

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.016

# 可保持最大吞吐量的 IEEE 802.11 DCF 协议功率控制机制

张海荣, 郭松涛, 陈 飘

(西南大学, 电子信息工程学院, 重庆 400715)

**摘 要:**在无线 Ad Hoc 网络中使用功率控制不仅可以节省能耗,还能提高网络吞吐量。基于 IEEE 802.11 DCF 协议,提出了一种新的适用于车辆自组织网络的功率控制算法。该算法根据节点的通信状况,动态地调整接收节点的 CTS 帧发射功率和发送节点的数据包发射功率,进而根据使网络吞吐量达到最大时的最佳接入节点数目调节 RTS 帧的发射功率,从而避免冲突,增大吞吐量。仿真表明该算法不仅能降低平均能耗,延长网络生存时间,还能增大网络复用率,提高网络的平均吞吐量。

**关键词:**Ad Hoc 网络;DCF 协议;功率控制;系统吞吐量

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)08-111-08

## To maintain maximum throughput IEEE 802.11 DCF protocol power control mechanism

ZHANG Hairong, GUO Songtao, CHEN Piao

(College of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Transmission power control has been extensively used not only to save energy, but also to improve the network throughput in wireless ad hoc networks. A new adaptive power control algorithm, i.e., PCMAC algorithm, based on IEEE 802.11 DCF protocol for Vehicular Ad hoc networks is proposed. According to the communication status, the algorithm dynamically adjusts the transmit powers of the CTS frames of receiving nodes and the data packets of the transmitting nodes, furthermore, adjusts the transmit powers of the RTS frames of the transmitting nodes according to the optimal number of access nodes such that the network throughput is maximized, in order to avoid conflicts and increase throughput. The simulation results show that the proposed PCMAC (power control media access control) algorithm can not only decrease the average energy consumption so as to prolong the lifetime of the network, but also improve spatial reuse of the wireless channel so as to improve the average throughput of the network.

**Key words:** Ad Hoc networks; DCF protocol; power control; throughput

无线移动 Ad Hoc 网络是一种无中心、自组织、多跳式的网络,网络中的节点直接进行通信或通过其他节点转发数据而间接通信。它以组网简单快捷而被广泛应用。车辆自组织网络<sup>[1]</sup>作为无线自组织网络的一种特例,是以车辆为节点形成的自组织网络,实现车—车通信,车—基础设施通信。在 Ad Hoc 网络中,无线信道被所有节点分享,所以需要—个媒质接入控制(MAC)协议来协调节点间通信并减少冲突。

**收稿日期:**2014-05-24

**基金项目:**国家级大学生创新基金项目资助项目(201310635043);国家自然科学基金资助项目(61170248,61373179)

**作者简介:**郭松涛(1975-),男,教授,博士,主要从事无线与移动网络、无线传感器网络、高性能互连网络、并行与分布式计算研究,(E-mail)stguo@swu.edu.cn。

目前已有的 MAC 协议能量节省机制大致可分为节点休眠控制<sup>[2]</sup>和节点功率控制<sup>[3-6]</sup>两大类。其中,节点休眠控制机制允许节点在适当的时候切换到低功耗的休眠状态,从而降低节点的功耗;而节点功率控制机制要求在保证信号发送成功的前提下,尽可能地节省节点的发射功率,由于网络的频率空间复用度与节点的发送功率大小直接相关,因而合理的功率控制机制不仅能有效地节省节点的功耗,还能提高网络的频率空间复用度,从而提高网络的平均吞吐量。由于车辆间通信具有很强的时效性,研究 MAC 协议中的节点功率控制具有重要意义。近年来,以车辆为节点的车辆自组织网络功率控制成为研究热点,文献[7]根据传播路径的损耗进行节点的发射功率调整,文献[8]根据信道的拥塞状况同时进行发送速率调整和功率控制。

IEEE 802.11 DCF(distributed coordination function)<sup>[9-10]</sup>作为一种使用非常广泛的 MAC 协议,通过载波监听机制(CAMA/CA)来避免冲突干扰,并采用请求发送/清除发送(RTS/CTS)四次握手机制,部分地解决了隐藏终端的问题<sup>[11-12]</sup>,但是该协议并没有引入节点功率控制机制。

文献[3-5]所提出的 MAC 协议均可降低功耗。在这些协议中节点用最大功率进行 RTS/CTS 帧交互,用最低功率完成数据帧的传输和应答。这种功率控制机制虽然简单,但会引起网络吞吐量下降,而且该机制在某些情况下可能引起节点能耗增加<sup>[6]</sup>。

文献[6]提出了 PCM 协议,该协议在数据帧的发送期间,周期性地增大发送功率,从而避免冲突。文献[6]的仿真证明,该协议虽然能降低节点的能耗,但没有同时通过功率控制提高频率的空间复用度,因而无法提高网络的平均吞吐量。

