

## 一种用于无线网格骨干网的基于控制帧的功率控制 MAC 协议<sup>①</sup>

税国军<sup>②</sup> 沈树群

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

**摘 要** 针对无线网格骨干网中采用相同的发射频率造成严重信号干扰的问题,提出了一种新的功率控制 MAC 协议。该协议通过控制接收节点发送控制帧的功率,使得对整个数据发送和接收过程真正产生干扰的节点能够正确接收到该控制帧,从而延迟发送过程,避免信号干扰。该协议能够有效提高无线网格骨干网中无线接入点的空间复用度。理论分析表明,无线接入点的空间距离越短,空间复用度提高率越高。模拟试验表明,与 IEEE802.11 标准的 MAC 协议相比,该协议明显提高了网络中并行的互不干扰的数据发送过程数量,显著提高了整个网络的吞吐量。

**关键词** 无线网格骨干网络, 功率控制, 控制帧, MAC 协议, 空间复用度

### 0 引 言

在无线网格网络(wireless mesh networks, WMN)<sup>[1,2]</sup>中,无线接入点(access point, AP)还具有路由器的功能,能够相互间转发数据分组。移动客户端通过邻近的无线接入点进行数据分组的接收和发送。无线接入点从移动客户端接收数据分组后通过无线传输方式转发到相邻的无线接入点,数据分组在接入点间转发直到到达目的节点,或者通过网关接入到 Internet。无线网格网络中所有接入点的位置都是固定不动的,由它们组成了无线网格骨干网。无线网格网络所面临的最大的问题是网络规模有限,只能应用于小型或者中型网络中。主要原因是接入点间采用了相同无线频率进行通信,接入点可能会受到邻居节点非常严重的信号干扰,导致接收到的数据分组出错或者数据分组丢失。

研究无线网格骨干网络的研究功率控制的目的是通过调整接入节点的发射功率,减少对邻居节点的干扰,提高信道的空间复用度,提高网络的吞吐量。为了实现这一目的,很多文献在改进媒体接入控制(MAC)协议方面进行了探讨。文献[3]提出了功率感知路由优化(power-aware routing optimization, PARO)协议,后被称为 BASIC 协议。在 PARO 协议中,请求发送(request to send, RTS)控制分组和允许

发送(clear to send, CTS)控制分组使用最大功率发送,而数据分组 DATA 和应答分组 ACK 的发送功率大小则使用所需要最小发送功率。然而,该协议会导致节点侦听不到 DATA/ACK 的传输,从而与正在发送的 DATA/ACK 发生冲突。在这种环境下,隐终端问题变得比较严重。为了解决 BASIC 协议中的隐终端问题,文献[4]提出了功率控制 MAC(power control MAC, PCM)协议。PCM 与 BASIC 的方法相似。唯一不同的是,PCM 机制在节点发送 DATA 时,周期性地将发射功率增加到最大,使得邻居节点能够侦听到 DATA 信号,从而延迟发送,避免冲突。PCM 协议有效地解决了 BASIC 协议中的隐终端问题,但在提高信道利用率和网络吞吐量方面并没有改进。文献[5,6]提出了统一功率(common power, COMPOW)协议。COMPOW 是在网络中寻找一个能保证各节点互相联通的情况下的最低发射功率。它通过比较各个路由代理最后得到的全网拓扑图,取其中发射功率最小且所形成的网络拓扑结构和以最大发射功率所得的网络拓扑结构一致的发射功率作为全网的统一发射功率。COMPOW 的问题在于,它仍然在全网内使用统一的发射功率,而不是针对不同发射距离自适应地调整发射功率,因此还是会引引起不必要的信道干扰。此外,COMPOW 的多个路由代理在探测网络时会给网络带来大量的额外开销。文献[7]将原始信道划分为多个子信道,并在不同的

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(60632030)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1973 年生,博士生,工程师;研究方向:无线 Mesh 网络,无线自组网等;联系人, E-mail: shuigi@cnnic.cn  
(收稿日期:2008-02-02)

子信道上分别传输数据分组和控制分组,对于不同的目的节点使用不同的发射功率。但是,仍然采用最大发射功率发射 RTS 和 CTS 控制分组,这会带来不必要的信道干扰。

