所有发送节点构成的集合.

2.3 隐藏节点问题

为了方便分析和讨论,首先做如下假设与约定(如图 2 所示):

假设 1. 假设 ad hoc 网络由同构节点组成,节点的发射功率为 P_t .

- 最大传输距离(D_t):在没有任何干涉的情况下,数据能够正确传输的最大距离. D_t 与发送节点的发射功率、天线增益以及传输环境相关.

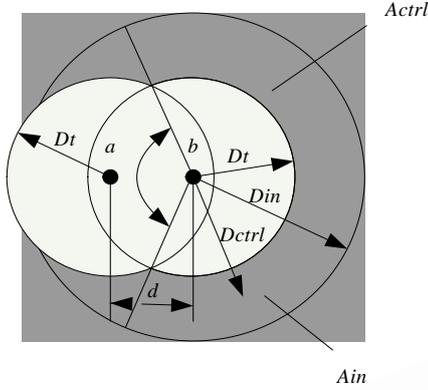


Fig.2 Hidden nodes problem under SINR model

图 2 SINR 条件下隐藏节点问题

- 载波侦听半径(D_{cs}):节点通过载波侦听机制能够感知到最远发送节点的距离. D_{cs} 与节点的发射功率及信道空闲判断阈值(CCA)相关.
- 发送距离(d):发送节点与接收节点间的距离.
- 干涉半径(D_{in}):保证接收节点不受积累干涉及环境噪音影响的最小半径.在发送节点向接收节点发送数据的过程中,如果协议能够保证干涉半径 D_{in} 范围内无节点发送数据,则接收节点能够正确接收数据.
- 干涉区域(A_{in}):二维平面上,以接收节点为圆心,半径为 D_{in} 的圆形区域.
- 干涉控制半径(D_{ctrl}):在协议的控制下,距离接收节点 D_{ctrl} 范围内不出现隐藏节点.当 $D_{ctrl} \geq D_{in}$ 时,网络中不存在隐藏节点,但过大的 D_{ctrl} 会导致网络空间利用率降低;当 $D_{ctrl} < D_{in}$ 时,网络中可能存在隐藏节点.

- 干涉控制区域(A_{ctrl}):以接收节点为圆心、以 D_{ctrl} 为半径的区域.

在 WLAN(wireless LAN)等环境下,网络中节点数量比较少且分布稀疏,隐藏节点问题主要表现为单个隐藏节点干涉接收节点正确接收数据.在典型的 ad hoc 网络中,节点的数量众多且分布密集,在这种情况下,即使单个节点的干涉不足以影响接收节点的正确接收,多个节点的积累干涉也可能影响接收节点的正确接收.因此,在大规模 ad hoc 网络中,多个节点的积累干涉同样属于隐藏节点问题.

假设 ad hoc 网络中节点均匀分布在二维平面上,密度为 σ ,发送节点 a 向接收节点 b 发送数据.接收节点 b 受到的干涉来源于干涉区域 A_{in} 外所有发送节点信号的积累.设 Σ 区域为二维平面上 A_{in} 的补集,当 Σ 区域内所有节点发送数据时,接收节点 b 受到的干涉为

$$\phi' = \iint_{A_{in}} G \frac{P_t}{d^{\lambda}} \sigma ds = \frac{G \sigma P_t}{D_{in}^{\lambda-2}} \quad (4)$$

假设 MAC 协议已经解决了隐藏节点问题, πD_{in}^2 面积范围内只允许一个节点发送数据(因为 πD_{in}^2 范围内只有一个接收节点,与之对应,只有一个发送节点),则接收节点可能受到的最大干涉为

$$\phi = \phi' / \pi D_{in}^2 = \frac{\pi G \sigma P_t}{D_{in}^{\lambda-2}} / \pi D_{in}^2 = \frac{G \sigma P_t}{D_{in}^{\lambda}} \quad (5)$$

节点 b 正确接收节点 a 数据的条件是 $SINR \geq \beta$,

$$SINR = \frac{P_{r(a \rightarrow b)}}{\phi + N_0} = \frac{G \frac{P_t}{d^{\lambda}}}{\frac{G \sigma P_t}{D_{in}^{\lambda}} + N_0} \geq \beta \quad (6)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{1}{D_{in}} \right)^{\lambda} \geq \frac{1}{d^{\lambda} \sigma} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{G} \frac{N_0}{P_t} \right) \quad (7)$$

根据不等式(7)我们可以得出,干涉半径 D_{in} 受到发送距离 d 、信噪比 β 、环境噪音 N_0 、网络中节点密度 σ 、

节点发射功率 P_t 以及节点增益 G 的影响.在 MAC 协议设计过程中忽略任何一个因素都可能导致隐藏节点的出现.

图 3 所示为各个参数对干涉半径 D_{in} 与发送距离 d 之间关系的影响.

