

双忙音媒体接入协议中的隐藏节点问题及其改进

张克旺, 张德运, 潘煜

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对双忙音媒体接入(DBTMA)协议只能防止发送距离范围内隐藏节点的问题,提出了一种增强的 DBTMA 改进(EDBTMA)协议,以彻底消除大规模 ad hoc 网络中的隐藏节点问题. EDBTMA 协议特点有二,一是采用了双收发器结构,其中的一个物理信道(数据信道)为高带宽信道,可利用现有 802.11a/g 无线设备,二是采用了忙音自适应功率控制机制,这样接收节点根据发送节点的信号强度可动态调整忙音的发射功率,以完全覆盖接收节点周围所有的隐藏节点,并在接收数据的过程中保证接收节点不受隐藏节点的干涉. 仿真结果表明,在改进协议下的网络吞吐量平均提高了 48%.

关键词: 网络;隐藏节点;双忙音媒体接入;自适应功率控制

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)12-1459-05

Hidden Terminals in Dual Busy Tone Multiple Access and an Improved Solution

ZHANG Kewang, ZHANG Deyun, PAN Yu

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: DBTMA (dual busy tone multiple access) protocol is designed to solve both hidden and exposed terminal problems, but hidden terminals outside the transmission range of the receiver are out of control in the protocol. An enhanced protocol named EDBTMA is proposed, which can eliminate hidden terminals in large-scale ad hoc network. There are two key enhancements in EDBTMA different from DBTMA. Firstly, the dual transceiver is adopted in EDBTMA and the 802.11a/g device is used for high-speed data channel. Secondly, the adaptive busy-tone power control scheme is used in EDBTMA. The receiver adjusts the transmission power of busy-tone according to received signal strength of the sender. All hidden terminals are covered by the busy-tone and no collisions occur during the reception of data packet. Simulation results show that EDBTMA solves the hidden terminals problem better than DBTMA and achieves 48% additional network throughput.

Keywords: network; hidden terminal problem; dual busy tone multiple access; adaptive power control

媒体存取控制(MAC)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^[1]. 在 ad hoc 网络中,隐藏节点会影响接收节点的正确接收,引起数据的频繁重传,由此产生吞吐量急剧降低^[2]. 所以,隐藏节点问题一直

是研究的热点.

双忙音媒体接入(DBTMA)协议^[3]是 Haas 等人提出的典型双信道 MAC 协议,现有研究普遍认为,该协议能够彻底解决 ad hoc 网络中的隐藏节点与暴露节点等问题.

DBTMA 协议中的控制信道是依据频带外信令技术实现的,控制信道信号的强度与数据信道信号的强度相同,所以协议需假设所有隐藏节点位于接收节点的发送范围之内.在现实中,无线设备接收数据必须满足一定的信噪比要求,而现有无线设备接收数据的信噪比不能满足这一要求,因而隐藏节点的分布范围大于节点的发送范围.显然,DBTMA 协议在解决隐藏节点的问题上不是普遍认为的那种结果.

本文在考虑了积累干涉、环境噪音的情况下,分析了隐藏节点问题.在此基础上,提出了一种增强的 DBTMA 改进(EDBTMA)协议.改进后的协议能够彻底解决隐藏节点问题.

1 系统模型

1.1 节点物理接收模型

在现有无线设备的物理接收模型中,只有当接收节点的信噪比大于某个阈值时,节点才能够正确接收消息.信噪比是指节点接收到的有效信号与积累干涉以及噪音信号之和之比,可用 γ 表示.

若节点 b 接收节点 a 发送来的消息,则其信噪比为

$$\gamma = 10 \times \lg \frac{P}{\phi + N_0} \quad (1)$$

式中: P 为节点 b 接收到节点 a 的信号强度; N_0 为环境噪音; ϕ 为其他节点信号在节点 b 处的积累强度,可以表示为

$$\phi = \sum_{x \in S, x \neq a} P_x \quad (2)$$

其中 S 为网络中所有发送节点的集合.

当节点 a 与节点 b 之间的距离为 d 时, P 可根据无线传播模型来计算.无线信号的传播模型依据不同的传播环境可以分为自由空间传播和近地传播模型^[4],这 2 种模型可以统一表达为

$$P = G \frac{P_t}{d^\lambda} \quad 2 \leq \lambda \leq 4 \quad (3)$$

式中: P_t 为发送节点的发射功率; 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).

1.2 ad hoc 网络中的隐藏节点问题

假设 ad hoc 网络由同构节点组成,节点的发射功率为 P_t ,则有如下定义.

