

一种适应于静态 Ad Hoc 网络的高吞吐量 MAC 协议*

张克旺¹⁺, 张德运¹, 蒋卫华²

¹(西安交通大学 电子与信息学院, 陕西 西安 710049)

²(中国民航总局 航空安全技术中心, 北京 100028)

High Throughput MAC Protocol for Static Ad Hoc Network

ZHANG Ke-Wang¹⁺, ZHANG De-Yun¹, JIANG Wei-Hua²

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

²(Center of Aviation Safety Technology, General Administration of Civil Aviation of China, Beijing 100028, China)

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

Zhang KW, Zhang DY, Jiang WH. High throughput MAC protocol for static ad hoc network. *Journal of Software*, 2009,20(4):954-964. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3309.htm>

Abstract: Efficient usage of available capacity is critical for ad hoc network with limited bandwidth. Capacity is wasted due to exposed terminals in high-density ad hoc network. This paper proposes a new scheme, Packet Sensing Media Access with Collision Avoidance (PSMA/CA) to solve the exposed terminals problem in static ad hoc network, thereby to improve the spatial reuse of the medium and increase the network throughput. Neighbors' information within 2 hops plays an important role in PSMA/CA, and the protocol act like 802.11DCF in the absence of neighbors' information. Nodes in the network get neighbors' information within 1-hop and 2-hops via channel listening and neighbors information exchanging respectively. Having the 2-hops neighbors' information, an exposed terminal captures a frame of ongoing dialogue and calculates the correlation coefficient between the primary dialogue and new dialogue to be built before trying to transmit. If the correlation coefficient is lower than the threshold required by SINR (signal to interference and noise ratio) for a certain bandwidth, the exposed terminal can communicate with its destination in parallel with the primary dialogue. PSMA/CA solves the exposed terminals problem without nodes synchronization and without additional requirements for hardware complexity. Simulation results show that the average throughput of PSMA/CA outperforms 802.11DCF by 20% in high-density ad hoc network.

Key words: ad hoc network; exposed terminals problem; IEEE 802.11DCF; PSMA/CA (packet sensing media access with collision avoidance)

摘要: 针对稠密部署 ad hoc 网络中暴露节点问题引起的网络空间利用率低、吞吐量下降的问题,提出一种包侦听多路接入/冲突避免(packet sensing media access with collision avoidance,简称 PSMA/CA)MAC 协议.在 PSMA/CA 协议中,节点通过信道侦听和邻近节点集交换获取两跳范围内邻近节点信息,暴露节点在发送数据之前,首先侦听网

* 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 2007-09-11; Accepted 2008-03-14

络中当前会话,得到会话双方地址,根据两跳范围内邻近节点信息计算当前会话与欲建立会话之间的关联度,当会话关联度小于信噪比要求时,允许暴露节点建立会话.PSMA/CA 协议允许满足条件的暴露节点建立并行会话,以提高网络空间利用率.仿真结果表明,与 802.11DCF 相比较,PSMA/CA 协议下平均网络吞吐量增加 20%.与其他针对暴露节点问题提出的算法相比较,PSMA/CA 不需要节点间同步,对现有无线网络硬件设备也没有提出新的要求,具有更强的适应性.

关键词: ad hoc 网络;暴露节点问题;IEEE 802.11DCF;PSMA/CA(packet sensing media access with collision avoidance)

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 ad hoc 网络在军事、抢险救灾等应用场合具有独特的优势.与其他通信网络相比,ad hoc 网络具有带宽有限、链路容易受环境影响等特点^[1].

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 协议是大部分无线网络 MAC 协议的基础,在 CSMA/CA 协议中,节点在发送数据之前侦听信道,如果信道空闲则发送数据;如果信道被邻近节点占用,则通过一定的退避算法进行退避,推迟数据的发送.CSMA/CA 协议最大的缺点是隐藏节点与暴露节点问题^[2].隐藏节点干扰接收节点正确接收消息,导致消息的重传率增高,影响网络吞吐量;暴露节点丧失了更多发送数据的机会,网络空间利用率降低,同样会导致网络吞吐量降低.文献[3]中研究结果表明,在稠密部署的 ad hoc 网络中,随着节点密度的增加,隐藏节点与暴露节点数量急剧增加,网络吞吐量随之下降.

现有大多数 MAC 协议采取了一定的措施防止网络中隐藏节点的出现,例如在 IEEE 802.11 DCF(以下简称 802.11DCF)^[4]等协议中使用 RTS(ready to send)/CTS(clear to send)机制解决隐藏节点问题.在 RTS/CTS 机制中,数据在发送前进行 RTS/CTS 握手,发送节点首先发送 RTS 消息,RTS 消息的 duration 字段为本会话持续时间,发送节点的邻近节点侦听到 RTS 消息后,根据消息中 duration 字段设置 NAV(net allocation vector)(网络分配向量),在此时间段内不发送数据;接收节点以 CTS 消息进行响应,CTS 消息中的 duration 字段同样包含会话持续时间,所有侦听到 CTS 消息的邻近节点也根据 duration 字段设置 NAV,在此时间内不发送数据.RTS/CTS 机制防止邻近节点在会话过程中发送数据,保证后续 DATA 消息与 ACK(acknowledge)消息不受隐藏节点干扰.暴露节点问题在 802.11DCF 协议中没有得到有效解决.