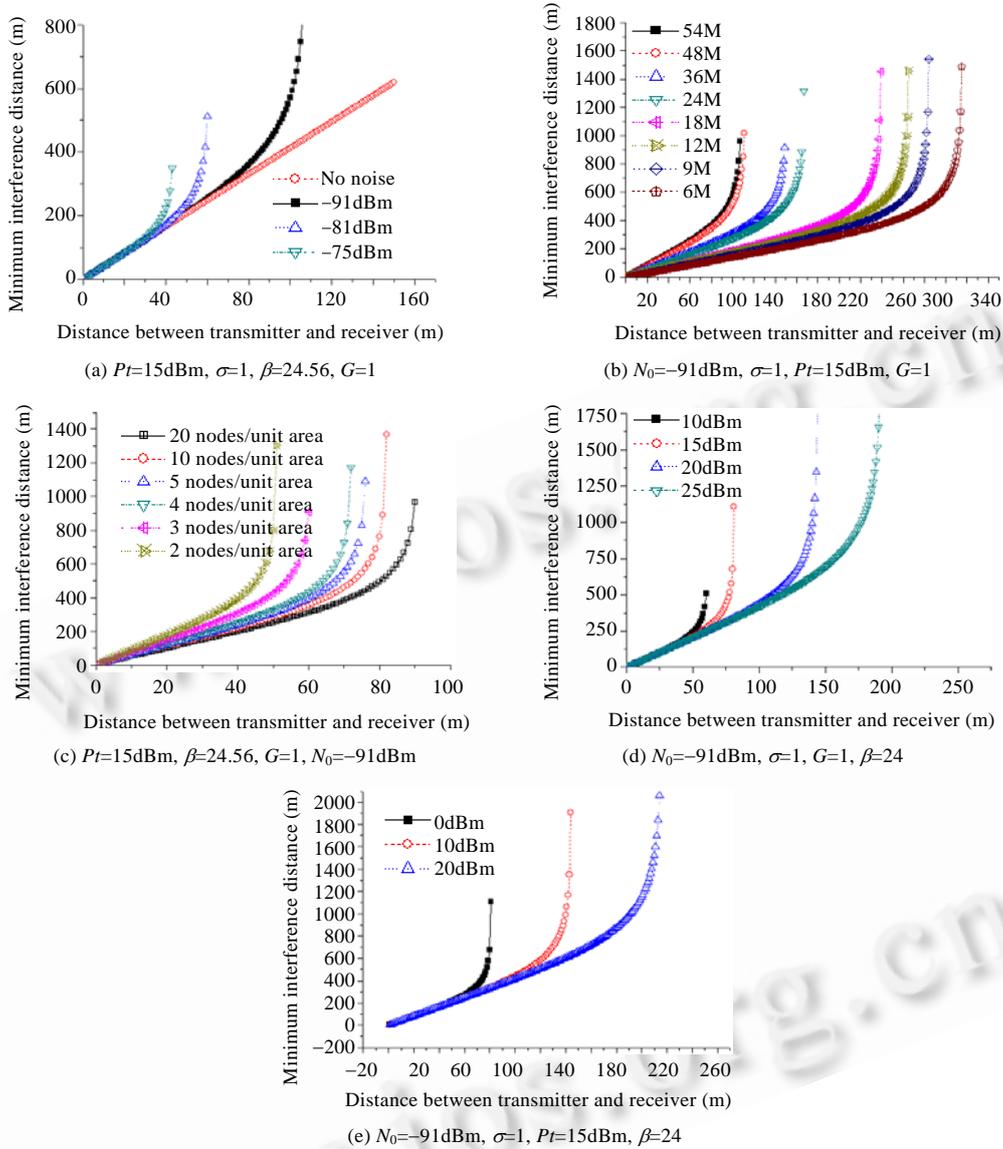


Fig.3 Relationship of D_{in} and d

图 3 干涉距离与发送距离之间关系的影响因素

当发送距离 d 较小时,发送节点的信号到达接收节点的强度远远大于环境噪音,发送距离与干涉半径之间的关系近似为线性比例关系(对应的区域简称线性区域),于是,公式(7)可以简化为

$$\left(\frac{D_{in}}{d}\right)^\lambda \leq \sigma\beta \tag{8}$$

随着发送距离 d 的增大,发送节点信号到达接收节点的强度减小,环境噪音对接收节点的接收造成的影响开始增加,发送距离与干涉半径之间呈非线性关系(对应的区域简称非线性区域).在非线性区域,发送距离 d 的

微小增加,引起的 D_{in} 迅速增大,接收节点在接收数据过程中,不允许周围很大范围内节点发送数据,导致空间利用率降低,影响网络吞吐量.在 MAC 协议设计过程中,需要充分考虑到非线性区域对网络吞吐量的影响.

图 3(a)图所示为不同噪音 N_0 条件下发送距离与干涉半径之间的关系.在无噪音情况下,发送节点距离与干涉半径呈线性关系;随着环境噪音的增大,线性区域逐渐减少.图 3(b)所示为不同信噪比 β 要求下发送距离与干涉半径之间的关系(现有 802.11A/G 设备的信噪比要求见表 1).随着信噪比要求的提高,环境噪音的影响开始加剧,线性区域逐渐减小.图 3(c)所示为不同节点密度 σ 条件下,发送距离与干涉距离之间的关系.随着节点密度的减小,节点的干涉距离逐渐减少,线性区域增大.图 3(d)所示为不同发送功率 P_t 条件下,发送距离与干涉距离之间的关系.随着发送功率的增加,线性区域逐渐增大.图 3(e)所示为不同增益 G 条件下,发送距离与干涉距离之间的关系.

Table 1 Hardware parameter of 802.11A/G device

表 1 802.11 A/G 设备性能参数

Speed (Mbps)	6	9	12	18	24	36	48	54
SINR (dB)	6.02	7.78	9.03	10.79	17.04	18.80	24.05	24.56
Rx sensitivity (dBm)	-82	-81	-79	-77	-74	-70	-66	-65

2.4 802.11DCF中RTS/CTS解决隐藏节点问题的效率

以上分析了隐藏节点的分布范围,根据不等式(7)中发送距离 d 与干涉半径 D_{in} 的关系,可以得到 802.11DCF 中 RTS/CTS 解决隐藏节点的效率.我们采用文献[3]中协议解决隐藏节点效率的定义:

$$E_{RTS/CTS} \approx \begin{cases} \frac{A_{ctrl}}{A_{in}} = \frac{\pi D_t^2}{\pi D_{in}^2} & A_{ctrl} < A_{in} \\ 1 & A_{ctrl} \geq A_{in} \end{cases}$$

在 $P_t=16\text{dBm}, G=0\text{dB}$ 的条件下,将不等式(7)代入上式,得到 RTS/CTS 机制解决隐藏节点的效率(如图 4 所示).