定义 1 在没有任何干涉的情况下,数据能够正确传输的最大距离为 d_{Rt} .

定义 2 发送节点与接收节点之间的距离为 d .

定义 3 保证接收节点不受积累干涉、环境噪音影响的最小半径为干涉半径 r_{in} .在发送节点向接收节点发送数据的过程中,如果协议能够保证在 r_{in} 内无节点发送数据,则接收节点能够正确接收数据.

定义 4 在二维平面上,以接收节点为圆心,以 r_{in} 为半径的圆形区域为 A_{in} .

定义 5 在协议控制下,距离接收节点的干涉控制半径 r_{ctrl} 范围内不会出现隐藏节点.当 $r_{ctrl} \geq r_{in}$ 时,网络中不存在隐藏节点,但过大的 r_{ctrl} 将导致网络空间利用率降低;当 $r_{ctrl} < r_{in}$ 时,网络中可能存在隐藏节点.

定义 6 以接收节点为圆心,以 r_{ctrl} 为半径的区域为干涉控制区域 A_{ctrl} .

假设 ad hoc 网络中的节点均匀分布在二维平面上,密度为 σ ,发送节点 S_i 向接收节点 R_j 发送数据,则 R_j 受到的干涉来源于干涉区域 A_{in} 以外所有发送节点的信号积累.设 Σ 区域为 A_{in} 的补集,当 Σ 区域内的所有节点发送数据时, R_j 受到的干涉为

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

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

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

R_j 正确接收 S_i 数据的条件是 $\gamma \geq \beta$ (β 为无线设备的信噪比阈值),即

$$\gamma = \frac{P(S_i \rightarrow R_j)}{\phi + N_0} = \frac{GP_t}{d^\lambda} \left(\frac{G\sigma P_t}{r_{in}^\lambda} + N_0 \right)^{-1} \geq \beta \quad (6)$$

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

根据不等式(7)可以得出,干涉半径 r_{in} 将受到发送距离 d 、信噪比阈值 β 、环境噪音 N_0 、网络节点密度 σ 、节点发射功率 P_t 及节点增益 G 等影响.

综上,信噪比条件下的隐藏节点问题可归结为如图 1 所示的情况.

1.3 DBTMA 解决隐藏节点问题的效率

根据不等式(7)的发送距离 d 与干涉半径 r_{in} 的关系,可以得到 DBTMA 解决隐藏节点的效率.本文依据文献[5]中的定义,可得出协议解决隐藏节点效率为

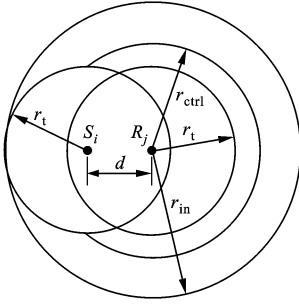


图 1 信噪比条件下的隐藏节点问题

$$E_{\text{DBTMA}} \approx \begin{cases} \frac{A_{\text{ctrl}}}{A_{\text{in}}} = \frac{\pi r_t^2}{\pi r_{\text{in}}^2} & A_{\text{ctrl}} < A_{\text{in}} \\ 1 & A_{\text{ctrl}} \geq A_{\text{in}} \end{cases} \quad (8)$$

在 $P_t=31.6 \text{ mV}$, $G=0 \text{ dB}$ 的条件下,将不等式(7)代入式(8)便可得到 DBTMA 协议解决隐藏节点的效率. 在不同速率的条件下, DBTMA 解决隐藏节点的效率如图 2 所示.

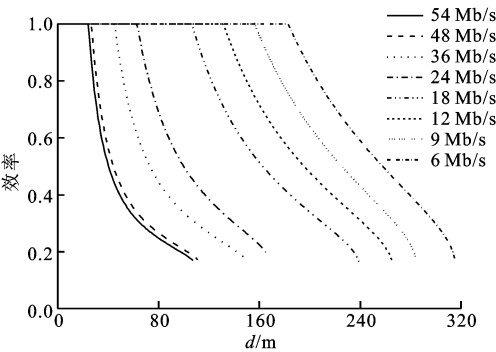


图 2 不同速率条件下 DBTMA 解决隐藏节点的效率

由图 2 可以发现,当发送距离 d 较大或者对信噪比要求较高时, DBTMA 就无法有效防止众多隐藏节点超出发送半径,当然解决隐藏节点的效率也急剧降低. 例如,在网络带宽为 54 Mb 的情况下,只有当发送距离 $d < 30 \text{ m}$ 时, DBTMA 才能奏效,而当发送距离 $d = 80 \text{ m}$ 时, DBTMA 的效率不足 20% ,此时绝大部分隐藏节点不能得到有效控制.