本文提出了一种新的基于 CTS 分组的功率控制(CTS power controlled, CTSPC)MAC 协议。文献[3, 4]提出的功率控制 MAC 协议利用 RTS 和 CTS 的最大功率来调整 DATA 和 ACK 的发送功率,而 CTSPC 协议则不同,CTS 分组的发送功率大小是基于接收到的 RTS 分组的接收功率进行调整的,这样,只有那些真正对接收节点造成信号干扰的节点才会收到 CTS 分组,从而延迟接入信道,避免由于这些干扰节点的发送造成对接收节点的信号干扰。本文首先采用理论推导的方法论证了该协议的可行性,最后用试验仿真结果进一步证明了该协议的正确性。

## 1 协议设计

### 1.1 相关术语

为了方便以后的描述,先定义以下常用术语:

传输范围(transmission range, TR):在传输范围内的节点能正确接收到来自发送节点的分组。

载波监听范围(carrier sense range, CSR):载波监听范围内的节点能够监听到发送节点的发送过程,通常是传输范围 TR 的两倍左右。如果载波监听范围 CSR 内的节点不在传输范围 TR 内,虽然能够监听到发送过程,但不能正确接收到分组。

干扰范围(interference range, IR):指接收节点受到其它发送节点的干扰而导致接收数据分组丢失的范围,该参数不是一个确定值,取决于发送节点和接收节点之间的距离。

接收节点要正确接收数据分组,最小的接收功率必须大于接收功率门限,用  $RX_{Thresh}$  表示。对应的范围定义为传输范围 TR。 $CSR_{Thresh}$  用于节点判断信道是否忙,本文用载波监听范围 CSR 来表示。在 NS-2 仿真器中,TR 和 CSR 是固定的,分别为 250m 和 550m。在 IEEE802.11 标准中,TR 的最大值为在室外自由空间情况下,取值 300m。

### 1.2 空间复用度分析

根据双径传播模型(two-ray ground reflection model),电波在自由空间传播时,接收端的功率为

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{d^4 L} \quad (1)$$

式中,  $P_t$  为发送端天线发射功率;  $G_t, G_r$  分别为发

射天线、接收天线增益;  $\lambda = h_t h_r$ ,  $h_t$  为发射天线高度,  $h_r$  为接收天线高度;  $d$  为发射端与接收端的距离;  $L$  为系统损耗因子,  $L \geq 1$ 。

数据分组要被正确接收,除了接收功率必须大于接收功率门限  $RX_{Thresh}$  外,信噪比(signal to noise ratio, SNR)也必须大于门限值  $SNR_{Thresh}$ 。在 NS-2 仿真器中,门限值  $SNR_{Thresh}$  为 10。接收信号功率用  $P_r$  表示,干扰信号功率用  $P_i$  表示,发送节点和接收节点间的距离用  $d_t$  表示,接收节点和发送干扰信号的节点间的距离用  $d_i$  表示。忽略噪声干扰,由公式(1)得

$$SNR = \frac{P_r}{P_i} = \left(\frac{d_i}{d_t}\right)^4 \geq SNR_{Thresh} \quad (2)$$

由公式(2)得

$$IR = d_i = d_t (SNR_{Thresh})^{1/4} = 1.78 d_t \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,干扰范围 IR 与发送距离  $d_t$  成线性关系,随  $d_t$  的减小而线性减小。由公式(3)可求得干扰范围的空间区域面积为

$$S_{IR} = \pi (IR)^2 = \pi (1.78 d_t)^2 \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,以接收节点为中心,半径为 IR 的圆形区域面积内  $S_{IR}$  的所有节点都将对接收节点产生干扰,在接收节点接收信号期间不能发送数据。也就是说在此区域内的节点必须抑制发送过程。

当采用最大功率发送时,载波监听范围 CSR 为 550m,干扰范围的空间区域面积为

$$S_{CSR} = \pi (550)^2 \quad (5)$$

从公式(5)可以看出,当采用最大功率发送数据时,以接收节点为中心,半径为 CSR 的圆形区域面积内  $S_{CSR}$  的所有节点都将对接收节点产生干扰,在接收节点接收信号期间不能发送数据。也就是说在此区域内的节点必须抑制发送过程。

根据空间复用度的概念,被抑制的发送节点数目越少,空间复用度越大。由公式(4)、(5)求得空间复用度提高率为

$$\frac{S_{CSR}}{S_{IR}} = \left(\frac{550}{1.78 d_t}\right)^2 \quad (6)$$

式中,  $0 < d_t \leq TR = 250$ 。

由公式(6)可得到发送距离与空间复用提高率之间的关系图(如图 1 所示)。从图中可以看出,当发送节点和接收节点之间的距离(传输距离  $d_t$ )小于 300m 时,采用 CTSPC 协议可以提高空间复用度,而且,空间复用度提高率随传输距离  $d_t$  的减小而增大。这是因为传输距离越小,所需的发送功率就越