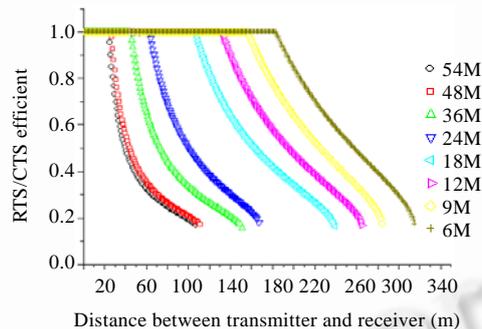


Fig.4 Efficient of RTS/CTS under different data rate of 802.11A/G

图 4 不同信噪比要求条件下 RTS/CTS 机制的效率

RTS/CTS 机制只能防止发送距离范围内的隐藏节点,当发送节点距离较远或者信噪比要求较高时,RTS/CTS 机制无法有效防止超出发送半径的众多隐藏节点,其效率急剧降低.例如,在网络带宽为 54M 情况下,只有当发送距离小于 30m 时,RTS/CTS 机制才能够防止隐藏节点的出现;当发送距离 d 为 80m 时,RTS/CTS 机制的效率不足 20%,绝大部分隐藏节点没有得到有效的控制.

3 DCCFMA 协议描述

3.1 节点双信道结构

DCCFMA 协议基于双信道结构,其中一个信道(数据信道)为高带宽信道,可以采用现有 802.11A/G 设备,其

特性参数见表 1. 设数据信道的 CCA 阈值为 P_s . 另外一个信道(控制信道)只需要能够发送和检测忙音, 不需要进行数据发送和接收. 设控制信道可以发送能量在 $0 \sim P_{\max}$ 范围内任意强度的信号, 能够检测到信号的最小强度也为 P_s .

3.2 放大器机制

由以上几节分析可知, 隐藏节点问题中干涉半径 D_{in} 主要由发送距离 d 决定, 同时受到信噪比要求等因素的影响. 解决隐藏节点问题的关键是在不同信噪比要求以及节点密度等条件下, 根据不同发送距离 d 来调整干涉控制半径 D_{ctrl} , 使 $D_{ctrl} = D_{in}$, 在解决隐藏节点问题的同时防止网络空间利用率的降低. DCCAMA 协议中采用放大器机制防止隐藏节点的出现. 在此机制下, 接收节点根据发送节点的信号强度在控制信道发送一定功率的忙音以覆盖所有隐藏节点, 其过程如下: 接收节点在接收到 RTS 消息的同时, 采集发送节点的信号强度值 $P_{r(a \rightarrow b)}$, 根据公式(6), 干涉半径 D_{in} 为

$$SINR = \frac{P_{r(a \rightarrow b)}}{\phi + N_0} = \frac{P_{r(a \rightarrow b)}}{\frac{G\sigma Pt}{D_{in}^2} + N_0} \geq \beta \quad (9)$$

$$\Rightarrow D_{in} \geq \sqrt{\frac{G\sigma Pt}{\frac{P_{r(a \rightarrow b)}}{\beta} - N_0}} \quad (10)$$

要保证接收节点在接收过程中不受干涉, 则 $D_{ctrl} = D_{in}$, 因为控制信道能够检测到的最小信号强度为 P_s , 根据公式(1), 可以计算控制信道的最小发送功率 P_m :

$$P_s = \frac{P_m}{D_{in}^2} \Rightarrow P_m = D_{in}^2 P_s = \frac{G\sigma Pt}{\frac{P_{r(a \rightarrow b)}}{\beta} - N_0} P_s \quad (11)$$

接收节点在接收后续 DATA 消息的过程中, 在控制信道中发射功率为 P_m 的忙音, 邻近节点在发送数据之前需要侦听控制信道, 如果侦听到忙音, 则推迟数据发送.

公式(11)在硬件上可以采用放大器电路实现, 所以我们称上述方法为“放大器”机制. 在放大器机制中, 如果接收节点收到的信号强度较大, 说明发送距离较小, 则在控制信道以较小的发射功率通知周围较小范围内的节点在其接收过程中不进行数据发送; 如果接收节点收到的信号强度较小, 则说明发送节点距离较远, 通过较强的信号防止周围较大范围内的节点发送数据. 通过这种动态调节机制, 在保证接收节点不受干涉的同时能够提高网络的空间利用率. 放大器机制充分考虑到网络中节点积累干涉以及环境噪音等因素对数据接收造成的影响, 与 802.11DCF 的 CTS/RTS 机制相比, 具有更强的适应能力.

