

无线 Mesh 网络 MAC 层 DCF 机制的研究及改进*

周杰英, 张 康, 蔡冬者, 胡惠平
(中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 无线 Mesh 网络传统的 IEEE 802.11 接入控制协议 DCF (Distributed Coordination Function) 不能有效解决公平传输问题, 提出了一种基于接入公平性的自适应分布式协调机制 ADCF (Adaptive Distributed Coordination Function, ADCF), 根据节点的实时状态, 设计了节点在初始竞争, 成功发送数据后和发生冲突时的退避算法, 动态地调整了节点在不同状态时的信道获取能力, 提高了节点发送数据的公平性和网络的吞吐率。最后用 NS-2 进行仿真表明, ADCF 机制能显著提高节点发送数据的公平性, 增大网络的吞吐率以及减小数据包的平均端到端时延。

关键词: DCF 机制; 二进制指数退避; 竞争窗口; 公平性; 无线 Mesh 网络

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 06-0007-05

Research and Implementation of DCF Mechanism in MAC Layer in Wireless Mesh Networks

ZHOU Jieying, ZHANG Kang, CAI Dongzhe, HU Huiping

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To cope with the deficiency that the IEEE 802.11 DCF in wireless mesh networks deploys all the nodes in the same way and cannot dynamically adjust their contention windows according to their real time status, the authors divides contention window into initial contention window, successfully sent window and conflict contention window. This scheme designs three different back off algorithms for the different windows so that dynamically adjusts the ability of nodes to accessing channel in different status and improves the fairness and throughput of network.

Key words: DCF mechanism; binary exponential backoff; contention window; fairness; Wireless Mesh Network

无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Networks, WMNs) 是一种高容量高速率的新型网络结构, 它融合了无线局域网和 Ad hoc 网络的特点, 具有组网简单方便, 高带宽, 多跳和可扩展等优点。

IEEE802.11 MAC 协议是 IEEE 组织为无线局域网制定的规范, 然而目前被无线 Mesh 网的各种测试床和仿真广泛应用, 成为无线 Mesh 网 MAC 层的事实标准^[1]。IEEE802.11 MAC 协议用于无线 Mesh 网, 存在隐藏终端、暴露终端以及公平性等问题^[2-3]。其中隐藏终端和暴露终端是由无线自组

网多跳共享广播信道引起的, 降低了信道利用率, 影响了网络吞吐量。公平性问题是 IEEE802.11 MAC 协议采用二进制指数退避算法引起的, 导致节点信道接入机会不等^[4-7]。已有的研究成果表明, 现有的 MAC 协议、路由协议以及传输协议等应用于 WMN 时, 所能达到的传输性能还远不能满足用户的需求。因此改进现有协议以适应 WMN 的特征, 从而提高 WMN 中的传输性能具有重要的意义。对现有协议的改进其中一个方向便是根据某项性能需

* 收稿日期: 2011-01-19

基金项目: 广州市科技计划资助项目 (2010J-D00331); 中山大学实验室开放基金资助项目 (KF201017)

作者简介: 周杰英 (1966 年生), 女, 博士, 副教授; E-mail: isszjy@mail.sysu.edu.cn

要来改进 MAC 协议^[8-9], 另外则是改进 IEEE802.11 MAC 协议所采用的二进制退避算法^[10-11]。

1 DCF 协议二进制指数退避算法的改进

1.1 802.11 DCF 协议的分析

MAC 协议就是定义以一定的顺序和有效的方式分配节点访问介质的规则。在现有的接入网中, 802.11 多采用分布式协调功能 (DCF: distributed coordination function) 让节点以竞争的方式来共享共同的信道。

一个合理设计的信道接入协议应该对共享信道的所有站点提供公平的接入服务, 或者说, 尽量对绝大多数站点提供比较公平的服务。802.11 DCF 通过其核心退避算法——二进制指数退避 (Binary Exponential Back-off, BEB) 调节节点的竞争窗口 (Contention Window, CW), 从而达到调节节点竞争信道的目的。BEB 算法在任何情况下都采用了相同的处理方式——发送成功就返回到初始值 CW_{\min} , 发送失败就加倍直到最大值为止。这种无视当前网络实际情况的算法会导致网络性能的低下。当网络负载很小时, 大的竞争窗口可能会导致信道不必要的空闲; 相反, 当网络负载很大时, 小的竞争窗口可能会导致更多的冲突和退避。在这两种情况下, 信道都没有得到充分有效的利用。