小,对邻节点的干扰就越小。因此,当无线接入点分布密度大,节点间的传输距离较小(当小于 250m 时,空间复用度提高率大于 2)时,使用 CTSPC 协议将更有利。

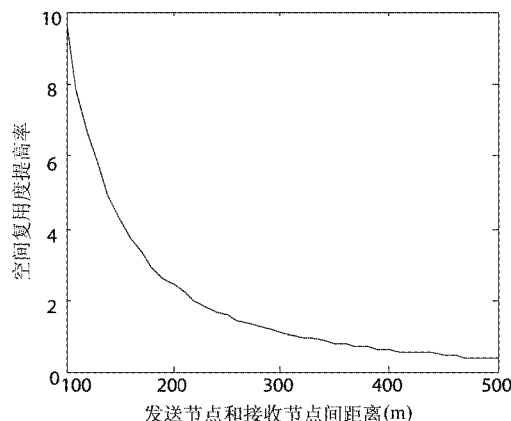


图 1 发送距离与空间复用度提高率关系图

按照 IEEE802.11 标准规定,室外的最大传输距离为 300m,因此,以上空间复用度分析所得出的结果也是符合 IEEE802.11 标准相关规定的。

## 2 协议的实现

### 2.1 协议模型

CTSPC 协议仍然采用基于 RTS/CTS 机制的虚拟载波监听技术。在 RTS 和 CTS 分组中,携带了该次发送过程将要占用信道时长的信息。该信息能被正在侦听信道的其它终端读取,并用其对网络分配矢量(network assignment vector, NAV)进行更新。NAV 中包含了信道将持续忙的时间信息。因此,只要终端监听到 RTS 或者 CTS 分组的任意一个,它便能在发送前进行合理的延迟,从而有效地避免冲突。

为了通知干扰范围  $IR$  内的发送节点延迟发送,避免对接收节点的干扰,利用虚拟载波监听过程中的 CTS 帧来实现。为了能够保证干扰范围  $IR$  内的所有发送干扰信号的节点都可以正确接收到 CTS 帧。下面将推导出发送 CTS 帧的最小发送功率  $P_{cts}$  的公式。

当接收节点收到发送节点发送的 RTS 帧时,在接收节点处,可由公式(1)得到。下面的计算 RTS 帧的接收功率的公式:

$$P_{rts} = P_r(d_t) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{d_t^4 L} \quad (7)$$

由此,可得到发送节点和接收节点间的距离为

$$d_t = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{P_{rts} L} \right)^{1/4} \quad (8)$$

由公式(3)和公式(8),得干扰范围  $IR$  为

$$IR = \left( SNR_{Thresh} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{P_{rts} L} \right)^{1/4} \quad (9)$$

为了保证干扰范围  $IR$  内 CTS 帧的接收功率大于接收功率门限值  $RX_{Thresh}$ , 由公式(1)得

$$P_r(IR) = \frac{P_{cts} G_t G_r \lambda^2}{(IR)^4 L} \geq RX_{Thresh} \quad (10)$$

由公式(10),得 CTS 帧的发送功率  $P_{cts}$  下述公式:

$$P_{cts} \geq P_t \left( \frac{RX_{Thresh}}{P_{rts}} \right) SNR_{Thresh} \quad (11)$$

式中,  $P_t$  是用于发送 RTS、DATA、ACK 帧的缺省功率,门限值  $RX_{Thresh}$  和  $SNR_{Thresh}$  已知并取确定的数值。因此,根据 RTS 的接收功率就可以计算出 CTS 的最小发送功率。

### 2.2 协议描述

采用基于 RTS/CTS 控制帧的虚拟载波监听技术,数据分组的发送过程包括 RTS-CTS-DATA-ACK 四次握手。为了避免 DATA 帧和 ACK 帧的碰撞, DATA 帧必须被分割成更小的 DATA 帧来发送。假设发送节点进行信道竞争后,成功接入信道开始发送过程。CTSPC 协议的运行过程如下:

(1) RTS 帧携带了数据分组整个发送过程占用信道的时长信息。然而,只有那些正确接收到 RTS 帧的节点才能根据取得的时间值来更新网络分配矢量 NAV, 不能正确接收 RTS 帧或者不能侦听到 RTS 帧的节点网络分配矢量 NAV 保持不变。