3.3 邻近节点冲突自适应机制

在上节放大器机制中, 控制信道发射功率 P_m 的计算过程中假设网络中节点分布均匀, 但在实际 ad hoc 网络中, 节点的分布往往很难达到完全均匀分布. 如果实际节点密度大于计算节点密度, 根据公式(10)所得干涉半径小于实际干涉半径, 隐藏节点没有得到彻底控制; 如果实际节点密度小于计算节点密度, 由于干涉控制半径过大导致空间利用率较低. DCCFMA 协议采用冲突自适应机制处理节点分布不均匀所造成的影响, 网络中节点为每个邻近节点建立冲突表, 记录本节点在接收每个邻近节点的数据时出现的冲突, 如果冲突过多, 则说明干涉控制半径小于干涉半径, 此时 P_m 在公式(11)的基础上添加修正功率 Δ , 直至冲突降低到一定程度. 当节点接收率为 100% 时, 则可能干涉控制半径过大, 可适当尝试在公式(11)计算所得 P_m 基础上减少 Δ , 如果冲突增大, 则恢复到上次功率, 停止修正; 如果接收率仍然为 100%, 则继续尝试以降低 P_m .

在节点存在移动性的情况下, 移动节点的临近节点是不断变化的, 由于网络中节点众多, 在冲突表中记录所有临近节点的冲突信息将造成存储空间的极大浪费. 为此, 我们可以设定冲突表的最大长度 L , 采用 FIFO 方式管理冲突列表, 及时移除列表中过期的临近节点, 防止存储空间的浪费.

3.4 会话保持现象及其解决方法

在上述放大器机制中,发送距离 d 较大的会话其干涉半径较大,而发送距离较小的会话干涉半径较小,这样会出现会话保持现象.如图 5 所示,节点 A 正在向节点 B 发送数据,由于发送距离较小,干涉控制半径较小,此时,

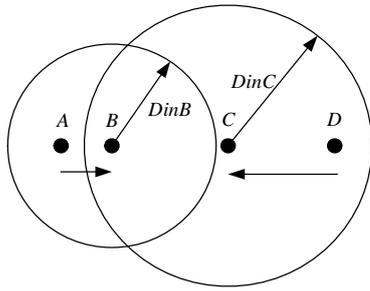


Fig.5 Busy channel assessment of DCCFMA

图 5 信道空闲判断机制

如果节点 D 向节点 C 发送数据,由于发送距离较大,所以,相应干涉半径也较大,节点 C 的干涉半径包括了节点 B 甚至包括节点 A .当包含节点 A 时,受节点 A 的干涉,节点 C 不能成功接收 RTS 消息,会话无法建立;当仅仅包含节点 B 时,如果节点 B 正在接收来自于节点 A 的 DATA 消息,节点 C 能够接收到节点 D 的 RTS 消息,节点 D 能够并发向节点 C 发送数据,但当节点 B 在接收完数据,向节点 A 发送 ACK 消息时,由于信道不空闲,ACK 消息无法发送,节点 A 与节点 B 之间的会话处于保持状态,当节点 C 与节点 D 之间的会话完成后,节点 B 的 ACK 消息才能够发送.会话保持现象不会引起现有会话的失败,但是

当会话周围存在多个发送距离较大的会话时,会话保持现象导致会话保持时间较长,影响会话之间的公平性.为解决会话保持现象,节点首先检测是否处于保持状态,当 ACK 消息因信道占用而无法发送这种现象出现的频率较高时,可以认为出现了会话保持现象.此时,适当增加控制信道的发送功率,让邻近的会话能够感知到本会话的存在,则可以解决会话保持现象.

3.5 算法描述

DCCFMA 是在 802.11DCF 协议基础上为防止隐藏节点问题进行的增强,与 802.11DCF 协议的主要区别是:

1. DCCFMA 协议采用忙音侦听.在 802.11DCF 中,RTS/CTS 机制的另外一个缺点是 RTS/CTS 消息本身可能由于干涉不能被正确接收,出现消息丢失现象^[5],从而导致 NAV(network allocation vector)的失败.在 DCCFMA 协议采用的忙音侦听机制中,接收节点在接收数据过程中持续发送忙音,而节点在发送数据之前都需要进行信道侦听,不存在消息丢失现象.
2. 忙音的覆盖范围通过“放大器”机制动态调节.

Algorithm 1.

1. ON idle:

2. Sensing the average environment noise N_0 ;
3. Capture frame of ongoing dialogue and construct neighboring nodes N ;
4. Calculate node density according to P_t and N ;

5. ON have packet to Send:

6. if *Channel_is_busy* then
7. back off for busy channel;
8. else
9. send RTS to *dest*;
10. end;

11. ON receive RTS:

12. if *Channel_is_busy* then
13. back off and drop RTS;
14. else
15. $delay \leftarrow$ duration field of RTS;
16. Sensing the DATA channel, $Pr \leftarrow RSSI$;

```

17.   if  $Pr > Linear\_Threshold$  then
18.       Drop the RTS;
19.   else
20.        $Pm \leftarrow Amplify(Pr)$ ;
21.       Send busy tone in control channel with power  $Pm$  for  $delay$ ;
22.       response the RTS with CTS;
23.   end;
24. end;
25. ON receive CTS:
26.    $delay \leftarrow$  duration field of RTS;
27.   Sensing the DATA channel,  $Pr \leftarrow RSSI$ ;
28.    $Pm \leftarrow Amplify(Pr)$ ;
29.   Send busy tone in control channel with power  $Pm$  for  $delay$ ;
   Transmit DATA to destination;
31. Function Channel_is_busy
32. begin
33. Sensing the CONTROL channel,  $X \leftarrow RSSI$ ;
34.   if  $X \geq Ps$  then
35.       return TRUE;
36.   else
37.       return FALSE;
38. end;
39. Function Amplify(Pr)
40. Begin
41.   Get SINR requirement  $\beta$  according to current data rate;
42.   calculate  $Pm$  according to formula(11);
43.   adaptive power control;
44.   dialogue-holding release;
45.   return  $Pm$ ;
46. end;

```

节点在空闲状态下通过不断地采集数据信道中 RSSI 的值,得到数据信道噪音(第 1 行).由于信道噪音具有随机性,可以通过一定的算法加以滤波^[11],得到信道的平均噪音 N_0 .