文献[13]提出用双倍信道进行功率控制。该机制在接收节点在数据信道上接收数据帧的同时,还在信道上用最大功率发送忙音信号。其他发送节点通过忙音信号来调整发送功率,从而避免冲突。文献[13]的仿真证明,该协议比 802.11 DCF 协议获得更高的网络吞吐量。然而,多信道和多发送端引起额外的能耗和更复杂的技术。文献[14]在文献[13]的基础上,提出多信道功率控制,在提高系统吞吐量的同时减少了能量的浪费,但仍然存在技术复杂难以实现的问题。文献[15]提出一种基于单信道单发送 POWMAC 协议,该协议以提高频率空间复用度为目的,与上述文献不同的是 POWMAC 用了一种新规则:当一个节点监听到另一个节点正在传输数据时,在不干扰正在进行的传输前提下,可以不进行 RTS/CTS 交互,它仍然能够传输自己的数据。然而,POWMAC 并不能使吞吐量明显提高,因为节点发送不同步时,无法同时进行数据传输。文献[16]提出一种动态反馈功率控制算法,虽然在一定程度上节省了能耗,但并不能有效地提高系统吞吐量。

文中提出一种基于 DCF 协议的功率控制算法,简称 PCMAC 算法。PCMAC 算法的基本思想是首先保证节点无冲突的条件下自适应调节 CTS 帧和数据帧发送功率,然后根据使网络吞吐量达到最大时的接入节点数目即最佳接入节点数目,调节 RTS 帧的发射功率,从而避免冲突,增大吞吐量。仿真结果表明,相比传统的 IEEE 802.11 DCF 协议,PCMAC 算法不仅可以降低能耗,还可以显著提高网络吞吐量。

## 1 IEEE 802.11 DCF 协议

### 1.1 概述

IEEE 802.11 DCF 协议是一种基于冲突避免的载波检测多点多接入(CSMA/CA)的随机访问机制<sup>[17]</sup>,采用 RTS/CTS/DATA/ACK 四次握手机制来解决隐藏终端问题,如图 1 所示。具体为在一个节点传输信息前,检测信道状态来决定是否进行传输。如果信道忙碌,节点将延迟发送,直到检测信道为空闲。然后节点根据竞争窗口(W)随机设置一个退避时间,退避时间由若干时隙组成,并按时隙倒退。在倒退期间,任一时隙中检测到信道为忙,则退避停止,并重新开始监听。若退避减小到 0,则发送节点发出一个全向 RTS 帧,一段时间(SIFS)后,再向目的节点发送数据,接收节点正确接收到 DATA 后向源节点发送 ACK 表示传输结束。

### 1.2 载波监听

IEEE 802.11 DCF 协议规定,网络中某个节点要发起传输时,先通过 RTS/CTS 交互抑制周围节点传输

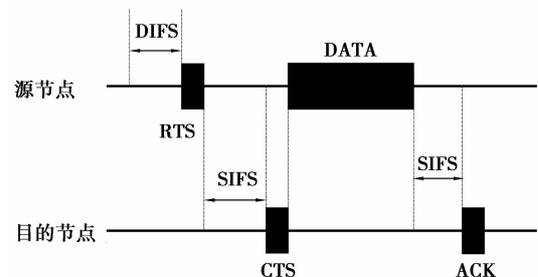


图 1 DCF 基本工作原理

数据,从而减小冲突,所以在经典 DCF 协议中,用最大功率发送 CTS/RTS 帧来尽可能地抑制更多干扰。

图 2 中  $r_1$  为数据传输范围,在范围内所有节点都能接受并正确译码周围节点发送的信息。 $r_2$  为载波监听信号传输范围, $r_2 \sim r_1$  范围内的节点(C)只能侦听到 RTS/CTS 帧,不能正确译码。例如,当节点 A 有数据包发给节点 B 时,先发出 RTS 帧,B,C,D 均能侦听到。B,D 可正确译码 RTS 帧(RTS 帧包含发送节点、接收节点、路由等信息),B 译码后会回应 CTS 帧,传输范围也是  $r_2$ 。故 D,C 均会等 A,B 传输完成后再传输,从而产生延迟。

为尽可能多地减少冲突干扰,DCF 协议用最大功率发送 RTS、CTS 帧,以较小功率发送 DATA/ACK 数据包。文献[6]指出,简单地增大 CTS 帧的传输范围,不仅无法完全避免冲突,而且还会引起节点能耗的增加和频率空间复用度的降低,从而导致网络平均吞吐量的下降。