总的来说, BEB 存在如下缺陷: ①每个节点的初始竞争窗口相同, 当节点都要发送数据时, 这就增大了节点发生冲突的概率。②当一次交互成功后, 退避计数器值就降到最小值, 在某一小段时间内, 它总是有利于前一次成功发送的节点短时间内再次竞争到信道, 其他节点因为抢不到信道而被“饿死”, 从而造成短程不公平性, 并导致报文发送时延的大范围抖动, 不能正确反映信道的竞争状况。网络中的竞争节点越多, 介质访问延迟越大; 当网络中的竞争节点数固定时, 介质访问延迟的大小与初始竞争窗口的设置有很大关系, 对于不同的网络节点数, 存在一个最优的初始竞争窗口大小, 使对应的介质访问延迟最小, 节点数越大时这个关系越明显。

1.2 退避进程算法的实现

本文通过改进节点退避机制来控制节点的资源获取能力, 从而实现资源公平分配。针对无线 Mesh 网络中流量在空间分布的不均匀性, 我们给每一个节点赋予一定的权值。一般情况下, 权值可以表征该节点承担的通信节点数量。当节点发送能力与权重成正比时, 数据流可以在网络内平稳流

动, 从而消除网络瓶颈造成的数据包丢弃以及无线网络资源的浪费。本文定义了新的竞争窗口机制来实现不同节点对无线资源的获取能力。网络中的任何一个节点可能存在三种竞争窗口值, 分别是: 初始竞争窗口、成功发送窗口和冲突窗口。这三种窗口分别对应节点发送数据的不同状态, 由 ADCF 对节点进行划分。下面对三种状态的处理进程进行详细说明。

1.2.1 初始竞争的处理进程 节点初始时的竞争窗口值为: $IW_i = \frac{AF_0}{W_{oi}}$ 。式中, IW_i 为节点 i 初始竞争窗口值, IW_i 的值采用四舍五入方法转换成整数, AF_0 为基本退避时间, W_{oi} 为节点 i 的初始权重, 我们定义为节点 i 的邻居节点数。节点的路由表中含有该节点的邻居。当节点邻居很多时, 权重就越大, 更容易获取发送数据的机会。当相邻节点权重 W_{oi} 相同时, IW_i 相同, 冲突不可避免。为了防止具有相同权重的节点发生碰撞, 令节点实际选择的回退时间为

$$RIW_i = \max (CW_{\min}, \rho \times IW_i) = \max (CW_{\min}, \rho \times \frac{AF_0}{W_i})$$

其中, ρ 是 $[0.9, 1.1]$ 间的随机数, CW_{\min} 为系统定义的最小竞争窗口值。则节点实际退避时间为: $BT = \text{Random} (0, RIW_i) \times \text{SlotTime}$ 。其中, BT 为节点实际退避时间, SlotTime 为一个时间片的时间, $\text{Random} (0, RIW_i)$ 是产生一个介于 0 和 RIW_i 间随机数的函数。

1.2.2 数据成功发送的处理进程 节点发送数据分组成功后竞争窗口值调整为: $SW_i = \frac{AF_i}{W_i}$, 式中, SW_i 为节点 i 成功发送数据分组后的竞争窗口值, AF_i 为节点 i 竞争窗口自适应调节因子, 各节点的 AF_i 初始值是一样的, 为 AF_0 。 W_i 表征节点 i 的权重, 在这里我们定义为与节点 i 发生冲突的节点个数, 可通过侦听到的来自不同源节点的 RTS 个数来定。若节点未侦听到任何 RTS 包, 则说明该节点没有数据包需要接收或转发, 为了不使程序运行发生错误, 令 W_i 为 1。这里, SW_i 的值采用四舍五入方法变成整数, 则节点实际退避时间为

$$BT = \text{Random} (0, SW_i) \times a\text{SlotTime}$$

1.2.3 数据发生冲突的处理进程 数据分组发生冲突以后竞争窗口的大小为: $CW_i = \min (CW_{\max}, AF_0 \times (2^{\text{counter}_i} - 1))$ 。这里, CW_{\max} 为系统定义的最大竞争窗口, 初始值为 AF_0 为基本退避时间,

counter_i 为节点 *i* 的重发计数器。节点实际回退时间计数器值是 (0, CW_i) 间的随机数为

$$BT = \text{Random}(0, CW_i) \times \text{SlotTime}$$

我们知道, 在 IEEE 802.11 系统中, 对于 RTS、CTS、DATA 以及 ACK 各帧的重发有不同的次数限制, 这里短帧 (帧长 < RTSThreshold) 和长帧 (帧长 > RTSThreshold) 的重发计数器分别用 SSRC 和 SLRC 来计数。初始值均为 0, SRC 最大值为 7, SLRC 最大值为 4。当节点发生碰撞后, counter_i 值加 1, CW_i 值则指数增加以避免再次碰撞。当竞争窗口增大到最大值 CW_{max} 时, 以后发生冲突只将 counter_i 值加 1, 若累加至最大值仍未获得信道, 则将包丢弃, 然后将 counter_i 值设为 0, 节点的竞争窗口变为成功发送窗口 SW_i。