节点通过侦听信道中的帧,得到本节点的邻近节点集 N ,邻近节点集 N 主要用于邻近节点冲突自适应机制(第 2 行).

在放大器机制中,节点计算 Pm 过程中需要预先知道网络中节点的密度,在网络节点发射功率已知的情况下,节点可以通过邻近节点的数量推测节点密度(第 3 行).当网络中的节点分布比较均匀时,得到的节点密度接近实际节点密度.当节点分布不均匀时,冲突自适应机制能够弥补节点密度推测不准确所造成的误差.

节点在发送数据之前首先侦听信道是否空闲,如果信道空闲,则向目标节点发送 RTS 消息(第 6 行~第 10 行).信道是否空闲的判断标准是控制信道中是否有忙音,如果控制信道中的信号强度大于或等于 Ps ,则认为信道中存在忙音;如果控制信道中的信号强度小于 Ps ,则认为信道中没有忙音.协议中, *Channel_is_busy* 函数用于判断信道是否空闲(第 31 行~第 38 行).

节点在接收到 RTS 消息后,根据信号强度判断发送距离 d 是否在线性区域:如果在线性区域,则进行后续处

理;如果超出了线性区域,则不进行响应,防止会话的干涉控制区域过大,导致网络空间利用率低(第 17 行~第 23 行).得到满足信号强度的 RTS 消息后,如果此时节点处于空闲状态,则通过数据信道向发送节点发送 CTS 消息进行应答.节点在接收 RTS 消息的同时采集数据信道的信号强度 P_r ,通过上节描述的放大器机制,根据 P_r 得到控制信道发射强度 P_m ,在经过上述邻近节点冲突自适应处理以及会话保持处理后,得到发射功率 P_m' ,调整控制信道的发射功率为 P_m' ,以此功率在控制信道发送忙音直至会话结束(第 11 行~第 24 行).

发送节点收到 CTS 消息后也进行信道能量采集,进行同样的放大过程,在控制信道发送忙音.与此同时,在数据通道发送数据.发送节点发送忙音的目的是保证接收节点在成功接收数据后发送的 ACK 消息能够成功被发送节点接收.DATA 消息发送完成后,接收节点如果校验数据无误,在数据信道发送 ACK 消息,停止发送忙音(第 25 行~第 30 行).

发送节点收到 ACK 消息后也停止发送忙音,完成整个会话过程.

4 实验结果与分析

本文使用 Glomosim^[12]作为模拟仿真实验平台.为了评估 DCCAMA 协议的性能,仿真选用 802.11DCF 作为比较对象,与本文中的 DCCAMA 协议进行对比.详细仿真参数见表 2.

Table 2 Simulation environment configuration

表 2 仿真配置参数

TERRAIN-DIMENSIONS	2000M×2000M
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	16.0dBm
RADIO-ANTENNA-GAIN	0.0dBm
ROUTING-PROTOCOL	STATIC
APPLICATION-PROTOCOL	CBR
APPLICATION-PACKET-SIZE	1 460 Bytes

节点的接收灵敏度是指节点能够正确接收数据所需的最小能量,典型 802.11A/G 设备的接收灵敏度见表 1.

4.1 不同带宽条件下隐藏节点对网络吞吐量的影响

为了说明不同速率条件下隐藏节点对网络性能造成的影响,首先仿真 802.11DCF 协议下的网络吞吐量.仿真网络由 100 个节点按照 10×10 的网格结构部署,相邻节点之间的距离为 d ,网络最下部的 10 个节点向对应最上部的 10 个节点发送数据.不同带宽要求的信噪比见表 1,不同速率条件下网络的吞吐量如图 6 所示.

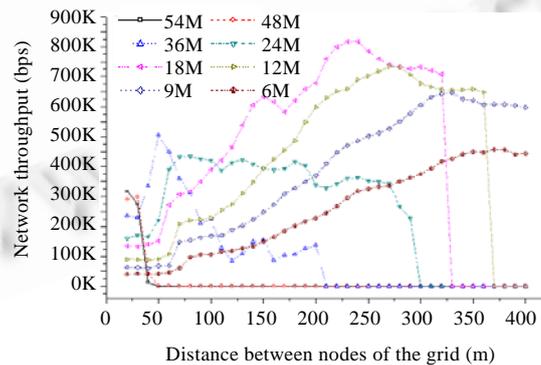


Fig.6 Throughput of 802.11A/G under different bandwidths

图 6 802.11A/G 下不同带宽下的网络吞吐量

当 $d < 20m$ 时,网络中的 100 个节点互相位于载波侦听范围内,网络中不存在隐藏节点,网络吞吐量随节点带宽的提高而提高.当 $20m < d < 50m$ 时,由于隐藏节点急剧增多,54M 和 48M 带宽下网络的吞吐量降低到 0.当 $55m < d < 210m$ 时,36M 带宽下网络吞吐量也呈降低趋势.当 $d = 210m$ 到达 36M 带宽下最大传输距离时,节点之间无法正常通信.18M,12M,9M,6M 带宽下网络吞吐量随着 d 的增大持续提高,直至到达最大传输距离.由图 6 可以发现,节点的高带宽并不一定对应着网络的高吞吐量.