2 EDBTMA 协议描述

EDBTMA 协议采用了忙音自适应功率控制机制,可防止隐藏节点出现. 它是一种增强的 DBTMA 改进协议,改进的内容包括以下几点.

(1) EDBTMA 协议基于的是双信道结构,即采用了两个物理信道,其中一个为高带宽信道,可以采用现有的 802.11a/g 无线设备,它的空闲信道评估

(CCA)阈值为 P_s ,另一个为控制信道,它能够发送和检测忙音,而无需进行数据的发送和接收假设控制信道可以发送能量在 $0 \sim P_{\text{max}}$ 范围内的任意强度的信号,能够检测到信号的最小强度为 P_s .

(2) EDBTMA 协议采用了忙音自适应功率控制机制,即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. 其过程为:接收节点在收到 RTS(Ready-To-Send)消息的同时,采集发送节点的信号强度 $P(S_i \rightarrow R_j)$,并根据式(6)确定干涉半径

$$r_{\text{in}}^{\lambda} \geq G\sigma P_t \left(\frac{P(S_i \rightarrow R_j)}{\beta} - N_0 \right)^{-1} \quad (9)$$

要保证接收节点在接收过程中不受干涉,则 $r_{\text{ctrl}} = r_{\text{in}}$,因为控制信道能够检测到的最小信号强度为 P_s ,那么,根据式(1)便可计算控制信道的最小发送功率

$$P_{\text{min}} = G\sigma P_t \left(\frac{P(S_i \rightarrow R_j)}{\beta} - N_0 \right)^{-1} P_s \quad (10)$$

接收节点在接收后续 DATA 消息的过程中,可在控制信道中发射功率为 P_{min} 的忙音,而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,以防止所有隐藏节点发送数据.

在忙音自适应功率控制机制中,如果接收节点收到的信号强度较大,则由式(6)知,节点能够容忍的干涉强度也比较大,此时控制信道可以较小的发射功率通知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,则其能够容忍的干涉强度也比较小,此时需要通过强信号防止较大范围内的节点发送数据.

这种忙音自适应功率控制机制,充分考虑了网络节点的积累干涉和环境噪音等因素对接收数据的影响,所以它具有更强的适应能力.

(3) 在忙音自适应功率控制机制中,控制信道发射功率 P_{min} 的计算是假设网络中节点是均匀分布的,但在实际中很难做到这一点.

EDBTMA 协议采用了自适应冲突避免机制来处理节点分布不均匀的问题,即网络中的节点可为其每个邻近节点建立冲突表,记录节点在接收邻近节点数据时发生的冲突,并根据冲突情况调整 P_{min} . 当节点的接收成功率为 100% 时,适当减小 P_{min} ;当节点的接收成功率小于 90% 时,适当增大 P_{min} .

EDBTMA 改进部分的描述如图 3 所示.

定理 1 EDBTMA 中 DATA 消息不会受到任何消

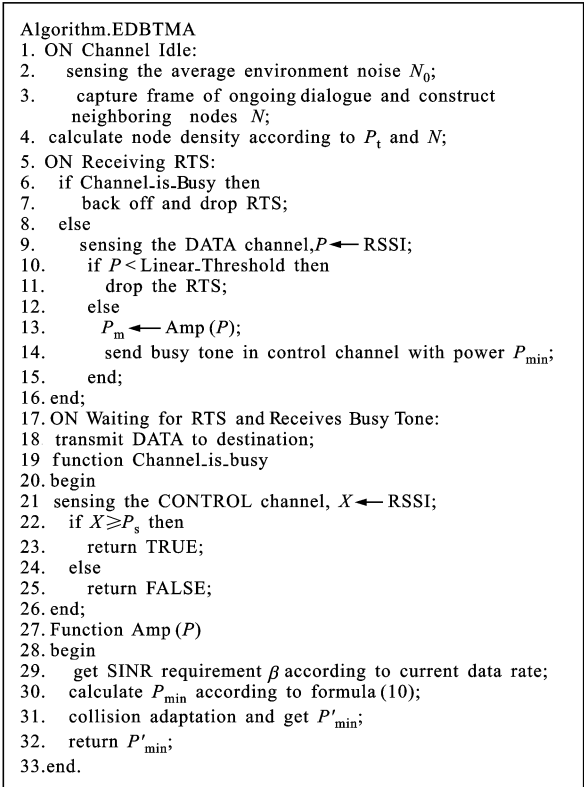


图 3 EDBTMA 改进部分的描述

息的干涉.