本文提出一种包侦听多路接入/冲突避免(packet sensing media access with collision avoidance,简称 PSMA/CA)协议以解决暴露节点问题.在 PSMA/CA 协议中,节点保存两跳范围内邻近节点的信息,暴露节点在发送数据之前首先侦听网络中正在传输的帧,得到正在进行会话双方的地址,根据本节点保存的邻近节点信息,计算现有会话与欲建立会话之间的关联度,以确定是否进行并发传送.PSMA/CA 协议允许满足条件的暴露节点并行发送数据,提高网络空间利用率,进而提高 ad hoc 网络的吞吐量.

1 相关工作

为解决暴露节点问题,众多研究者提出了不同的解决方案.MACA(CSMA/CA without carrier sensing)协议^[5]取消了信道监听与 ACK 消息,仅以 RTS/CTS 消息控制数据发送.CTS 消息中包含 DATA 消息传输所需时间信息 T_d ,接收节点的邻近节点侦听到 CTS 消息后,在 T_d 时间段内不发送数据,发送节点的邻近节点在发送节点发送数据的同时也可以发送数据,从而解决暴露节点问题.由于在会话期间发送节点的邻近节点可以发送数据,可能导致接收节点的 CTS 消息不能被发送节点正确接收,又引起隐藏节点问题.在负载较高的情况下,网络性能急剧降低.

文献[6]提出 DBTMA(dual busy tone media access)协议.该协议基于双信道硬件结构,采用 RTS+DATA 消息构成的会话发送数据.节点 A 在向节点 B 发送 RTS 消息的同时,在控制信道发送忙音 BTt.节点 B 接收到 RTS

消息后,如果同意接收节点 *A* 的数据,则在控制信道发送忙音 *BTr* 应答.节点 *A* 接收到节点 *B* 反馈的忙音后开始发送数据,在数据发送过程中,节点 *B* 一直在控制信道发送忙音 *BTr*,所有邻近节点检测到忙音 *BTr* 或者 *BTr* 后都进行退避,节点在发送数据之前不采用载波侦听方式决定是否发送,而是以控制信道有无忙音作为判断依据.在节点 *A* 发送数据的过程中,节点 *A* 的邻近节点只要不影响节点 *B* 接收就可以并行发送数据,因而能够有效解决暴露节点问题.仿真数据表明,DBTMA 协议在性能上超出 MACA 达 140%,但 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^[7].同时,DBTMA 的双信道结构增加了节点的硬件复杂性.

MACA-P^[8]协议通过同步多个邻近节点并行发送的方法解决暴露节点问题.协议采用了所谓“控制间隙”的方法“对齐”暴露节点的发送.在 MACA-P 协议中,正常节点的会话过程与 802.11DCF 相同,暴露节点的会话仅由 DATA 消息与 ACK 消息组成,正常节点会话的 RTS/CTS 消息包含 DATA 消息发送的开始时刻与结束时刻,暴露节点 DATA 消息的发送必须在此时间段内完成,从而实现暴露节点的并行发送.MACA-P 在 ACK 消息不冲突的前提下,能够达到并行发送的目的.仿真结果表明,在特定网络拓扑结构下,网络吞吐量可以达到 802.11DCF 的 200%.MACA-P 的主要缺点包括:(1) 暴露节点不采用 RTS/CTS 消息握手而直接进行 DATA 消息发送,这样,DATA 消息很可能会因受到接收节点的邻近节点所发送消息的干涉而不能正确接收,又引起隐藏节点问题;(2) 发送节点在发送数据之前需要额外的延迟以等待暴露节点“对齐”数据的发送,降低了原有会话的效率;(3) MACA-P 协议无法有效解决多个 ACK 消息之间的冲突,协议只能应用于接收节点的发送范围无重叠、从而 ACK 消息无冲突的特殊场景.

Shukla 等人在 MACA-P 协议的基础上,解决了多个 ACK 消息的冲突问题^[9],但 MACA-P 协议的前两个缺点仍然存在.

文献[10]通过在 802.11DCF 中添加 RTSS(synchronized RTS)/CTSS(synchronized CTS)消息协调多个节点进行并行发送,从而减轻暴露节点问题对网络吞吐量造成的影响.协议分两个阶段进行:暴露节点检测阶段与正常运行阶段.在暴露节点检测阶段,网络的所有节点发送暴露节点检测消息以识别所有可能的暴露节点;在正常运行阶段,负载较重的暴露节点广播 RTSS 消息,收到 RTSS 消息的节点在后续发送过程中,通过 CTSS 消息通知此暴露节点进行并行发送.在理想情况下,协议的暴露节点检测时间复杂度为 $O(n^2)$,而且在暴露节点检测阶段不能有任何干扰存在,协议不能处理网络中新节点的加入以及节点的离开.

2 PSMA/CA 的提出

现有方法大部分试图在发送节点发送 DATA 消息的过程中同步暴露节点进行并行数据发送.分析对比现有解决暴露节点问题协议的优、缺点可以发现:

首先,并不是所有的暴露节点都适合并行发送,允许不适合并行发送的暴露节点发送数据反而会降低网络吞吐量.如图 1 所示,如果节点 *A* 正在向节点 *B* 发送消息,暴露节点 *C* 需要向节点 *D* 发送数据.在节点发射功率

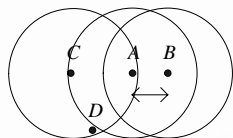


Fig.1 Exposed terminal not suitable to setup dialogue

图 1 不适合并行发送的暴露节点

相同的情况下,当暴露节点 *C* 与节点 *A* 同时发送数据时,由于节点 *D* 接收到节点 *C* 与节点 *A* 的信号强度基本相同,则节点 *D* 无法接收到任何有效数据.

其次,节点间的同步在允许暴露节点并行发送数据的同时降低了原有会话的效率.现有方法通过在帧结构中添加时间戳或者通过添加同步消息同步暴露节点进行并行发送,但这两种方法都需要原有会话等待一定时间,导致原有会话效率降低.

