

## Ad hoc 网络中 DCF 公平性分析与改进

雷 磊 许宗泽

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

**摘 要:** 在考虑节点的物理载波检测范围大于通信范围的情况下, 该文分析了多跳 Ad hoc 网络中物理载波检测机制对 IEEE 802.11 DCF 协议公平性的影响。针对载波干扰给 IEEE 802.11 DCF 协议带来的严重不公平问题, 提出了一种基于冲突和干扰感知的退避(CIAB)算法。仿真证明, 该算法能有效地改善 IEEE 802.11 DCF 协议的公平性, 并且没有引起网络吞吐量的严重下降。

**关键词:** Ad hoc 网络; DCF 协议; 公平性; 物理载波检测机制

**中图分类号:** TN915.06

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)02-0472-05

## Analyzing and Improving the DCF Fairness in Ad hoc Network

Lei Lei Xu Zong-ze

(College of Info. Sci. and Tech., Nanjing Univ. of Aeronaut. and Astronaut., Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, the impact of physical carrier-sense mechanism on the fairness of the IEEE 802.11DCF MAC protocol in multi-hop Ad hoc networks is investigated, considering that physical carrier-sense range is much larger than communication range. This paper discovers that the IEEE 802.11 DCF MAC protocol may suffers from a great fairness problem because of the carrier interference. To solve this problem, a Collisions and Interferences Aware Backoff (CIAB) algorithm is then proposed. Simulation results show that this algorithm can greatly improve the fairness of the IEEE 802.11 DCF MAC protocol without significantly impairing aggregate throughput in Ad hoc networks.

**Key words:** Ad hoc network; DCF protocol; Fairness; Physical carrier-sense mechanism

### 1 引言

在 Ad hoc 网络中, 数据链路层通过介质访问控制协议(MAC 协议)保证各个节点公平的共享网络信道带宽。IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)<sup>[1]</sup>是无线局域网中的标准协议, 目前已被广泛应用于 Ad hoc 网络的各种仿真和测试床中, 成为事实上的 Ad hoc 网络 MAC 协议规范。但由于这个协议本身是针对单跳网络环境设计的, 在应用到多跳的 Ad hoc 网络时会出现很多新问题, 节点访问信道的公平性问题就是其中之一。

近几年来, DCF 协议公平性问题被越来越多的人关注, 但很多 DCF 协议公平性问题的研究只考虑了节点的通信范围和物理载波检测范围相等的情况<sup>[2-4]</sup>。在这种情况下, 节点在通过物理载波检测机制检测到载波的同时, 也一定能正确接收信号, 从而使得 MAC 层能正确识别接收到的帧的内容。文献[2, 3]提出了一种新的 DCF 退避方案, 每个节点通过接收和偷听到的 MAC 帧的类型和目的节点来估算自身及其他节点所占用的信道份额, 然后相应地调整退避窗口, 从而改善 DCF 协议的公平性。文献[4]

在 MAC 帧的头部加入了一个信道使用指数字段, 节点通过接收到的帧的这个字段来估计自身及其他节点对信道的占用情况, 从而调整退避窗口, 改善公平性。但是, 在实际的基于载波检测的无线网络中, 节点的物理载波检测范围比通信范围要大很多<sup>[5]</sup>, 节点不一定能正确识别通过物理载波检测机制检测到的干扰信号。在这种情况下, 文献[2-4]提出的改进方法是不适用的。文献[6]考虑了物理载波检测范围大于通信范围的实际情况, 把在这种情况下出现的某些流完全垄断信道, 而其余流几乎得不到任何信道带宽的不公平问题称为 1/0 公平问题(1/0 fairness problem)。同时, 提出了一种结合功率控制的发放触发与收方触发相结合的改进方案。这种方案能提高 MAC 协议的公平性, 但与现有的 DCF 协议发方触发的体制不兼容。

本文在考虑节点物理载波检测范围大于通信范围的情况下, 讨论了物理载波检测机制对 DCF 协议公平性的影响, 并提出了一种基于冲突和干扰感知的退避算法来改善 DCF 协议的公平性。仿真证明, 该算法能有效地缓解 DCF 协议不公平问题的产生, 避免部分节点对信道的垄断, 并且不会引起网络吞吐量的严重下降。