证明 在 EDBTMA 协议中,数据信道中只存在 RTS 消息和 DATA 消息,那么只要证明 RTS 消息与 DATA 消息之间、DATA 消息之间互不干涉,就可以推出 DATA 消息不会受到干涉.

首先定义如下参数: L_{RTS} 为 RTS 帧的长度; φ 为无线收发器发送状态(TX)所需时间; p 为 MAC 层处理时间; τ 为无线收发器接收状态(RX)转为 TX 所需时间; t_i 为中断响应时间; t_d 为 DATA 帧发送延迟时间.

在 EDBTMA 协议中,设定 $t_d = p + \tau - \varphi + t_i$. 在 802.11 b/g 规范中,规定 $\varphi = 10\ \mu\text{s}$, $\tau = 5\ \mu\text{s}$, MAC 层 RTS/CTS 帧的发送带宽为 1 Mb/s, RTS 帧的长度为 30 B,所以 $L_{\text{RTS}} = 240\ \mu\text{s}$. 根据当前处理器的性能,可以设 $t_i = 5\ \mu\text{s}$, $p = 20\ \mu\text{s}$. 依据以上设定,则 $t_d = 20\ \mu\text{s}$.

RTS 与 DATA 消息之间的干涉情况如图 4 所示. 从中看出, S_0 向 R_0 发送数据,而 S_2 为 R_0 的临近节点,根据 EDBTMA 协议,当侦听到了控制信道忙音,任何发送节点应放弃当前操作,这样 R_0 在 t_3 时刻发送忙音之后, S_2 经过中断响应时间 t_i 之后在 t_4 时刻停止发送 RTS 消息,此刻 S_0 刚好开始发

送 DATA 消息,所以 RTS 消息不会干涉 DATA 消息.

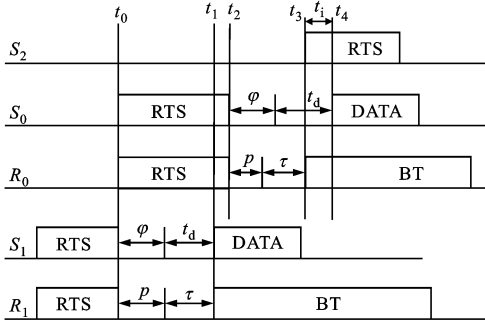


图 4 消息之间的干涉情况

由于 $p + \tau - \varphi + t_i < L_{\text{RTS}}$,所以在 t_2 至 t_3 时间段内, R_0 的任何临近节点都不可能成功发送 RTS 消息,而 DATA 消息之间干涉的惟一可能就是 S_1 在 t_0 之前已经成功地发送了 RTS 消息. 考虑极限情况下 S_1 在 t_0 时刻发送了 RTS 消息,那么根据 EDBTMA 协议, S_1 在 t_1 时刻发送了消息, $t_1 = t_0 + p + \tau < t_0 + L_{\text{RTS}}$,此时必然导致 S_0 发送的 RTS 消息在 R_0 处发生冲突,这与 R_0 成功接收 RTS 消息的前提相矛盾,故 DATA 消息之间也不存在干涉. 上述命题得证.

3 实验结果与分析

本文使用 NS2^[6] 作为模拟仿真实验平台,主要仿真参数见表 1. 为了评估 EDBTMA 协议的性能,仿真选用 DBTMA 作为比较对象.

表 1 仿真实验环境(NS-allinone 2.29)参数配置

环境	参数
区域大小	2 000 m×2000 m
仿真无线模型	信号积累模型
射频频率	2.4 GHz
无线发送功率	39.8 mW
无线天线增益	0 dB
应用协议	恒定的发送速率

仿真所用网络拓扑结构如图 5 所示,其中网络由 100 个节点构成,节点间距离为 d ,网络中 $S_0 \sim S_{90}$ 分别以逐跳方式向 $R_9 \sim R_{99}$ 发送数据. 应用层协议采用 CBR(恒定发送速率)模型,数据包大小为 1 460 B.