这种设置可以使得节点的数据发送能力在竞争窗口的设置上得到体现。节点可以按权重比例获得当前冲突范围内的无线资源。

1.3 自适应调节机制

上面阐述的退避方法使在一个冲突范围内的节点能很好地按比例分享无线资源, 但是, 在无线 Mesh 网络里, 节点分布较广, 并不在同一个冲突范围内, 节点间对于无线资源的争夺也比较复杂。因此, 我们对每一个节点设置了调节因子 AF_i , 用来调节节点对无线资源的获取能力。

本文根据节点的信道占用率来自适应调节节点竞争窗口的大小, 每个节点统计自身占用信道时间 T_i , 同时统计监听到的所有其他邻居的信道占用时间之和 T_o , 节点信道占用率 β 的计算公式为: $\beta = T_i/T_o$ 。 β 值的大小说明了节点竞争信道的能力, 同时也表征了节点占用信道时间的长短。 β 值越大, 说明节点自身占用信道的时间比较长, β 越小, 则说明节点自身占用信道时间短。现为每个节点定义一个常量阈值 C ($C \geq 1$, 且为浮点数), 每个节点的阈值可不相同, 根据节点在 Mesh 网络中的功能不同而分别设置。比如: Mesh 网关节点由于与互联网直接相连, 需要通过互联网的数据分组均要通过它来转发, 所以数据流量很大, 通常会成为瓶颈节点, 其常量阈值 C 就应该设置得大一些; Mesh 路由器节点也要参与部分数据分组的转发, 所以其常量阈值 C 也应该设置得大一些, 但应比 Mesh 网关节点的常量阈值要小; 而一般的 Mesh 终端节点不需要转发数据分组, 所以其常量阈值 C 应该设置得小一些。这样每个节点都可以根据实际情况调整, 具体调节方法如下:

$$\text{当 } \beta \geq C \text{ 时, } AF_i = (1 + \alpha) AF_i;$$

当 $C > \beta > 1/C$ 时, $AF_i = AF_i$, 即 AF_i 值保持不变;

$$\text{当 } \beta \leq C \text{ 时, } AF_i = (1 - \alpha) AF_i。$$

α 为调节因子 ($0 < \alpha < 1$), α 的取值大小直接影响着网络调节速度和精度, 当 α 过大时, 网络调节速度较快, 但精度较差, 节点吞吐量易发生较大波动; α 取值过小则调节速度较慢, 在网络拥塞时需要较长时间才可以到达稳定状态, 但调节的精度较好。根据节点的信道占用率来动态的调节 AF_i 值, 进而调整竞争窗口的大小。当节点的信道占用率超过阈值时, 则适当增大 AF_i 值, 将自己的竞争窗口拉大, 抑制该节点的竞争能力, 提高其他节点竞争信道的机会; 当节点的信道占用率低于某阈值时, 则适当减少 AF_i 值, 将自己的竞争窗口减小, 提高自己的竞争能力; 若节点的信道占用率处于合理的范围内, 则 AF_i 值不做任何改变, 这样就改善了各节点占用信道的公平性。需要说明的是, AF_i 的值若为小数, 则采用四舍五入方法转换成整数, 而且对 AF_i 的调节不能使竞争窗口超过 (CW_{\min} , CW_{\max}) 范围。

2 仿真设计与结果分析

2.1 仿真参数设置及性能评估参数说明

为了评价本文提出的改进的竞争窗口设置以及竞争窗口的调解机制的 DCF 协议性能, 我们在 NS-2 (Network Simulator) 仿真软件上对本文所提出的 ADCF 协议与原 DCF 协议进行了性能对比和分析。我们设计了仿真场景: 网络中有 50 个无线节点, 节点拓扑产生且分布在 [1 000 m * 1 000 m] 的区域内, 所有节点的通信范围均为 250 m。仿真的业务类型为恒定比特率 (CBR) 业务, 传输层协议采用 UDP, 最大连接数为 20, 数据分组大小为 512 字节, 仿真时间为 100 s。本文中选取公平性 (Fairness)、吞吐率 (Throughput)、端到端平均时延 (Average delay) 来反映协议的工作性能。