最后,RTS/CTS 握手机制能够防止隐藏节点的出现,在解决暴露节点问题时取消 RTS/CTS 消息会引入新的隐藏节点.

本文提出的 PSMA/CA 协议基于会话关联度模型解决暴露节点问题.暴露节点在发送数据之前进行会话关联度计算,当关联度满足信噪比要求时才允许建立会话,保证暴露节点所建立会话不影响现有会话.与现有协议比较,PSMA/CA 协议不需要节点间同步,不影响现有会话效率;暴露节点建立的会话保留 RTS/CTS 消息,防止在

解决暴露节点问题的过程中引入新的隐藏节点;协议对现有 ad hoc 网络节点的硬件没有提出任何新的功能要求;协议也不需要任何独立的学习过程.

3 系统模型

定义 1(邻近节点). 网络中节点 a 可以正确接收到节点 x 的消息,则节点 x 称为节点 a 的一跳邻近节点(在不引起混淆的情况下,称其为邻近节点),节点 a 的所有邻近节点构成的集合称为节点 a 的邻近节点集,表示为 Na ;如果节点 $b \in Na, c \in Nb$ 并且 $c \notin Na$,则称节点 c 为节点 a 的两跳邻近节点.

定义 2(会话). 如果节点 $a \in Nb$ 且 $b \in Na$,节点 a 与节点 b 之间以 RTS-CTS-DATA-ACK 消息交互发送数据的过程称其为会话,表示为 $Cov(a,b)$.

3.1 无线传播模型

无线传播模型分为自由空间传播模型和近地传播模型^[11],两种传播模型可以统一表达为

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

其中, $Pr_{(a \rightarrow b)}$ 为节点 b 接收到节点 a 信号的强度; Pt 为节点 a 的发射功率; d 为节点 a 与节点 b 之间的距离; 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.

假设 1. 系统假设网络由同构节点构成,所有节点的发射功率 Pt 相同,各个节点的载波侦听距离也相同.

假设 2. 在由同构节点构成的网络中, $Pr_{(a \rightarrow b)} = Pr_{(b \rightarrow a)}$, 表示为 $Pr_{(b \leftrightarrow a)}$.

3.2 节点接收模型

信噪比(signal to interference and noise ratio,简称 SINR)是指节点接收到的有效信号强度与噪声强度之比^[11],用 γ 表示.只有当节点接收的信噪比大于某个值时,节点才能正确接收到消息.当节点 a 接收节点 b 发送的消息时,其信噪比可表示为

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

其中, N_0 为环境噪声, ϕ 为网络中除节点 b 以外所有发送节点对节点 a 的积累干涉,即

$$\phi = \sum_{x \in S, x \neq b} Pr_x \tag{3}$$

S 为网络中所有的发送节点集合.

假设 ad hoc 网络节点均匀分布在二维平面,节点密度为 σ .RTS/CTS 机制能够保证节点 a 周围发送半径(用 R 表示)范围内只有节点 b 发送数据,设 Σ 为二维平面上发送半径外所有区域,则接收节点受到的积累干涉为

$$\phi = \iint_{\Sigma} G \frac{Pt}{d^\lambda} \sigma ds / \pi R^2 = \frac{G \pi \sigma Pt}{R^\lambda} \tag{4}$$

在假设 1 条件下,如果节点分布均匀,则 ϕ 为常数.

随着带宽的增大,信噪比要求也相应增大^[12],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 1 802.11 a/g 各个速率对信噪比要求

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
N	3.98	6.03	7.94	12.02	50.12	75.86	251.19	288.40
N'	1.41	1.57	1.68	1.86	2.66	2.95	3.98	4.12

3.3 会话关联度模型

定义 3(会话关联度 f). 假设节点 a 与节点 b 进行会话,节点 c 与节点 d 进行会话,设 $SM = \min(Pr_{(a \leftrightarrow b)}, Pr_{(c \leftrightarrow d)})$,

$NX = \max(Pr_{(a \leftrightarrow c)}, Pr_{(b \leftrightarrow c)}, Pr_{(a \leftrightarrow d)}, Pr_{(b \leftrightarrow d)})$, 定义 $f(Cov(a,b), Cov(c,d)) = \frac{NX}{SM}$ 为 $Cov(a,b)$ 与 $Cov(c,d)$ 之间的会话关联度. 会话关联度是两个会话之间互相干涉程度的度量, f 值越大, 会话之间的干涉越大; f 值越小, 会话之间的干涉越小.

定理 1. 在节点 a 与节点 b 的会话过程中, 在不进行节点间同步的情况下, 暴露节点 c 所建立会话不干涉现有会话的条件是 $f(Cov(a,b), Cov(c,d)) \leq \frac{1}{N+1}$, 其中节点 d 为暴露节点 c 的目的节点, $N = 10^{10}$.