不同协议下网络吞吐量比较如图 6 所示,不同

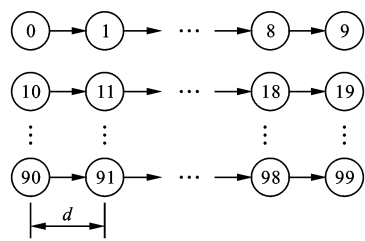


图 5 仿真网络拓扑结构

协议下 DATA 消息的冲突比较如图 7 所示. 从图中结果可以看出: 当网络带宽为 36 Mb 时, 若 DBTMA 协议中的 $d < 28$ m, 网络为全连通网络, 节点可以通过忙音侦听, 以避免与其他节点发生冲突, 此时网络中不存在隐藏节点, 网络吞吐量较高; 若 $28\text{ m} < d < 43$ m, 网络中可能有部分节点超出了忙音侦听的范围, 也可能有少量的隐藏节点, 但网络同时出现了多个并发传输, 此时空间利用率比较高, 空间利用率带来的吞吐量足以弥补隐藏节点带来的损失, 所以网络整体吞吐量有所提高; 若 $d > 43$ m, 隐藏节点逐渐增多, 此时冲突将导致网络吞吐量逐渐降低.

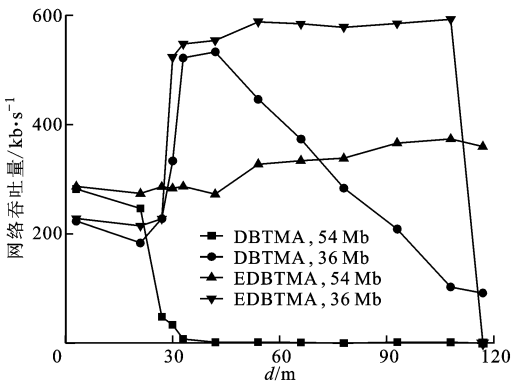


图 6 不同协议下网络吞吐量

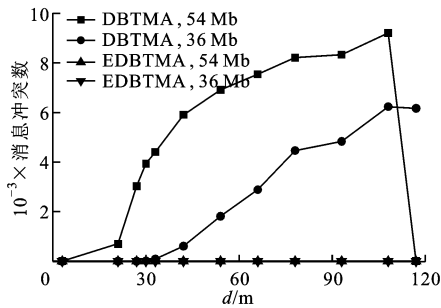


图 7 不同协议下 DATA 消息的冲突情况

在 EDBTMA 协议中, 由于采用了忙音自适应控制和冲突自适应机制, 所以网络中 DATA 消息发生冲突的可能性很小. 当 $d > 43$ m 时, 网络吞吐量

保持稳定, 平均吞吐量为 550 kb/s. 当网络带宽为 54 Mb 时, DBTMA 协议网络吞吐量与带宽为 36 Mb 的情况类似, 此时随着 d 的增加, 网络吞吐量急剧下降, 而在 EDBTMA 协议中, 由于其能够有效防止隐藏节点出现, 所以网络吞吐量基本保持稳定.

通过对各种带宽条件下的仿真对比可以看出, EDBTMA 协议的平均网络吞吐量比 DBTMA 提高了 48%, 限于篇幅, 上述仿真结果中只列出了 54 Mb 与 36 Mb 2 种带宽条件下网络性能仿真结果.

4 结束语

现有的 DBTMA 协议无法彻底解决 ad hoc 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了网络吞吐量. 本文在考虑了积累干涉、环境噪音的情况下, 分析了隐藏节点问题, 并提出一种 EDBTMA 协议, 以解决隐藏节点问题. 仿真结果表明, EDBTMA 协议下的网络平均吞吐量为 DBTMA 协议的 148%.

参考文献:

[1] HEKMAT R. Ad-hoc networks: fundamental properties and network topologies [M]. Berlin, Germany: Springer Press, 2006.

[2] ARUNA J, SYLVIE P, AREK D, et al. Hidden vs. exposed terminal problem in ad hoc networks [C] // Proceedings of the Australian Telecommunications, Networks and Architecture Conference. Sydney, Australia: ATNAC, 2004: 52-56.

[3] HAAS Z J, DENG Jing. Dual busy tone multiple access (DBTMA): a multiple access control scheme for ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Communications, 2002, 50(6): 975-985.

[4] DAVID T, PRAMOD V. Fundamentals of wireless communication [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 49-55.

[5] XU Kaixin, GERLA M, BAE S. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks? [C] // IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2002: 72-76.

[6] ISI of USC. The network simulator ns-2 [EB/OL]. [2006-08-10]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>.