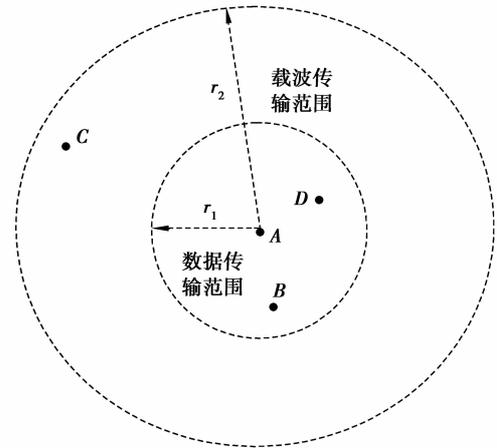


图 2 DCF 传输范围

## 2 PCMAC 算法

由于以最大发送功率发送 CTS 帧、较小功率发送数据帧的机制无法有效地降低节点能耗,提高网络吞吐量,故文中提出了一种基于 DCF 协议的功率控制算法即 PCMAC 算法,该算法将根据节点的通信状况,动态地调整接收节点的 CTS 帧发射功率和发送节点的数据包发射功率,从而提高网络吞吐量。

### 2.1 干扰模型下 CTS 帧和数据帧发送功率的估算

PCMAC 算法要求节点无冲突接收信号需满足以下 3 个条件:

- 1) 网络中的接收节点收到的信号功率大于信号接收门限  $\alpha_{rx}$ 。
- 2) 接收节点当前的信噪比 SNR 大于节点的接收信噪比门限  $r_{rx}$ ,即  $P_{noise} \leq P_{rx} r_{rx}$ ,其中, $p_{noise}$  为信道噪声功率, $p_{rx}$  为接收信号功率。
- 3) 节点接收信号  $p_{rx}$  与该节点干扰范围外的其他节点对它产生的干扰信号功率之和  $p_{iftotal}$  满足

$$P_{iftotal} \leq p_{rx} r_{rx}, \quad (1)$$

且

$$P_{iftotal} = \sum_{j=1}^N P_{inter}^j,$$

其中, $r_{rx}$  为接收信号载干比门限  $\sum_{j=1}^N P_{inter}^j$  为周围某个节点  $j$  对该节点产生的干扰功率, $N$  为该节点邻居节点数目。

PCMAC 要求网络中所有发送节点均以标准发送功率  $p_{std}$  向接收节点发送 RTS 帧。接收节点收到 RTS 帧后,可以根据接收信号的功率  $p_{rx}$  及无线信号传播模型、节点的天线增益  $G$  和天线高度  $h$  估算出发送节点与接收节点之间的距离  $d_{tx}$  为

$$d_{tx} = \sqrt{\frac{p_{std} h^4 G^2}{p_{rx}}}. \quad (2)$$

根据  $d_{tx}$  和已知的信号接收门限  $\alpha_{rx}$ 、信噪比门限  $r_{rx}$ ,接收节点即可由当前的总干扰功率  $p_{iftotal}$  估算出发送节点的最小数据帧发送功率  $p_{Datamin}$  为

$$p_{Datamin} = \begin{cases} \frac{d_{tx}^4 p_{noise} r_{rx}}{h^4 G^2}, & \text{if } \frac{\alpha_{rx}}{p_{noise}} < r_{rx}, \\ \frac{d_{tx}^4 \alpha_{rx}}{h^4 G^2}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

$p_{Datamin}$  即为在当前信道噪声条件下,为保证接收节点正确接收数据帧,发送节点必须采用最小发送功率。由于  $p_{Datamin} < p_{std}$ ,因此,当发送节点以最小发送功率  $p_{Datamin}$  向接收节点发送数据帧时,对该接收节点产生干扰的任一节点的最大干扰功率为  $p_{std}$ 。在  $d_{tx}$  和  $p_{std}$  均已知的情况下,即可得出当发送节点以最小发送功率

$p_{\text{Datamin}}$  向接收节点发送数据帧时,接收节点的最大冲突干扰范围  $r_{\text{ifmax}}$  为

$$r_{\text{ifmax}} = d_{\text{tx}} \sqrt[4]{r_{\text{rx}} \frac{p_{\text{std}}}{p_{\text{Datamin}}}} \quad (4)$$

因此,为了保证接收节点能无冲突地接收发送节点以最小发送功率  $p_{\text{Datamin}}$  发送的数据帧,在帧传输期间,接收节点最大冲突干扰范围  $r_{\text{ifmax}}$  内的其余发送节点均不能发送信号。令 CTS 帧的传输范围为  $r$ ,即可得到接收节点应答 CTS 帧时所需采用的最大发送功率  $p_{\text{CTSmax}}$  为

$$p_{\text{CTSmax}} = \frac{r_{\text{ifmax}}^4 \alpha_{\text{rx}}}{h^4 G^2}, \quad (5)$$

由于  $\alpha_{\text{rx}} > p_{\text{iftotal}}$ ,因此由式(2)-(5)可知, $p_{\text{CTSmax}} > p_{\text{std}}$ 。进而,(1)式中  $p_{\text{inter}}^i$  可以写为

$$p_{\text{inter}}^i = \frac{\frac{p_r^i}{y} - p_{\text{noise}}}{N(1+\theta)} = \frac{p_r^i - y \cdot p_{\text{noise}}}{N(1+\theta)y}, \quad (6)$$