证明: 如果暴露节点 c 为节点 b 的邻近节点, 根据公式(2), 当节点 a 不发送数据时, 节点 b 正确接收节点 c 数据的临界条件为

$$Pr_{(c \rightarrow b)} = (\phi + N_0) \times N \quad (5)$$

当节点 a 与节点 c 同时发送数据时, 节点 b 正确接收节点 a 数据的条件为

$$Pr_{(a \rightarrow b)} \geq (\phi + Pr_{(c \rightarrow b)} + N_0) \times N \quad (6)$$

联合公式(5)、公式(6)求解得到节点 a 与节点 c 同时发送数据, 节点 b 正确接收节点 a 数据的条件为

$$\frac{Pr_{(a \rightarrow b)}}{Pr_{(c \rightarrow b)}} \geq N + 1 \quad (7)$$

同理, 节点 b 与节点 c 同时发送数据, 节点 a 能够正确接收节点 b 数据的条件为

$$\frac{Pr_{(b \rightarrow a)}}{Pr_{(c \rightarrow a)}} \geq N + 1 \quad (8)$$

综合公式(7)、公式(8)以及假设 2, 节点 c 的发送不影响 $Cov(a,b)$ 的条件为

$$\frac{Pr_{(b \leftrightarrow a)}}{\max(Pr_{(c \rightarrow a)}, Pr_{(c \rightarrow b)})} \geq N + 1 \quad (9)$$

节点 d 的发送不影响 $Cov(a,b)$ 的条件与此类似, 则 $Cov(c,d)$ 不影响 $Cov(a,b)$ 的条件为

$$\frac{Pr_{(b \leftrightarrow a)}}{\max(Pr_{(d \rightarrow a)}, Pr_{(d \rightarrow b)}, Pr_{(c \rightarrow a)}, Pr_{(c \rightarrow b)})} \geq N + 1 \quad (10)$$

$Cov(c,d)$ 与 $Cov(a,b)$ 互不影响的条件为 $\frac{\min(Pr_{(b \leftrightarrow a)}, Pr_{(c \leftrightarrow d)})}{\max(Pr_{(d \rightarrow a)}, Pr_{(d \rightarrow b)}, Pr_{(c \rightarrow a)}, Pr_{(c \rightarrow b)})} \geq N + 1$. 得证. \square

不同信噪比要求下, N 的取值参见表 1.

推论 1. 当不进行节点间同步时, 在节点 a 与节点 b 的会话过程中, 允许暴露节点 c 建立会话的条件是

$$f' = \frac{DX}{DM} \geq N' \quad (11)$$

其中, d 是 c 发送的目标节点, $DX = \min\{d(a,c), d(b,c), d(a,d), d(b,d)\}$, $DM = \max\{d(a,b), d(c,d)\}$, $N' = (N+1)^{\frac{1}{2}}$.

证明: 根据公式(1)、公式(5)以及假设 1, 可得

$$\frac{Pr_{(a \rightarrow b)}}{Pr_{(c \rightarrow b)}} = \frac{GPr_a / d(a,b)^{\lambda}}{GPr_c / d(a,b)^{\lambda}} = \frac{d(a,b)^{\lambda}}{d(a,b)^{\lambda}} \geq N + 1 \Rightarrow \frac{d(a,b)}{d(a,b)} \geq (N+1)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

采用定理 1 相同的推导过程可得 $\frac{\min\{d(a,c), d(b,c), d(a,d), d(b,d)\}}{\max\{d(a,b), d(c,d)\}} = \frac{DX}{DM} \geq N'$. 得证. \square

在近地传播模型中($\lambda=4$), 不同信噪比要求下, N' 的取值参见表 1.

4 PSMA/CA 协议描述

通过上节分析可知, 暴露节点能否建立并行会话, 主要取决于会话关联度 f 是否满足信噪比要求. 解决暴露节点问题的关键是, 如何判断暴露节点欲建立会话与原有会话之间的关联度. 在 PSMA/CA 协议中, 暴露节点基于邻近节点信号强度或者位置坐标计算会话之间的关联度, 允许满足关联度要求的暴露节点建立并行会话, 以

提高网络空间利用率.

考虑到 802.11DCF 协议是目前使用最广泛同时也是比较完善的协议,PSMA/CA 借鉴了 802.11DCF 的大部分合理内容:数据的发送由 RTS-CTS-DATA-ACK 组成的会话完成,保留了二进制冲突退避算法等.PSMA/CA 解决暴露节点问题的关键过程包括:首先,节点通过信道侦听得到邻近节点信息,在适当时机,节点之间进行邻近节点集交换,使网络中每个节点保存有两跳范围内的邻近节点信息;然后,暴露节点在发送数据前通过信道侦听得到当前会话的帧,获取会话双方地址,根据两跳范围内邻近节点信息,通过定理 1 或者推论 1 计算欲建立会话与当前会话的关联度,如果会话关联度小于信噪比要求,则允许暴露节点建立并行会话.

本文提出两种 PSMA/CA 算法:基于节点位置的协议 PB-PSMA/CA(position based PSMA/CA)和基于邻近节点信号强度的协议 NB-PSMA/CA(neighbor based PSMA/CA).

4.1 算法1. PB-PSMA/CA

在 PB-PSMA/CA 协议中,网络中每个节点借助 GPS 设备或者网络节点定位服务得到本节点的位置坐标,在已知节点位置坐标的情况下,可计算节点之间的距离,会话之间的关联度 f 可以依据推论 1 计算.

首先,为保存本节点的邻近节点以及每个邻近节点的邻近节点集,在 MAC 层添加邻近节点 NT(neighbors table)表,表字段包括:Id 为邻近节点地址;Position 为邻近节点位置坐标,Vector_Neighbors 为邻近节点的邻近节点集.

PB-PSMA/CA 协议主要由 3 部分组成,分别描述如下.