4.2 DCCAMA协议性能仿真

为分析比较 DCCFMA 协议的性能,首先考虑节点静态部署条件下协议的性能.下面分别分析 3 种典型拓扑结构下网络吞吐量.

首先,在 4 节点拓扑结构下进行仿真,对比 DCCAMA 和 802.11DCF 协议下的网络吞吐量.网络拓扑结构如图 7 所示.网络由位于同一条直线的 4 个节点组成,节点 A、节点 B 之间的距离为 50m,节点 C、节点 D 之间的距离也为 50m,节点 B、节点 C 之间的距离为变量 x ,节点 B、节点 C 分别向节点 A、节点 D 发送数据.

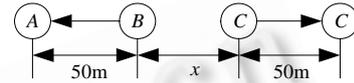


Fig.7 Simple topology simulation 图 7 简单拓扑结构

由于 DATA 消息的长度远远大于 RTS/CTS 消息的长度,因此,DATA 消息的冲突对网络吞吐量的影响远远大于 RTS/CTS 消息冲突造成的影响.本文仿真结果中的冲突特指 DATA 消息的冲突.

仿真结果如图 8 所示.54M 带宽条件下,在 802.11DCF 协议中,当 $x < 260m$ 时,网络中 4 个节点相互位于载波侦听范围内,节点 B 与节点 C 之中只允许一个节点发送数据,网络吞吐量为 3.50Mbps.当 $260m < x < 510m$ 时,节点 A 超出了节点 D 的载波侦听范围,同时也超出了节点 C 的发送半径,但仍位于节点 C 的干扰半径内,是节点 C 的隐藏节点.由于节点 C 只接收节点 D 的 ACK 消息,节点 A 只发送 CTS 消息和 ACK 消息,而这些消息长度较短,冲突概率较小,因此,网络吞吐量有所降低(3.45Mbps).当 $510m < x < 1270m$ 时,由于 x 大于侦听范围,节点 A 与节点 B 为节点 C 的隐藏节点,同时,节点 C 与节点 D 也为节点 B 的隐藏节点,因此,冲突导致网络的吞吐量急剧降低(1.91Mbps).当 $1270m < x < 1620m$ 时,只有节点 B 与节点 C 互为隐藏节点,冲突减少,吞吐量提高(6.1Mbps).当 $x > 1270m$ 时,会话之间互不影响,网络吞吐量提高至最大值(7.0Mbps).在 DCCFMA 协议下,由于协议能够有效防止隐藏节点问题,因此,网络中冲突为 0.当 $x < 1260m$ 时,网络吞吐量保持为 3.5Mbps.当 $x > 1260m$ 时,吞吐量达到最高值 7.0Mbps.

当网络带宽为 36M 时,情况与此类似.对比 36M 带宽与 54M 带宽下网络吞吐量可以发现,由于 36M 带宽的信噪比要求较低,RTS/CTS 消息防止隐藏节点的效率较高,由于冲突造成的吞吐量下降只出现在 800m~900m 之间.DCCFMA 协议保持网络中冲突为 0,网络吞吐量保持稳定.

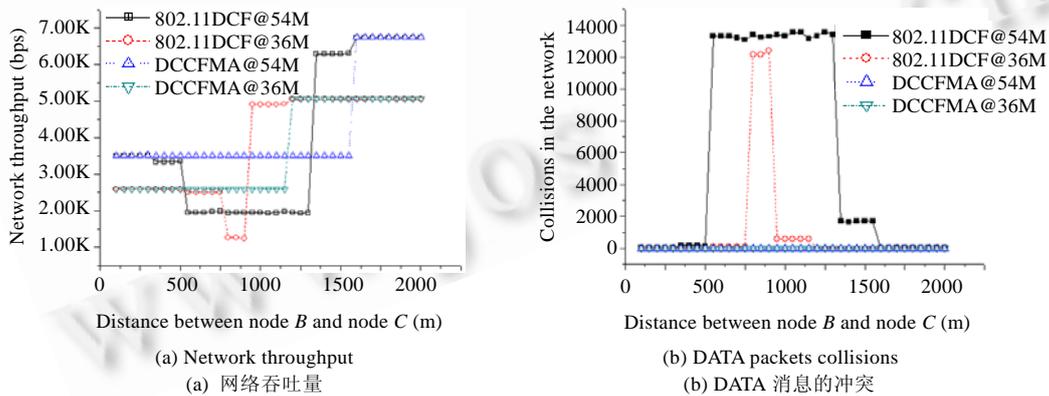


Fig.8 Throughput of different protocols in simple topology

图 8 简单拓扑结构下网络吞吐量对比

对比 802.11DCF 与 DCCFMA 在 $1370m < x < 1640m$ 之间的吞吐量发现,802.11DCF 的吞吐量高于 DCCFMA,

其原因主要是当消息之间的冲突概率较低时,并行会话带来吞吐量的提高大于冲突导致的吞吐量的降低.

其次,分析单链路拓扑结构下 DCCFMA 协议的性能.拓扑结构如图 9 所示,节点位于同一直线,节点之间距离均匀,临近节点距离为 x ,节点 0 通过中间 8 个节点以多跳方式向节点 9 发送数据.