这里, $y$  为载干比 SINR, $N$  为接收节点的邻居节点数(PCMAC 中邻居节点数包含在路由表中,节点可自行检测), $\theta(\theta > 0)$  表示来自传输范围外的节点对该节点造成的干扰比例。从该式可以得到,网络节点数的多少影响发送功率<sup>[14]</sup>,从而对网络吞吐量产生影响。

## 2.2 节点数与系统吞吐量分析

为进一步研究节点数对网络吞吐量的影响,建立节点退避过程的二维离散马尔科夫链模型<sup>[18-20]</sup>。假设网络中有  $n$  个节点,不考虑隐藏终端的存在,而且每个节点始终有数据包等待发送。我们得到节点发送概率  $\tau$ 、碰撞概率  $p$  以及竞争窗口  $W$ 、退避阶数  $m$  3 者之间的关系式<sup>[14]</sup>为

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (6)$$

式中, $m$  为最大竞争窗口( $W_{\text{max}}$ )设置允许的最大退避阶数。在一个时隙内网络中至少有一个节点发送成功的概率为  $p_{\text{tr}} = 1 - (1-\tau)^n$ ,而只有一个节点发送成功的条件概率为  $p_s = n\tau(1-\tau)^{n-1}$ 。假设数据载荷为  $P$ ,则 IEEE 802.11 DCF 的系统归一化饱和吞吐量的表达式为

$$S = \frac{E[P]}{T_s - T_c + \frac{\sigma(1-P_{\text{tr}})/P_{\text{tr}} + T_c}{P_s}}, \quad (7)$$

式中, $E[P]$  为数据载荷的平均传输时间, $T_s$  为节点成功发送时信道被检测为忙的平均时间, $T_c$  为发生碰撞时信道被检测为忙的平均时间, $\sigma$  为空闲时隙时间。对于 IEEE 802.11 DCF 的基本模式和 RTS/CTS 模式, $T_s$  和  $T_c$  有不同的取值,但在给定的访问模式下,通常为常量。 $E[P]$  值与上层协议业务有关, $\sigma$  由物理层参数特性决定。因此当(7)式中的部分分母

$$\frac{\sigma(1-P_{\text{tr}})/P_{\text{tr}} + T_c}{P_s} = \frac{T_c^* - (1-\tau)^n(T_c^* - 1)}{n\tau(1-\tau)^{n-1}}, \quad (8)$$

的值最小时,IEEE 802.11 DCF 的饱和吞吐量最大。式中  $T_c^* = T_c/\sigma$ 。由式(8)可见,系统的吞吐量与节点发送概率  $\tau$  及节点个数  $n$  有关。令

$$f(n) = \frac{T_c^* - (1-\tau)^n(T_c^* - 1)}{n\tau(1-\tau)^{n-1}},$$

当  $f(n)$  最小时,系统吞吐量最大,当节点发送概率  $\tau$  一定时,所对应的节点接入数目  $n$  即为最佳节点数目,记为  $n_{\text{opt}}$ 。所以若有  $n_{\text{opt}}$  存在,则表示  $f(n)$  应为凹函数才存在最小值,于是有

$$\begin{aligned} f(n_{\text{opt}}) - f(n_{\text{opt}} - 1) &\leq 0, \\ f(n_{\text{opt}}) - f(n_{\text{opt}} + 1) &\leq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

化简可得  $n_{\text{opt}}$  应该满足

$$\begin{aligned} (1-\tau)n_{\text{opt}}(T \cdot c - 1) + (n_{\text{opt}}\tau - 1)T \cdot c &\leq 0, \\ (1-\tau)n_{\text{opt}}(T \cdot c - 1) + ((n_{\text{opt}} - 1)\tau - 1)T \cdot c &\geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

其中,由(6)式可知, $\tau$  的大小取决于碰撞概率  $p$  以及竞争窗口  $W$ 、退避阶数  $m$ 。所以可根据网络实际情况及需求,设置竞争窗口和最大退避阶数,从而求出能使系统吞吐量达到最大时网络中最佳节点数  $n_{\text{opt}}$ 。下面将

通过一定的功率控制算法,把节点接入数目控制在  $n_{opt}$ ,使网络保持最佳性能。

### 2.3 PCMAC 算法描述

PCMAC 要求每个车辆节点都有一张路由信息维护表包括周围节点的数量和各自的位置。当网络中节点数目为  $n_{opt}$  时系统吞吐量达到最大。故在通信中动态调节功率使邻车列表中节点数目等于  $n_{opt} - 1$  (加上节点本身,则此时网络中总的节点数目为  $n_{opt}$ )。经典 DCF 协议中,当节点有数据包发送时才进行信道检测。但由于车辆行驶信息随时变化,车辆间要不停地进行信息交互,所以车辆自组织网络中的节点需要定时地进行载波侦听。当检测到信道为空闲时,等待 DIFS 后再次检测,若信道仍为空闲则发送 RTS 帧。PCMAC 算法可分为 3 个阶段。