4.1.1 邻近节点位置坐标收集过程

在初始状态下,节点通过 GPS 设备或者网络节点定位服务^[13]得到自身位置坐标.为使节点通过信道侦听得到邻近节点的位置坐标,需要修改 RTS 帧的结构,使之包含发送节点位置坐标.同时,考虑到网络中的部分节点可能短时间内只接收数据而不发送数据,这样使邻近节点无法通过侦听 RTS 帧得到此节点的位置坐标,为此,对 CTS 帧结构进行同样修改.如图 2 所示,RTS/CTS 帧采用相同结构,在现有 802.11DCF 长控制帧的基础上添加发送节点的位置坐标字段 srcPos.

frameType	Padding	duration	destAddr	srcAddr	srcPos	FCS
-----------	---------	----------	----------	---------	--------	-----

Fig.2 RTS/CTS packet format in PB-PSMA/CA

图 2 PB-PSMA/CA RTS/CTS 帧格式

在网络运行过程中,当节点侦听到新的邻近节点发送的 RTS/CTS 帧时,从帧中提取邻近节点的地址 Id 与位置坐标 Position 添加到 NT 表中,此时,该邻近节点信息的 Vector_Neighbors 字段为空.

4.1.2 邻近节点集交换过程

邻近节点位置坐标收集完成后,节点之间进行邻近节点集交换.为完成节点间邻近节点集的交换,PB-PSMA/CA 协议添加用于交换邻近节点集信息的帧 NINFO(neighbors information),结构如图 3 所示.

frameType	Padding	duration	destAddr	srcAddr	srcPos	CNT	ADDR 1	POS 1	...	ADDR n	POS n

Fig.3 NINFO packet format in PB-PSMA/CA

图 3 PB-PSMA/CA 中 NINFO 消息格式

NINFO 帧中主要信息包括:CNT(count)表示邻近节点集中节点总数;ADDR [1...n]表示邻近节点地址;POS [1...n]表示邻近节点的位置坐标.

节点在适当时机根据邻近节点集构造 NINFO 消息进行广播,接收到 NINFO 广播的邻近节点根据发送节点的地址,在本地 NT 表中寻找 Id 字段等于发送节点地址的表项,根据 NINFO 消息中的邻近节点信息,更新此表项的 Vector_Neighbors.如果该邻近节点信息在 NT 表中不存在,说明该节点此前没有发送任何帧或者发送的帧没

有被正确接收.由于 NINFO 消息本身包括发送节点的地址以及位置坐标(srcPos),直接从 NINFO 消息中提取发送节点地址(srcAddr)与位置坐标(srcPos),在 NT 表中添加该邻近节点信息,然后更新此记录的 Vector_Neighbors 为 NINFO 中所含邻近节点集信息.

为保证两跳范围内邻近节点信息的及时性和准确性,NINFO 消息广播的最佳时刻为节点侦听到新邻近节点的帧后,更新本地 NT 表信息并立即构造 NINFO 消息广播.在网络初始化阶段,由于所有节点不断发现新的邻近节点,网络中各个节点不断发送 NINFO 广播消息,形成广播风暴,严重影响网络的正常通信.为防止广播风暴的出现,协议设置 Neighbors_stable 标志,在网络运行初始阶段不允许节点在发现新的邻近节点后立即进行 NINFO 广播,而是当节点的邻近节点保持相对稳定后再进行 NINFO 广播.在本文算法的实现过程中,当最近接收 100 个包中无新邻近节点出现时,设 Neighbors_stable 为 TRUE 进行 NINFO 广播.

4.1.3 关联度判断过程

完成邻近节点信息交换后,所有节点保存有两跳范围内邻近节点的位置坐标.当节点需要发送数据时,如果检测到信道空闲,直接进行发送;如果节点的邻近节点正处于会话状态,则说明本节点为暴露节点.暴露节点首先侦听信道,试图获取当前会话的一个帧,如果能够正确接收到帧,则说明周围只有一个邻近节点正在与其他节点会话,接收此帧,得到帧的目标节点 srcAddr 与发送节点 destAddr.然后,在本节点的邻近节点集中搜索地址为 srcAddr 和 destAddr 的节点位置坐标,如果二者信息都能够在邻近节点集中查找到,且本节点需要发送数据的目标节点 pktDestAddr 的位置坐标也能够在邻近节点集中得到,则首先根据节点坐标计算节点间距离,然后依据推论 1 计算会话关联度.如果满足条件 $f'(Cov(curAddr, pktDestAddr), Cov(srcAddr, destAddr)) < 1/N'$,则暴露节点可以建立并行会话.

在计算会话关联度过程中,如果计算关联度 3 个邻近节点位置坐标中有任何一个在 NT 表中不存在,则暴露节点直接进行退避,防止因计算错误而导致暴露节点干涉当前会话.

4.1.4 PB-PSMA/CA 协议的应用局限性

在理想情况下或者比较空旷的场景中,节点之间的距离与信号强度大致满足公式(1)所述传播模型,但在存在障碍物以及大面积反射散射等情况下,信号强度与节点距离之间的关系较复杂^[14],通过节点间的距离计算信号强度会带来较大的误差,而且 GPS 系统在室内等环境下不能正常使用,网络节点定位算法也存在一定误差^[15],PB-PSMA/CA 算法只能用在比较理想的场景中.与 PB-PSMA/CA 比较,NB-PSMA/CA 具有更强的环境适应性.