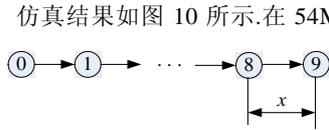


Fig.9 Line topology simulation
图 9 线性拓扑结构

仿真结果如图 10 所示.在 54M 带宽条件下,在 802.11DCF 协议中,当 $x < 25m$ 时,由于网络中所有节点互相位于载波侦听范围内,网络中不存在隐藏节点,网络吞吐量为 355.0Kbps;随着节点之间距离 d 的增大,网络中距离较远的节点超出了载波侦听范围,但仍然位于干涉半径内,网络中出现隐藏节点,随着隐藏节点的增多,冲突导致吞吐量急剧降低;当节点之间的距离到达 118m 时,节点之间的距离大于发送距离,网络由于无法正常通信,吞吐量为 0.在 DCCFMA 协议中,由于协议能够防止隐藏节点的出现,同时,当节点间距离增大时,由于网络中距离较远的节点可以并发发送数据,因此,空间利用率提高,网络吞吐量逐步提高,最高吞吐量可达 394.0Kbps.

在 36M 带宽条件下,802.11DCF 同样由于隐藏节点问题导致网络吞吐量从 265.0Kbps 降低为 50.0Kbps.与 54M 带宽比较,36M 带宽条件下由于信噪比要求较低,隐藏节点分布范围较小,其平均吞吐量大于 54M 带宽条件下平均吞吐量.DCCFMA 协议在 36M 带宽条件下保持较高的网络吞吐量.

然后,分析网格拓扑结构中协议的性能.如图 11 所示,网络由 100 个节点构成网格拓扑.节点 0~节点 90 分别向节点 9~节点 99 发送数据.

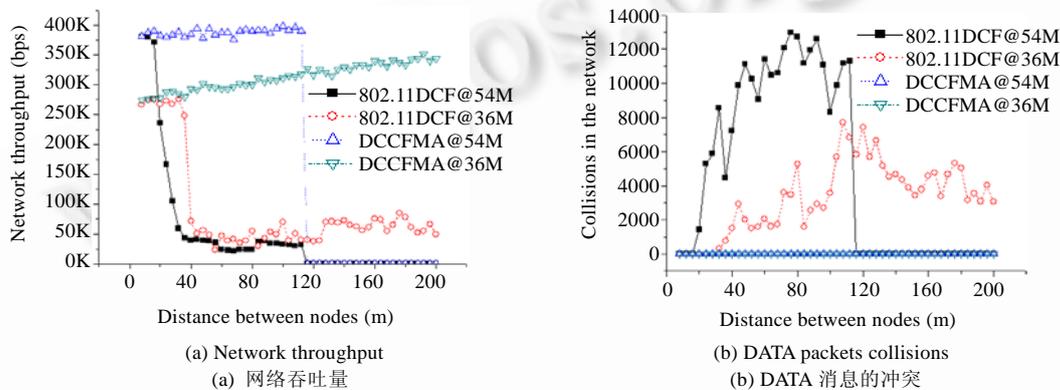


Fig.10 Throughput of different protocols in line topology
图 10 线性拓扑结构下网络吞吐量对比

在 54M 带宽条件下,在 802.11DCF 协议中,当 $x < 20m$ 时,由于网络中不存在隐藏节点,吞吐量较高;当 x 继续增大时,由于隐藏节点较多,吞吐量急剧降低,直至网络完全瘫痪,吞吐量为 0.DCCFMA 协议由于防止了隐藏节点,从而保持了较高的吞吐量.

在 36M 带宽、802.11DCF 条件下,当 $x < 28m$ 时,由于不存在隐藏节点,网络吞吐量较高;当 $28m < x < 43m$ 时,虽然由于网络中部分节点超出了载波侦听范围而出现了隐藏节点,但网络中由于出现多个并发传输,空间利用率提高,空间利用率带来的吞吐量的提高大于隐藏节点带来的吞吐量的降低,网络整体吞吐量提高.当 $x > 43m$ 时,冲突导致网络吞吐量逐渐降低(如图 12 所示).

最后,我们进行存在移动节点情况下的仿真.网络由两个固定节点和 18 个移动节点组成,节点 0 与节点 19 位于仿真场景中(2000M×2000M)对角线位置,节点 0 通过中间 18 个移动节点向节点 19 发送 CBR (constant bit rate)数据.数据包大小为 512 字节,路由协议采用 DSR(dynamic source routing)路由协议^[13].节点运

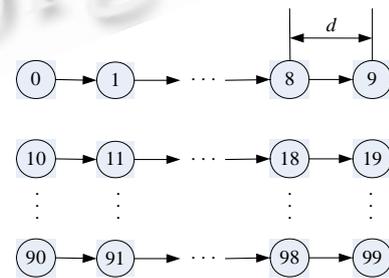


Fig.11 Grid topology simulation
图 11 网格拓扑仿真

动模型采用经过修改的 Random way-point 运动模型,在此模型中,移动节点随机选择一个目的坐标,以预先设定速度 V_t 向目的坐标移动;到达该坐标后,暂停一定时间后再选定下一目标移动.如此反复.