#### 2.3.1 RTS 帧发射功率的动态调整

当节点  $i$  向节点  $j$  发起传输时,发送 RTS 前,节点  $i$  首先需要查看邻车列表并读取周围节点数目  $N$ 。

1) 若  $N$  恰好等于  $n_{opt} - 1$ ,则直接使用预设的发射功率  $p_{std}$  作为 RTS 帧的发射功率  $p_{rts}$ 。

2) 若  $N$  大于  $n_{opt} - 1$ ,则需要降低功率来缩小 RTS 帧的传输范围,使得网络中节点数目等于或接近  $n_{opt} - 1$ 。PCMAC 中功率减小策略为:节点  $i$  在预设功率  $p_{std}$  的基础上稍作调整即

$$p_{rst1} = p_{std}(1 - \beta),$$

其中  $\beta(0 < \beta < 1)$  为常数。由于 PCMAC 中载波侦听范围与 RTS 帧传输范围一致,故用  $p_{rst1}$  作为载波侦听信号的发射功率检测信号,刷新邻车列表。此时,若  $N$  小于或等于  $n_{opt} - 1$ ,则将  $p_{rst1}$  作为 RTS 发射功率发送 RTS;若  $N$  仍然大于  $n_{opt} - 1$ ,则

$$p_{rst2} = p_{rst1}(1 - \beta),$$

再次读取列车数目,若节点数  $N$  小于或等于  $n_{opt} - 1$ ,则将  $p_{rst2}$  作为 RTS 发射功率发送 RTS;若  $M$  仍然大于  $n_{opt} - 1$ ,则

$$p_{rst3} = p_{rst2}(1 - \beta)。$$

此时,不必检测周围车辆节点数目直接向目的节点  $j$  发送 RTS 帧,即功率调整次数不超过 3 次。这样规定有两个原因,一是要保证车辆间通信的迅速准确性,调整次数过多影响传输速率;二是 RTS 帧传输范围过小会引起更多的冲突,造成功率浪费。

3) 若  $M$  小于  $n_{opt} - 1$ ,则通过增大功率来扩大传输范围,从而使更多节点加入网络中。其功率增加的调整过程与 2) 中功率减小的过程类似,即

$$p_{rst} = p_{std}(1 + \beta)。$$

与情况 2) 相同,功率调整次数也最多为 3 次,待第 3 次调整结束后,无论周围节点数目为多少,发送节点  $i$  直接用第 3 次调整的结果作为  $p_{rst}$  向目的节点  $j$  发送 RTS 帧。但是,在调整过程中,只要出现  $M$  大于或者等于  $n_{opt} - 1$ ,则节点  $i$  直接向节点  $j$  发送 RTS。

#### 2.3.2 CTS 帧和 DATA 帧发射功率的自适应

当节点  $j$  收到来自节点  $i$  的 RTS 后,可由式 (1)~式 (5) 估算出应答 CTS 帧时所需要的最大发射功率  $p_{CTSmax}$  以及传输数据时需要的最小功率  $p_{Datamin}$ ,并且将最小数据功率存储在 CTS 帧中发送给节点  $i$ 。推导过程在 2.1 小节已经详细给出,此处不再展开叙述。图 3 为改进后的 CTS 帧结构,其中 DTP 字段中包含数据帧发送功率  $p_{Datamin}$ 。

控制帧	持续时间	接收地址	DTP	FCS
-----	------	------	-----	-----

图 3 改进后的 CTS 帧

#### 2.3.3 数据帧的传输及应答

当节点  $i$  收到  $j$  发来的 CTS 帧后,可以从 DTP 中获取传输数据所需的最小功率  $p_{Datamin}$ ,则节点  $i$  用此功率传输数据帧,节点  $j$  成功接收后向节点  $i$  回应一个 ACK 帧,表示传输完毕。然后立即准备下一组信息交互。

整个算法流程如图 4 所示。

## 3 仿真分析

为了表明提出的基于 DCF 的 PCMAC 功率控制算法的有效性,通过在相同的网络环境中仿真对比 Ad Hoc 网络在经典 DCF 协议和改进的 DCF 协议的吞吐量,从而表明改进的算法比原有的算法有更好的性能