4.2 算法2. NB-PSMA/CA

在 NB-PSMA/CA 协议中,节点通过收集和交换邻近节点的平均信号强度,暴露节点依据定理 1 判断会话关联度 f ,决定是否建立并行会话.MAC 层数据结构以及协议过程与 PB-PSMA/CA 类似,以下主要描述其不同点:

首先,在 MAC 层建立的 NT 表中,PB-PSMA/CA 协议中的临近节点位置坐标 Position 用临近节点信号强度 SI(signal strength information)代替;

其次,在邻近节点信息收集过程中,NB-PSMA/CA 只需要检测邻近节点的信号强度,RTS/CTS 消息中不需要添加额外信息.在网络运行过程中,节点在侦听到新加入网络节点的消息后得到其地址,同时通过 RSSI(received signal strength indicator)等方式得到发送节点到达本节点的信号强度 SI,添加此节点信息到 NT 表中;

第三,在邻近节点信息交换过程中,NINFO 消息结构在图 3 所示结构基础上修改位置坐标 POS 为临近节点信号强度 SI.由于邻近节点信号强度具有一定的随机性,节点检测到新邻近节点后不能立即进行 NINFO 广播,需要对信号强度进行多次统计计算平均值.广播 NINFO 消息的时间应该选择在邻近节点信号强度趋于稳定后再进行广播;

最后,在关联度判断过程中,暴露节点根据现有会话与欲建立会话的 4 个节点相互之间的信号强度,依据定理 1 计算会话间关联度.如果计算关联度 4 个节点信息中任何一个节点的信息在 NT 表中不存在,暴露节点直接进行退避,保证暴露节点不干涉当前会话.

4.3 PSMA/CA算法分析

PSMA/CA 协议中,邻近节点信息交换通过广播 NINFO 消息完成.理论上而言,消息广播的时间复杂性为 $O(1)$.为防止初始化阶段的广播风暴,节点在等待邻近节点稳定后才进行 NINFO 广播,存在一定延迟,但协议可以保证广播在某一常数时间 L 内完成.

在空间复杂性方面,节点需要保存两跳范围内邻近节点的位置坐标或者信号强度以计算会话关联度,增加了节点的存储开销,随着节点密度的增大,邻近节点的增多,占用存储空间也增大.假设网络中节点数为 n ,在网络全连通情况下,节点的空间复杂度为 $O(n^2)$,对于存储受限的 ad hoc 网络节点是不可接受的.但在实际应用中,很少存在全连通的大规模 ad hoc 网络,节点的发送范围远远小于网络节点的分布范围;而且借助于拓扑控制技术^[16,17]能够保证节点的最大邻近节点数为 6 或者为一定常数 C .这样可以保证两跳邻近节点数为 C^2 ,邻近节点信息占用空间不随网络规模增加,这对现在或者将来 ad hoc 网络节点是完全可以接收的.

同时,PSMA/CA 协议中暴露节点需要根据邻近节点信息计算会话关联度,其中主要包括 NT 表的搜索与关联度计算,NT 表的搜索占用处理器时间较多.假设邻近节点数为 C ,在 NT 表搜索过程中,暴露节点首先在临近表中查找目标节点的位置坐标,最大搜索长度为 C ;然后通过信道侦听当前会话帧,得到当前会话的发送节点与目标节点,首先在邻近节点中查找发送节点,最大搜索长度为 C ;找到发送节点记录后,再在此项记录的 Vector_neighbors 中查找目标节点信息,最大搜索长度同样为 C .算法最大搜索长度为 $3 \times C$.

在消息复杂性方面,网络中每加入一个节点,其邻近节点都需要广播一次 NINFO 消息,当采用拓扑控制技术使邻近节点数控制在常数 C 范围内时,网络中每个节点最多需要广播 C 次 NINFO 消息.

5 实验结果与分析

本文使用 GloMoSim 2.02^[18]作为模拟仿真实验平台.为了评估 PSMA/CA 协议的性能,论文选用目前广泛应用的 802.11DCF 作为比较对象,与本文中的 PSMA/CA 协议进行对比.详细实验仿真参数配置见表 2.

Table 2 Simulation environment configuration

表 2 仿真环境配置

TERRAIN-DIMENSIONS	2000M×2000M
MOBILITY	NONE
PROPAGATION-PATHLOSS	TWO-RAY
NOISE-FIGURE	10.0
TEMPERATURE	290.0K
RADIO-TYPE	RADIO-ACCNOISE
RADIO-FREQUENCY	2.4GHZ
RADIO-BANDWIDTH	2MBPS
RADIO-RX-TYPE	SNR-BOUNDED
RADIO-TX-POWER	15.0DBm
RADIO-ANTENNA-GAIN	0.0DBm
RADIO-RX-SENSITIVITY	-81.0DBm
RADIO-RX-THRESHOLD	-81.0DBm
RADIO-RX-SNR-THRESHOLD	4.0
ROUTING-PROTOCOL	STATIC

GloMoSim 仿真环境提供节点的位置信息,可以用于模拟 GPS 设备.同时,GloMoSim 的物理层也能够提供精确的接收信号强度,当位置信息与接收能量值都非常精确时,两种算法具有相同的性能.为了使仿真更加接近实际,以分析对比两种协议的差异,我们对 GloMoSim 作如下修改:(1) 根据现有 GPS 设备的精度,为仿真环境提供的精确节点位置坐标添加随机误差.现有 GPS 设备的定位精度 $<2m$ ^[19],在仿真过程中,分别为位置坐标各个向量添加 0~2m 之间的随机误差;(2) 为仿真环境中无线信号强度添加 0~-70dBm 范围内的随机误差.在添加了如上随机误差后,分别分析 PB-PSMA/CA 与 NB-PSMA/CA 协议的性能.

网络吞吐量是网络性能的重要参数,是指网络单位时间内成功传输的有效数据量.为分析 MAC 层协议对网络吞吐量的影响,以下分别在 3 种拓扑结构下进行仿真分析.所有仿真采用 CBR(constant bit rate)数据模型,

数据包大小为 512 字节。

首先,分析最简单拓扑结构下 PSMA/CA 和 802.11DCF 的网络吞吐量.网络拓扑结构如图 4 所示.网络由位于同一条直线的 4 个节点组成,节点 A,B 之间的距离为 50m,节点 C,D 的距离为 50m,节点 B,C 之间的距离为 x ,节点 B,C 分别向节点 A,D 发送数据.