(2) 接收节点正确接收到 RTS 帧后开始发送 CTS 帧,CTS 帧携带了从 RTS 帧中取得的信道预留时长值。而 CTS 帧的发送功率根据公式(11)计算得到。

(3) 接收到 CTS 帧的节点利用 CTS 帧携带的信道预留时长值来设置各自的网络分配矢量 NAV。这样,接收到 CTS 帧的节点在此期间将延迟发送过程,避免干扰接收节点正在进行的数据分组的接收过程。

(4) 发送节点接收到 CTS 帧后就开始向接收节点发送 DATA 帧。

(5) 接收节点收到 DATA 帧后向发送节点发送 ACK 帧。

## 3 协议性能分析

我们用 NS-2 仿真工具对 CTSPC 协议和 802.11

标准 MAC 协议进行了模拟比较。模拟场景是一个边长为  $L$  的正方形,一共有  $32 \times 32 = 1024$  个无线接入点,位置固定。

### 3.1 模拟模型

无线接入点的布置按两种方式排列。第一种方式是 1024 个节点按方正排列,在垂直方向和水平方向上,相邻节点的距离相等,本文称之为节点空间距离(node space distance, NSD)。因为发送节点和接收节点间的距离决定了 CTSPC 协议的性能,因此该参数非常重要,本文将在 50 ~ 250m 之间进行取值。模拟场景是边长  $L(= 32) \times NSD$  的正方形。第二种情况是 1024 个节点随机分布在相同大小的正方形区域中。

假设节点的业务模式为随机业务模式,在这种情况下,节点首先通过比较到每个节点的距离来建立邻居列表。如果距离小于传输距离  $TR$  ( $TR = 250\text{m}$ ),那么就将该节点加入邻居列表中。邻居节点列表建立完成后,就从列表中随机选择一个节点作为目的节点进行发送。该发送过程在初始化之前先进行信道监听,看是否会干扰其它正在进行的发送过程。

为了验证业务负载对 CTSPC 协议性能的影响程度,本文采用不同的业务负载进行模拟,并设定节点空间距离为 100m。业务负载是指要求发送的节点占总节点的比例,取值为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1。

为了验证 CTSPC 协议能有效提高空间复用度,利用上述的模拟模型,计算在同一时刻最多允许同时存在的数据发送和接收过程数量(并行通信数量)而不会造成各节点间信号的干扰。并行通信数量越大,表明空间复用度越大,网络的容量和吞吐量就越大,MAC 协议的性能就越优越。

### 3.2 模拟结果分析

模拟结果如图 2 ~ 图 5 所示。在模拟过程中,每种情况都执行 10 次仿真过程,模拟结果取 10 次的平均值。

图 2 给出了分别采用了 CTSPC 协议和 802.11 标准 MAC 协议,当节点按  $32 \times 32$  方正排列时允许同时存在的发送过程数量。无线接入点间的空间距离越大,相互间的信号干扰就越小,并行发送过程数目就越大。当无线接入点按方正排列时,CTSPC 协议的空间复用度大于 802.11 标准 MAC 协议,性能更优。图 3 为无线接入点随机分布的情况,可以看出,即使节点随机分布,CTSPC 协议的性能仍然优于 802.11 标准 MAC 协议。

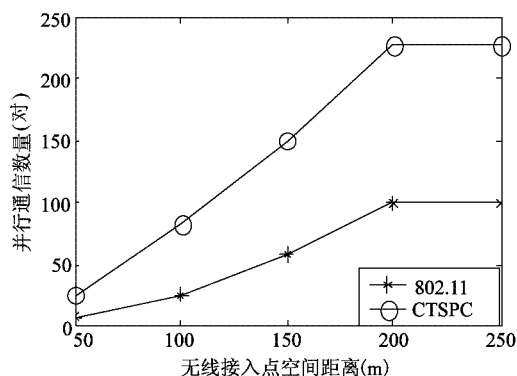


图 2 无线接入点按方正排列

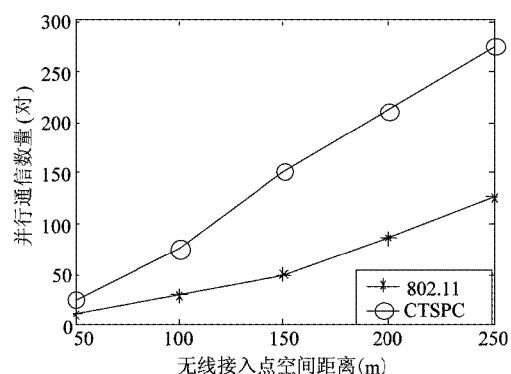


图 3 无线接入点随机排列

图 4 是在无线接入点按方正排列时, CTSPC 协议和 802.11 标准 MAC 协议在不同的业务负载下最多允许同时存在的通信节点对的数目。从图中可以看出,随着业务负载的增加,并行通信数量也增加,而且 PCCTS 协议优于 802.11 协议。图 5 为无线接入点随机分布的情况。