表现。表 1 和表 2 为仿真参数设置,参数取值参照一般模型。

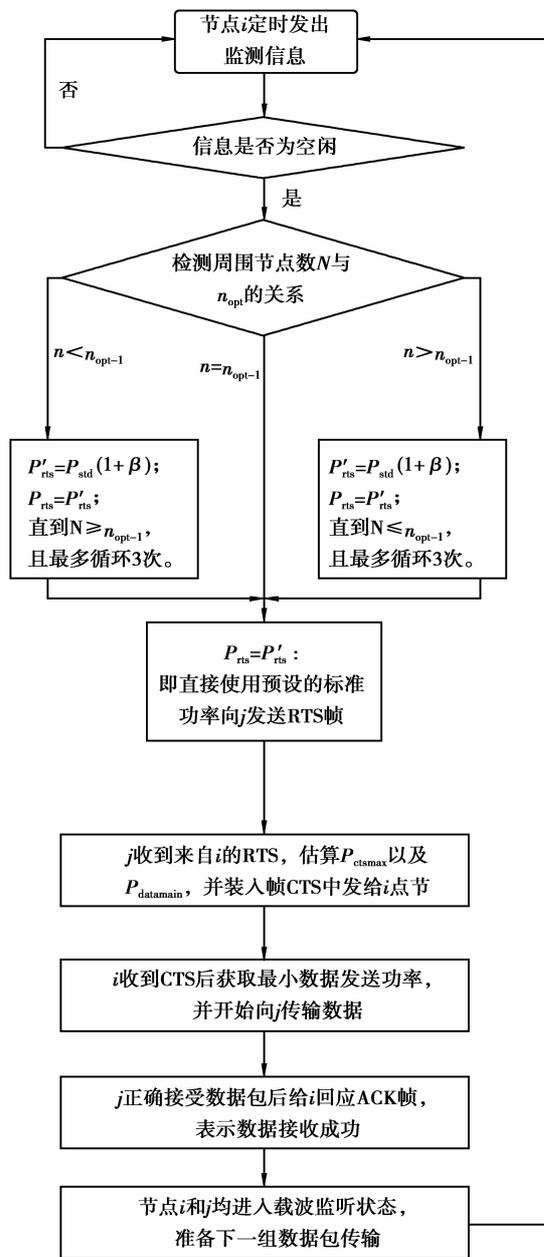


图 4 PCMAC 算法流程

表 1 建模仿真参数

参 数	初始值
邻节点数目 $N$	100
退避阶数 $M$	32
数据载荷平均传输时间 $E[p]/\mu s$	8
$T_c/\mu s$	10
竞争窗口 $W$	32
碰撞概率 $P$	0.03
空闲时隙时间 $\delta$	20
$T_s/\mu s$	50

表 2 网络仿真参数

参 数	初始值
退避阶数 $M$	3
碰撞	0
竞争窗口 $CW$	32
最短帧间间隔 $SIFS/\mu s$	10
数据包缓存区空量/(Mbyte)	1
时隙/ $\mu s$	20
吞吐量	0
信道为忙	0
物理速率/( $Mbit \cdot s^{-1}$ )	2
退避计时器	$\infty$
分布式帧间间隔 $DIFS/\mu s$	50
碰撞站	0
平均到达时间/ $\mu s$	110
平均包长度/时隙	50

### 3.1 IEEE 802.11 DCF 性能分析

首先评价根据式(10)计算出的 DCF 协议中吞吐量随节点数目的变化关系。我们通过建立马尔科夫链模型,假设竞争窗口与退避阶数一定时得到吞吐量与节点数目的关系,如图 5 所示。从图中可以看出,理论上,当节点数目  $M$  等于 5 的时候,系统吞吐量达到最大值,且当节点数目大于 10 时吞吐量急速下降。这是因为要发送数据的节点增多,冲突概率增大,需要退避等待的时间更多,增加了网络传输时延,降低了系统吞吐量。

图 6 是考虑到车辆运动的实际情况时 DCF 协议的网络吞吐量变化曲线。最小竞争窗口  $CW_{min}$  取 32,每个时隙触发一次,得到了在一定时间内,当网络内所有节点数目为 5、15、20、25、30 时 5 种情况下吞吐量的变化情曲线。从图 6 可以得到当节点数目为 15 时系统吞吐量最大,为  $0.2 \times 10^6$ ,这与图 6 中得到的理论值恰好符合。