在 802.11DCF 协议中,当 $x > 362\text{m}$ 时,由于 x 超出侦听与接收范围,节点 A,B 之间会话与节点 C,D 之间会话可并行进行,网络的吞吐量达到最大值 1 370Kbps;当 $x < 362\text{m}$ 时,由于 802.11DCF 不允许暴露节点发送数据,网络的吞吐量为 830Kbps.在 PSMA/CA 协议中,当 $x < 100\text{m}$ 时,由于不满足 PB-PSMA/CA 协议和 NB-PSMA/CA 协议中会话关联度要求,而且 PSMA/CA 增加了 RTS/CTS 消息长度,降低了网络有效载荷,网络吞吐量略低于 802.11DCF;当 $x > 100\text{m}$ 时,会话关联度较低,PSMA/CA 协议吞吐量高于 802.11DCF 协议.比较 PB-PSMA/CA 与 NB-PSMA/CA 协议,当节点间距离较小时,2m 的绝对位置误差对节点位置影响较大,-70dBm 的噪声对信号强度的影响较小,在这种情况下,NB-PSMA/CA 效率高于 PB-PSMA/CA;当节点间距离较大时,随机噪声的影响大于位置误差的影响,PB-PSMA/CA 效率较高(如图 5 所示).

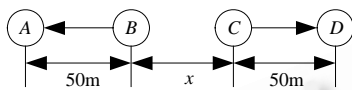


Fig.4 Simple topology
图 4 简单拓扑结构

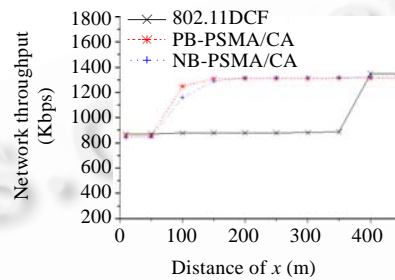


Fig.5 Throughputs under simple topology
图 5 简单拓扑结构下网络吞吐量

然后分析单链路多跳拓扑结构下的协议性能,拓扑结构如图 6 所示.节点 0 通过中间 8 个节点向节点 9 发送数据,节点位于同一直线,节点之间距离均匀,邻近节点间距离为 x .

在 802.11DCF 协议中,当 x 逐渐增大时,由于节点间干扰减少,吞吐量逐渐增大,当 $x = 362\text{m}$ 时,网络中不存在暴露节点,网络吞吐量达到最大值 133Kbps;在 PSMA/CA 中,当 x 较小时,距离较远的会话,如节点 0、节点 1 之间的会话与节点 8、节点 9 之间的会话满足会话关联度要求,可并行进行,因而网络吞吐量高于 802.11DCF.当 x 接近 362m 时,暴露节点减少,由于 PSMA-CA 的 RTS/CTS 帧长度比 802.11DCF 要大,有效载荷减少,网络吞吐量略低于 802.11DCF(如图 7 所示).

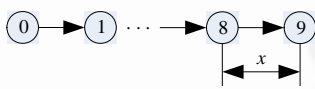


Fig.6 Line topology
图 6 线性拓扑结构

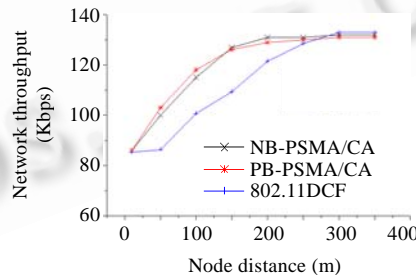


Fig.7 Throughputs under line topology
图 7 线性拓扑结构下网络吞吐量

最后,仿真更接近实际的网格拓扑结构,如图 8 所示,网络由 10×10 个节点构成,节点间距离为 d ,最底层节点通过中间节点向对应最顶层节点逐跳路由数据.

在网格拓扑结构下,当 x 较小时,由于节点密度较大,网络中暴露节点数量较多,PSMA/CA 协议下网络平均吞吐量为 802.11DCF 协议下网络吞吐量的 250%.随着 x 的增大,节点密度减小,暴露节点数量也随之减少,

802.11DCF 的吞吐量增加.在任何节点密度条件下,PSMA/CA 的吞吐量均高于 802.11DCF 协议.PSMA/CA 协议下网络的平均吞吐量为 802.11DCF 的 120%(如图 9 所示).

通过上述各个拓扑环境下对网络吞吐量的仿真实验,可以得到在节点部署稠密的情况下,由于 PSMA/CA 能够有效减少网络中暴露节点的数量,网络的平均吞吐量均高于 802.11DCF 协议.比较 PB-PSMA/CA 与 NB-PSMA/CA,当节点之间的距离较小时,由于 GPS 系统的测量误差对协议影响较大,PB-PSMA/CA 协议的效率低于 NB-PSMA/CA;当节点之间的距离较远时,环境噪声对信号的影响较大,NB-PSMA/CA 协议的效率低于 PB-PSMA/CA.