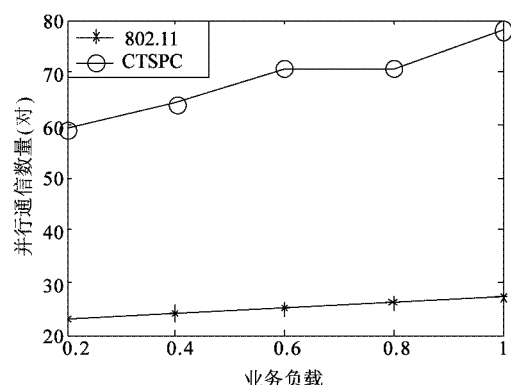


图 4 无线接入点按方正排列

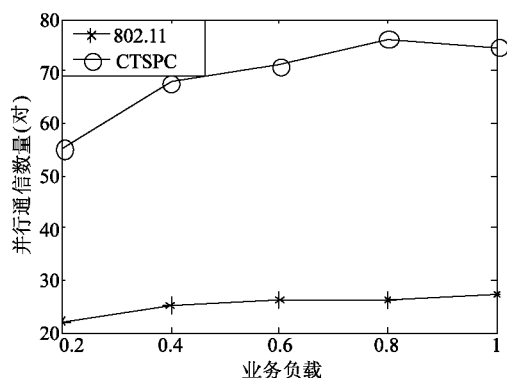


图 5 无线接入点随机排列

## 4 结 论

本文提出的基于 CTS 控制帧的功率控制 MAC 协议——CTSPC 协议,能够有效提高无线网格骨干网络的吞吐量。在 CTSPC 协议中,接收节点通过接收到的 RTS 控制帧的接收功率来计算发送 CTS 控制帧所需要的功率,使得 CTS 控制帧除了能被发送节点接收到外,仅仅被那些真正会对整个数据发送接收过程产生干扰的节点正确接收,这些干扰节点就可以延迟发送,保证接收节点的正确接收。同时,通过功率控制协议 CTSPC,无线接入点的空间复用度提高了,网络中并行的通信过程增加了。因此,CTSPC 协议能显著提高无线网格骨干网络的吞吐量。

## 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(9): 23-30
- [2] 傲丹, 方旭明, 马忠建. 无线网格网关键技术及其应用. 电讯技术, 2005, 45(2): 16-22
- [3] Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, et al. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Network Protocols (ICNP 2001)*, Washington D C, USA, 2001. 24-34
- [4] Jung E S, Vaidya N H. A power control MAC protocol for ad hoc networks. In: *Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002)*, Atlanta, USA, 2002. 36-47
- [5] Kawadia V, Narayanaswamy S, Rozovsky R. Protocols for media access control and power control in wireless networks. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA, 2001. 1935-1940
- [6] Narayanaswamy S, Kawadia V, Sreenivas RS. Power control in ad-hoc networks: theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. In: *Proceedings of the European Wireless Conference*, Florence, Italy, 2002. 156-162
- [7] Muqattash A, Krunz M. Power controlled dual channel (PCDC) medium access protocol for wireless ad hoc networks. In: *Proceedings of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, San Francisco, USA, 2003. 470-480

# A power control MAC protocol based on CTS control frame for wireless mesh backbone networks

Shui Guojun, Shen Shuqun

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

## Abstract

To solve the problem of serious signal interferences in wireless mesh backbone networks caused by access points' usage of the same frequency channel for transmitting packets, this paper proposes a new power control MAC protocol. This protocol can control the transmitted power of the control frame sent by receiving nodes, so only those neighboring access points that really affect the forthcoming data reception can receive the control frame, thus delaying their transmission to avoid interferences. The proposed protocol can effectively improve the spatial reuse of access points in wireless mesh backbone networks. The theoretical analysis shows that the spatial reuse is improved more greatly when the distance between access points gets more shorter. The simulation studies show that compared with the IEEE802.11 standard MAC protocol, this protocol allows more concurrent transmission in the networks, and it improves the network throughput greatly.

**Key words:** wireless mesh backbone networks, power control, control frame, MAC protocol, spatial reuse