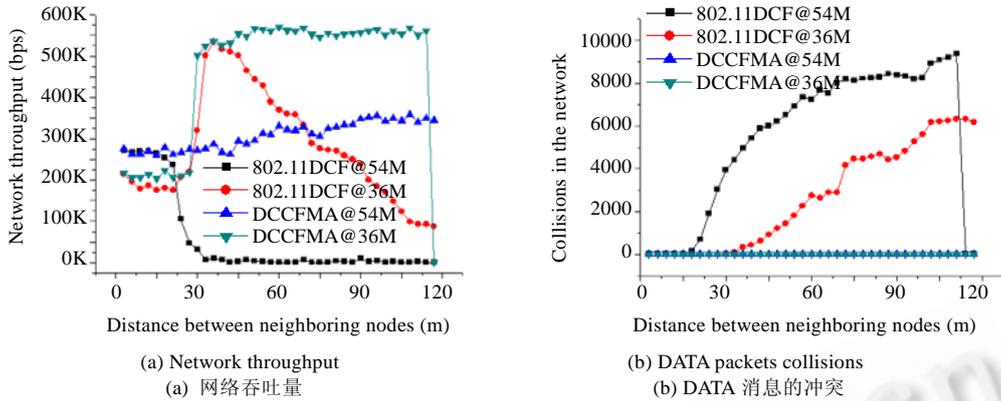


Fig.12 Throughput of different protocols in grid topology

图 12 网格拓扑结构下网络吞吐量对比

图 13 所示为不同节点运动速度条件下网络的吞吐量.当移动节点的移动速度为 0 时,网络吞吐量最大, DCCFMA 协议下网络吞吐量分别为 696.1K 和 451.2K,802.11DCF 协议下网络吞吐量分别为 601.3K 和 356.3K.随着节点移动速度的提高,网络中节点需要频繁更新路由表,而且节点移动速度越高,路由信息更新频率越快,网络的有效吞吐量降低.路由信息的频繁更新是造成仿真中网络吞吐量降低的主要原因.

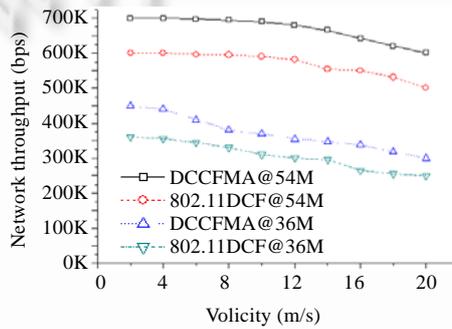


Fig.13 Throughput under mobility

图 13 节点移动情况下协议吞吐量

通过对各个 802.11A/G 不同带宽条件下的仿真对比,DCCFMA 协议的平均网络吞吐量高于 802.11DCF 24%.限于论文篇幅,上述仿真结果中只列出了 54M 与 36M 两种带宽条件下网络性能的仿真结果.

4.3 协议不足及下一步研究方向

DCCFMA 协议为有效解决隐藏节点问题,采用双信道硬件结构,需要 ad hoc 网络节点在现有高速无线设备的基础上,添加一个具有忙音发送和检测的无线收发模块,虽然无线收发器的功能简单,但还是会提高节点的整体成本.受复杂环境的影响无线信号的传播具有不确定性,其覆盖范围往往不是理想的圆形区域^[14],协议在实际环境中的性能需要进一步研究.由于协议中冲突退避同样采用指数退避算法,在仿真过程中我们发现,DCCFMA 协议同样存在节点间的不公平现象^[15].

5 总 结

在现有的 802.11DCF 协议中,RTS/CTS 机制无法彻底解决多跳无线网络中的隐藏节点问题,特别是在信噪

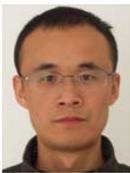
比要求较高的情况下,隐藏节点问题严重影响到网络吞吐量.本文在考虑积累干涉与环境噪音的情况下分析了隐藏节点问题,在此基础上,本文提出一种基于双信道的无冲突 MAC 协议 DCCFMA,可以有效解决隐藏节点问题.仿真结果表明,协议下网络平均吞吐量高于 802.11DCF 24%.

References:

- [1] Gerla M. Ad Hoc Networks: Technologies and Protocols. Boston: Springer-Verlag, 2004.
- [2] 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(12):1417–1433.
- [3] Xu KX, Gerla M, Sang B. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks. In: Mao CK, ed. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. Taipei: IEEE Press, 2002. 72–76.
- [4] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(3):535–547.
- [5] Ye SR, Wang YC, Tseng YC. A jamming-based MAC protocol for wireless multi-hop ad hoc networks. In: Irvine J, ed. Proc. of the IEEE 58th Vehicular Technology Conf. Orlando: IEEE Press, 2003. 1396–1400.
- [6] 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.
- [7] Wang P, Zhuang WH. An improved busy-tone solution for collision avoidance in wireless ad hoc networks. In: Ejiri M, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. Istanbul: IEEE Press, 2006. 3802–3807.
- [8] Zhai HQ, Wang JF, Fang YG. DUCHA: A new dual-channel MAC protocol for multi-hop ad hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006,5(11):3224–3233.
- [9] Goldsmith A. Wireless Communications. Prentice Hall PTR, 2005. 18–32.
- [10] Tse D, Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 18–45.
- [11] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: Vasseur JP, ed. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Cap Esterel: ACM Press, 2004. 95–107.
- [12] 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: IEEE Press, 1998. 154–161.
- [13] Perkins CE, Royer EM. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. In: Flinn J, ed. Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New Orleans: IEEE Press, 1999. 90–100.
- [14] Zhou G, He T, Krishnamurthy S, Stankovic JA. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In: Ebling M, ed. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services. Boston: ACM Press, 2004. 125–138.
- [15] Zhang L, Wang XH, Dou WH. Analyzing and improving the TCP flow fairness in wireless ad hoc networks. Journal of Software, 2006,17(5):1078–1088 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1078.htm>

附中文参考文献:

- [15] 张磊,王学慧,窦文华.自组网络中 TCP 流公平性的分析与改进.软件学报,2006,17(5):1078–1088. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1078.htm>



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.



杜君(1979—),男,博士生,主要研究领域为无线传感网络安全及可生存性.



张德运(1941—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络.