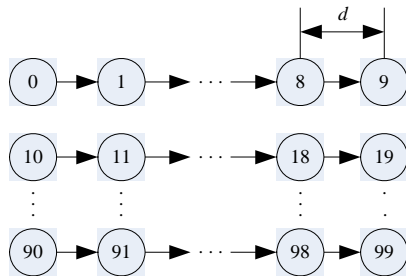


Fig.8 Grid topology
图 8 网格拓扑结构

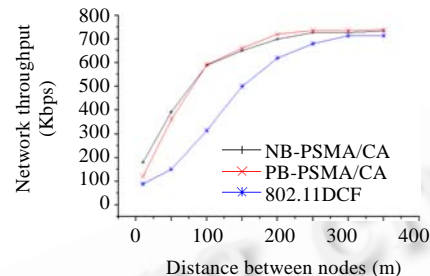


Fig.9 Throughputs under grid topology
图 9 网格拓扑结构下网络吞吐量

6 总结和进一步的工作

本文提出一种适用于稠密部署静态 ad hoc 网络的 MAC 协议 PSMA/CA.借助两跳范围内邻近节点的信息,基于会话关联度模型,允许关联度较小的会话并行进行,从而有效解决暴露节点问题,增加网络空间利用率,提高网络吞吐量.仿真结果表明,PSMA/CA 协议下平均网络吞吐量高于 802.11DCF,达 20%.算法不需要节点之间的同步,对节点硬件也没有提出新的要求;与现有算法^[8-10]比较,该算法具有更强的适应能力,能够有效缓解 ad hoc 网络中的暴露节点问题对网络吞吐量造成的影响.

PSMA/CA 协议在防止隐藏节点问题方面仍然采用 RTS/CTS 机制,在仿真实验过程中发现,RTS/CTS 不能完全解决隐藏节点问题,DATA 消息仍然会受到隐藏节点所发消息的干涉.同时,协议采用的二进制指数退避算法在网络负载较重的情况下将导致节点间的公平性问题^[20,21],这是我们在后续工作中需要进一步研究的方向.

致谢 在此,向对本文提出有益建议的审稿专家表示感谢.

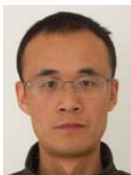
References:

- [1] Hekmat R. Ad-Hoc Networks: Fundamental Properties and Network Topologies. Springer-Verlag, 2006. 2-8.
- [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] Aruna J, Sylvie P, Arek D, Steven G. Hidden vs. exposed terminal problem in ad hoc networks. In: Sanjay J, ed. Proc. of the Australian Telecommunications, Networks and Architecture Conf. (ATNAC 2004). Sydney, 2004. 52-56. http://www.itr.unisa.edu.au/itrusers/aruna/public_html/Research/papers/C7.pdf
- [4] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. In: ANSI/IEEE Std. New York: IEEE Press, 1999. 29-138.
- [5] Phil K. MACA—A new channel access method for packet radio. In: Harris J, ed. Proc. of the ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf. Ontario, 1990. 134-140. <http://www.ece.rice.edu/~camp/MAC/mac.pdf>
- [6] Haas ZJ, Jing D. 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] Sunil K, Vineet SR, Jing D. Medium access control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. Elsevier Ad Hoc Networks, 2006,4(3):326-358.

- [8] Acharya A, Misra A, Bansal S. MACA-P: A MAC for concurrent transmissions in multi-hop wireless networks. In: Frances T, ed. Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003). Washington: IEEE Press, 2003. 505–508.
- [9] Shukla D, Leena C, Iyer S. Mitigating the exposed node problem in IEEE 802.11 ad hoc networks. In: Ronald PL, ed. Proc. of the 12th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 2003). Dallas: IEEE Press, 2003. 157–162.
- [10] Kimaya M, Elizabeth MB. RTSS/CTSS: Mitigation of exposed terminals in static 802.11-based mesh networks. In: Fred B, ed. Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh 2006). Reston: IEEE Press, 2006. 3–12.
- [11] David T, Pramod V. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 49–55.
- [12] Mhatre VP, Papagiannaki K, Baccelli F. Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs. In: Srinivasan R, ed. Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). Washington: IEEE Press, 2007. 535–543.
- [13] Dragos N, Badri N. Ad hoc positioning system (APS). In: Gayle W, ed. Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. 2001 (GLOBECOM 2001). New York: IEEE Press, 2001. 2926–2931.
- [14] Zhao J, Govindan R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003). Los Angeles: ACM Press, 2003. 1–13. <http://pdos.csail.mit.edu/decouto/papers/zhao03.pdf>
- [15] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-Less low-cost outdoor localization for very small devices. IEEE Personal Communications, 2000,5(7):28–34.
- [16] Fabian K, Aaron Z. Ad-Hoc networks beyond unit disk graphs. In: Ginger I, ed. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking Workshop on Discrete Algorithms and Methods for MOBILE Computing and Communications ACM Workshop on Principles of Mobile Computing (DIALM-POMC 2003). San Diego: ACM Press, 2003. 69–78.
- [17] Ning L, Hou JC. Localized topology control algorithms for heterogeneous wireless networks. IEEE Trans. on Networking, 2005, 13(6):1313–1324.
- [18] Zeng X, Bagrodia R, Gerla M. GloMoSim: A library for parallel simulation of large-scale wireless networks. In: Penny S, ed. Proc. of the 20th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS'98). Washington: IEEE Press, 1998. 154–161.
- [19] Bajaj R, Ranaweera SL, Agrawal DP. GPS: Location-Tracking technology. Computer, 2002,35(4):92–94.
- [20] 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>
- [21] Li Y, Chen QB, Long KP, Wu SQ. Analyzing and improving the TCP stability in wireless ad hoc networks. Journal of Software, 2003,14(6):1178–1186 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1178.htm>

附中文参考文献:

- [20] 张磊,王学慧,窦文华.无线自组网络中 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>
- [21] 李云,陈前斌,隆克平,吴诗其.无线自组织网络中 TCP 稳定性的分析与改进.软件学报,2003,14(6):1178–1186. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1178.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.



蒋卫华(1973—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为网络安全,网络性能评价,信息化.



张德运(1941—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络.