1) 公平性的定义^[4] 如下: $\text{Fairness} = \frac{(\sum_f \text{Thr}_f)^2}{N \times \sum_f \text{Thr}_f^2}$ 。其中, Thr_f 代表单个连接的吞吐率, N 代表连接的总数。公平性指标越大说明流的公平性就越高。其值分布在 0 ~ 1 之间, 值为 1 说明有 100% 的吞吐率公平性, 即每个连接的吞吐率一样。

2) 吞吐率 (Throughput), 吞吐率计算的是网络内所有节点在仿真时间内的平均吞吐率, 即统计在仿真时间内收到所有数据包的大小总合除以总的仿真时间。吞吐率越大, 说明节点每秒传输数据包

越多, 网络性能就越好。

3) 端到端平均时延 (Average delay) 端到端平均时延计算的是网络内节点传输一个数据包所需的平均时间。首先在 trace 文件中提取所有源节点由应用层发包的时间以及目的节点在应用层收包之间的时间, 求出时间间隔的总合然后除以所传输的数据包个数。平均时延越小, 说明数据包发生冲突次数越少, 网络性能当然越好。

2.2 仿真结果与分析

本实验仿真 50 个节点随机拓扑的情况, 节点拓扑由 setdest 命令随机产生, 节点间的数据流由 cbrgen 命令随机产生。下面考察节点在数据包发送率 (rate) 变化下改进协议 (ADCF) 与原始协议 (DCF) 在公平性 (Fairness)、吞吐率 (Throughput)、平均时延 (Average delay) 这三方面的工作性能。实验结果如图 1 - 图 4 所示。

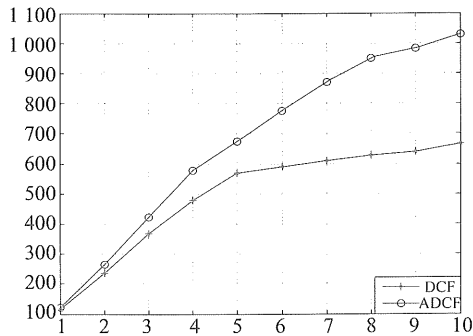


图 1 节点不同发包率下的吞吐率
Fig. 1 Throughput with different packet rate

图 1 是节点最大移动速度为 0.01 m/s 的情况下, DCF 和 ADCF 两种协议的吞吐率根据节点发包速率逐次增加而产生的曲线图。由图可知, ADCF 协议的吞吐率始终高于 DCF 协议的吞吐率, 随着节点发包率的增加, 两种协议的网络吞吐量都在不断增加。当节点发包速率大于 4 packets/s 以后, 网络吞吐量不再线形增加, 增加的趋势变得缓慢, 这是由于节点发包率增加导致网络负载增大, 冲突加剧。从图中还可以看出: 随着节点发包速率的增大, 两种协议的吞吐量差值也在逐渐拉大。

以上是节点最大移动速度为 0.01 m/s 时, 节点在不同发包率情况下两种协议的性能比较, 下面我们将分析节点发包速率 (rate) 不变 (1packet/s), 而节点最大移动速度 (Max speed) 逐渐增加时, 改进协议 (ADCF) 与原始协议 (DCF) 在公平性 (Fairness)、吞吐率 (Throughput) 以及端到端平均时延 (Average delay) 上的工作性能。需要