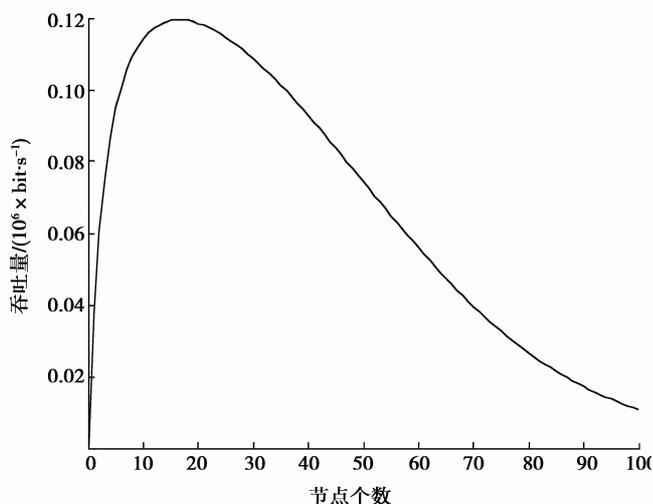


图 5 吞吐量随节点数目变化曲线

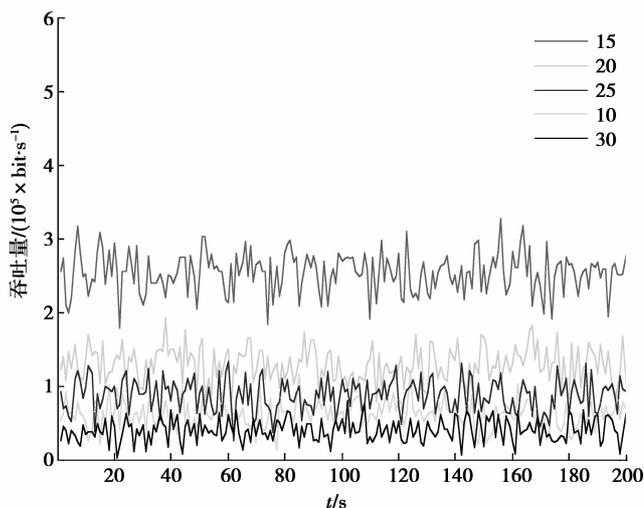


图 6 基于 DCF 的网络吞吐量变化曲线

由图 5 和图 6 可以看出,IEEE 802.11 DCF 的网络饱和吞吐量会随节点数目的改变而发生变化。当节点数目小于 15 时吞吐量随节点数目增加而增大,这是此时节点数目较少,很少发生冲突,而节点的增加使得单位时间传输的数据量增加,从而吞吐量提高。当节点数目大于 15 时,网络吞吐量随节点数目的增加而下降。这是由于随着节点数的增多,多个节点在同一时隙发送数据的概率增大,发生碰撞的概率也就增大,造成重传次数增多,吞吐量下降。

### 3.2 PCMAC 仿真及结果分析

图 7 为基于 PCMAC 的网络吞吐量变化曲线。与 DCF 仿真相同,仿真时间为 200 s,最小竞争窗口 CW<sub>min</sub> 为 32,退避阶数为 5。由于 PCMAC 通过功率控制将节点接入数目控制为 15,且自适应调整数据发射功率,使数据发射功率尽可能小,从而减小能耗。仿真结果显示:文中提出的 PCMAC 功率控制算法的网络吞吐量可达到  $1.5 \times 10^6$ ,相比图 7 所示的基于 DCF 的网络吞吐量明显提高,约为基于 DCF 的网络吞吐量  $0.2 \times 10^6$  的 7.5 倍。

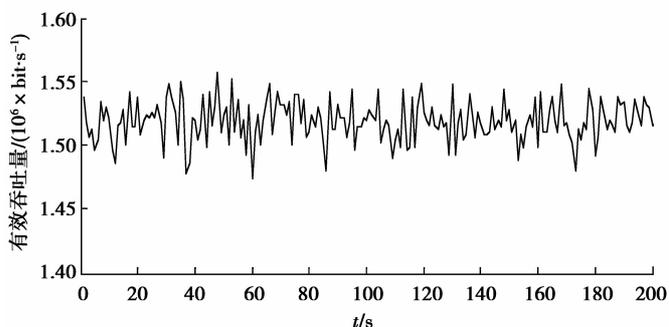


图 7 基于 PCMAC 的网络吞吐量变化曲线

可见,PCMAC 就网络吞吐量而言,性能明显

优于 DCF。这是因为 PCMAC 采用功率控制机制使网络保持最佳节点数目,避免了网络拥塞并减小了节点冲突概率从而保证吞吐量最大。同时,在 CTS 帧中增加 DTP 字段,根据节点通信情况自适应调整 CTS 帧和数据帧的发射功率,既可以减小能耗又可以增大空间复用度,从而提高网络吞吐量。

同时,从图 7 和图 8 可以看到,无论 IEEE 802.11 DCF 或是 PCMAC 中吞吐量的变化曲线都存在抖动现象。这是由于每个时隙中有不同数目的节点竞争信道,碰撞是无法避免的,数据传输存在误码的可能会导致数据重发,这些都会导致吞吐量不能稳定在一个不变的值。然而吞吐量的稳定性能可通过调整退避阶数以及优化竞争窗口进行调整,使网络性能更优。

## 5 结 论

文中详细地分析了 802.11 DCF 协议的工作方式及冲突干扰问题,并通过建立数学模型近似得出网络中节点数目与吞吐量的关系,进而提出了基于 DCF 协议的功率控制算法,即 PCMAC 算法,该算法首先自适应调整 CTS 和 DATA 帧的发射功率,然后估算出使网络保持在最大吞吐量的最佳节点接入数目,最后根据最佳节点数目调整 RTS 帧发射功率。仿真表明,在相同网络条件下,PCMAC 的系统吞吐量比 DCF 提高了 7.5

倍左右。该算法也存在不足之处:虽然 PCMAC 提高了网络吞吐量,但是限制了节点数量,对于服务的公平性等其他方面是有损害的。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 陈林,石林祥,孔亮亮. 车辆自组织网络的仿真研究[J]. 上海第二工业大学学报,2013,30(1):6-11.  
CHEN lin,SHI linxiang,KONG Liangliang. Simulation research of Vehicular Ad-hoc NETWORK[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University,2013,30(1),6-11.
- [ 2 ] Tseng Y C, Hsu C S, Hsieh T Y. Power-saving protocols for IEEE 802.11-based multi-hop Ad Hoc networks[J]. Computer Networks,2003,43(3):317-337.
- [ 3 ] Pursley M B,Russell H B,Wysocarski J S. Energy-efficient transmission and routing protocols for wireless multiple-hop networks and spread-spectrum radios[C] // EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security. IEEE/AFCEA. IEEE,2000:1-5.
- [ 4 ] Gomez J,Campbell A T,Naghshineh M,et al. Conserving transmission power in wireless Ad Hoc networks[C] //Network Protocols,2001. Ninth International Conference on. IEEE,2001:24-34.
- [ 5 ] Dang D N M,Hong C S. A SINR-based transmission power control for MAC protocol in wireless Ad Hoc networks[C] // Communications and Electronics (ICCE),2012 Fourth International Conference on. IEEE,2012:103-107.
- [ 6 ] Jung E S, Vaidya N H. A power control MAC protocol for Ad Hoc networks[C] // Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM,2002:36-47.
- [ 7 ] Cheng L,Shakya R. VANET adaptive power control from realistic propagation and traffic modeling[C] // Radio and Wireless Symposium (RWS),2010 IEEE. IEEE,2010:665-668.
- [ 8 ] Mughal B M,Wagan A A,Hasbullah H. Efficient congestion control in VANET for safety messaging[C] // Information Technology (ITSim),2010 International Symposium in. IEEE,2010,2:654-659.
- [ 9 ] Bianchi G,Tinnirello I. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis[J]. IEEE communications letters,2005,9(8):765-767.
- [ 10 ] 宋军,黄剑,金艳华. IEEE802.11 DCF 及其改进方案性能分析与比较[J]. 重庆大学学报,2009,32(4):458-462.  
SONG Jun,HUANG Jian,JIN Yanhua. Performance analysis and comparison of IEEE 802.11 distributed coordination function and improved schemes[J]. Journal of Chongqing University,2009,32(4):458-462.
- [ 11 ] Wu X, Mukherjee B, Chan S H G. Maca-an efficient channel allocation scheme in cellular networks[C] // Global Telecommunications Conference,2000. GLOBECOM'00. IEEE. IEEE,2000,3:1385-1389.
- [ 12 ] 朱颖. Ad Hoc 网络中 QoS 关键技术的研究 [D]. 北京:北京邮电大学信息工程学院,2008.
- [ 13 ] Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless Ad Hoc networks[C] // INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. IEEE,2003,1:470-480.
- [ 14 ] Dang D N M, Van Nguyen M, Hong C S, et al. An energy efficient multi-channel mac protocol for wireless Ad Hoc networks[C] //Global Communications Conference (GLOBECOM),2012 IEEE. IEEE,2012:433-438.
- [ 15 ] Muqattash A,Krunz M. POWMAC:a single-channel power-control protocol for throughput enhancement in wireless Ad Hoc networks[J]. Selected Areas in Communications,IEEE Journal on,2005,23(5):1067-1084.
- [ 16 ] 党小超,牛刚. Ad Hoc 网络中的动态反馈功率控制方法[J]. 计算机工程与应用,2012,38(12):89-91.  
DANG Xiaochao,NIU Gang. Dynamic feedback power control method in Ad Hoc network[J]. Computer Engineering and Applications,2012,38(12):89-91.
- [ 17 ] 唐奎,刘改霞,钟汶娟,等. 移动 Ad Hoc 网络多参数加权分簇算法[J].重庆大学学报版,2014,37(2):106-112.  
TANG Tao,LIU Gaixia,ZHONG Wenjuan,et al. A multi-parameter weighted clustering algorithm for mobile Ad Hoc networks[J]. Journal of Chongqing University,2014,37(2):106-112.
- [ 18 ] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. Selected Areas in Communications,IEEE,2000,18(3):535-547.
- [ 19 ] 雷磊,许宗泽,蔡维玲. 基于定长时隙的多跳 Ad Hoc 网络 DCF 协议马尔可夫链模型[J]. 软件学报,2010,21(3):564-574.  
LEI Lei,XU Zongze,CAI Weiling. Markov model of DCF protocol based on fixed slot in multi-hop ad hoc networks[J]. Journal of Software,2010,21(3):564-574.
- [ 20 ] 毛建兵,毛玉明,冷哇鹏. 一种提高 IEEE 802.11 吞吐量和公平性的自适应优化算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(11):2731-2737.  
MAO Jianbin,MAO Yuming,LENG Supeng. An adaptive optimization scheme for IEEE 802.11 to improve throughput and fairness performance[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2009,31(11):2731-2737.