注意的是, 节点移动为低速运动, 最大也只有 8 m/s, 这是因为 Mesh 网络里面节点的运动很少, 基本处于静止状态。实验结果如图 2 - 图 4 所示。

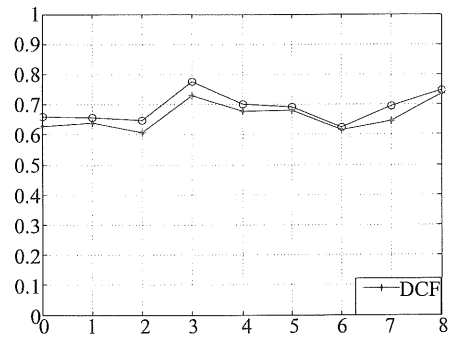


图 2 节点不同最大移动速度下的公平性
Fig. 2 Fairness with different maximum speed

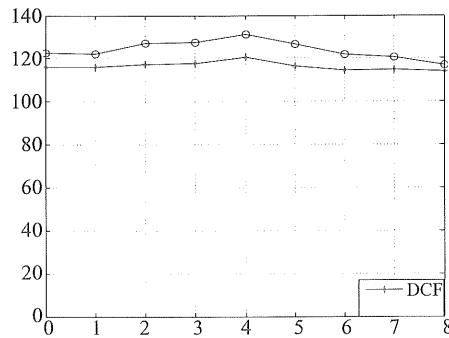


图 3 节点不同最大移动速度下的吞吐率
Fig. 3 Throughput with different maximum speed

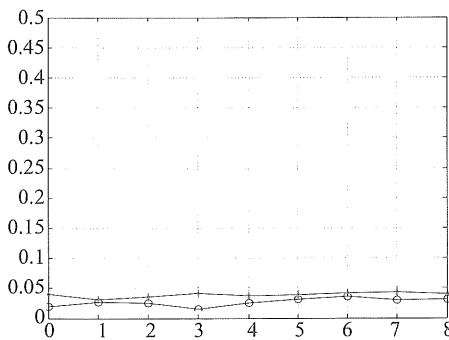


图 4 节点不同最大移动速度下的平均时延
Fig. 4 Average delay with different maximum speed

由图 2 - 图 4 可知: 节点最大移动速度的改变对网络的性能影响较小。如图 2 和图 3 所示, 移动速度的变化使得公平性曲线和吞吐率曲线都有点小波动, 但一直处于平稳状态, 改进协议的优化设计使得节点发包公平性和吞吐率都略高于原始协议, 但差别不大。同样, 节点移动速度的变化对端到端平均时延的影响也甚小, 由图 4 可以看出, 改进协

议 ADCF 的端到端平均时延也是略低于原始 DCF 协议。出现以上现象的原因是节点移动速度小, 网络内节点的拓扑不会发生很大变化, 由于仿真时路由层协议采用的是 AODV (Ad hoc On-demand Distant Vector), 它是一种按需路由协议, 且会将节点最近使用的路由存于路由缓存中, 节点要发送数据时首先在路由缓存中寻找是否有可用路由, 如果没有才发起新的路由请求。节点的拓扑不发生很大变化的时候, 就可以省去路由寻路的时间以及路由请求包和路由回复包所占用的网络资源。

3 结 语

IEEE 802.11 DCF 的改进一直是无线 Mesh 网络研究领域的热点, 而对于节点的退避算法和竞争窗口的改进则是改进 DCF 的重要手段之一。本文首先分析了 BEB 算法的不足, 然后提出了自适应分布式协调机制 ADCF, 详细介绍了该机制的原理和实现。它能够让节点根据自身的实时通信状况, 动态地调整接入信道的能力, 提高节点发送数据的公平性和网络的吞吐量。本文分别考察节点发包率的变化和节点移动速度的变化对协议性能的影响, 仿真结果通过对公平性, 吞吐率以及端到端平均时延的分析比较, 证明了 ADCF 在不增加任何网络开销的情况下, 能够极大得提高无线 Mesh 网络的传输性能。

参考文献:

- [1] IEEE C Committee. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. New York, 1997.
- [2] XU S, SAADAWI T. Revealing the problems with 802.11 MAC protocol in multi-hop wireless Ad Hoc networks [J]. J Computer Networks, 2002, 38(4): 531 - 548.
- [3] TSAI T, CHEN J. IEEE 802.11 MAC protocol over wireless mesh networks: problems and perspectives [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05), 2005.
- [4] JAIN R, BABIC G, NAGENDRA B. Fairness, call establishment latency and other performance metrics [R]. Technical Report, ATM Forum/96 - 1173, ATM Forum Document, 1996.
- [5] WANG Y, BENSOU B. Achieving fairness in IEEE 802.11 DFWMAC with variable packet lengths [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'01), Texas, USA, Nov. 2001, 6: 3588 - 3593.
- [6] OZUGUR T. Optimal MAC-layer fairness in 802.11 networks [C]// Proceedings of IEEE International Communication on Communications (ICC'02). New York, NY, USA, April 28 - May 2, 2002, 2:675 - 681.
- [7] LEE J, YEOM I. Achieving throughput fairness in wireless mesh networks based on IEEE 802.11 [C]//IEEE INFOCOM, 2008.
- [8] 宋靖涛, 张光昭. HFC 的 MAC 协议中随机访问机制性能分析 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1999, 38(3): 25 - 29.
- [9] 王国民, 张光昭, 陈迪平. 无线 ATM 网基于 QoS 的 MAC 层协议 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2000, 39(4): 47 - 51.
- [10] WU C, FENG J, FAN P. On a new queue backoff fair algorithm for ad hoc networks [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT'03), Chengdu, China, Aug. 2003:335 - 339.
- [11] KUPPA S, PRAKASH R. Adaptive IEEE 802.11 DCF scheme with knowledge-based backoff [C]// IEEE Communications Society / WCNC, 2005.