## 2 物理载波检测对 DCF 公平性问题的影响

### 2.1 节点的传输范围、物理载波检测/载波干扰范围和冲突干扰范围

IEEE802.11 DCF 中的载波检测机制包括物理载波检测和 MAC 层的虚拟载波检测。对于载波检测的无线网络,节点的物理载波检测范围比传输范围要大很多。如果接收节点在发送节点的传输范围  $r_{tx}$  内,接收节点能正确接收发送节点发送的信号;如果接收节点在发送节点的传输范围外,而在发送节点的载波干扰范围  $r_{cs}$  内(即发送节点在接收节点的物理载波检测范围内),接收节点则只能通过物理载波检测机制检测到发送节点发送的信号,而无法正确接收该信号。

假设接收节点 1 在发送节点 0 的传输范围内,如图 1 所示,而另外一个发送节点 2 却在发送节点 0 的载波干扰范围外。当节点 0 向节点 1 发送信号时,由于节点 2 无法通过物理载波检测机制检测到节点 0 发送的信号,所以节点 2 可能同时向节点 3 发送信号。当发送节点 2 在接收节点 1 的冲突干扰范围  $r_{if}$  内时,节点 0 发送的信号和节点 2 发送的信号可能在节点 1 处发生冲突,导致节点 1 无法正确接收节点 0 发送的信号。文献[7]给出了采用双线地面反射(Two-ray)传播模型时,接收节点冲突干扰范围  $r_{if}$  的计算公式:

$$r_{if} = \sqrt[4]{\text{SNR}_{rx}} \times d \quad (1)$$

其中  $\text{SNR}_{rx}$  是接收节点判决信号是否能被正确接收的信噪比门限,  $d$  是发送节点与接收节点之间的距离。由于  $\text{SNR}_{rx}$  通常设置为 10dB, 所以  $r_{if}$  通常取 1.78d。

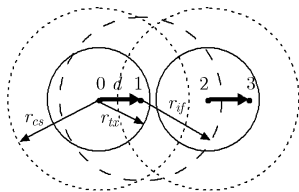


图1 节点的传输范围、物理载波检测/载波干扰范围和冲突干扰范围

### 2.2 DCF公平性问题的仿真与分析

本文采用 GloMoSim<sup>[8]</sup>网络仿真环境分析物理载波检测机制对 DCF 公平性的影响。网络拓扑如图 2 所示,为了尽量减少上层协议对 DCF 公平性问题的影响,本文采用静态路由的方式。传输层采用 UDP 协议,仿真的业务类型为恒定比特率(Constant Bit Rate, CBR)业务,采用 DSSS 的物理层。其他仿真参数如表 1 所示。

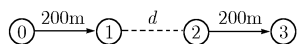


图2 4节点网络拓扑

表1 仿真参数

| 参数名        | 参数值    | 参数名               | 参数值     |
|------------|--------|-------------------|---------|
| 信道比特率      | 2Mbps  | 时隙长度              | 20μs    |
| 通信范围       | 250m   | SIFS              | 10μs    |
| 物理载波检测范围   | 550m   | DIFS              | 50μs    |
| PHY 头大小    | 192bit | CW <sub>min</sub> | 31      |
| MAC 头大小    | 224bit | CW <sub>max</sub> | 1023    |
| RTS 大小     | 160bit | 传播模型              | Two-Ray |
| CTS/ACK 大小 | 112bit | 接收信噪比门限           | 10dB    |

考虑从节点 0 到节点 1 以及从节点 2 到节点 3 的两个 CBR 流。仿真时间为 300s, CBR 流在仿真开始后的第 10s 建立并开始传输数据,直到仿真结束为止。数据包的大小为 920byte,发送间隔为 2ms,使得信道处于饱和状态。为了评价两个流之间的公平性,本文采用式(2)所示的公平性指数 FI<sup>[9]</sup>:

$$FI = \frac{\left( \sum_{i=1}^N T_i / \phi_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N (T_i / \phi_i)^2} \quad (2)$$

其中  $N$  为网络中流的总数,  $T_i$  和  $\phi_i$  分别表示流  $i$  的吞吐量和权重。在本文的仿真中,假设所有的 CBR 流有相同的权重。表 2 给出了当仿真拓扑中  $d$  分别取不同值时这两个流的平均吞吐量和公平性指数。

表2 DCF 公平性仿真实验数据

| $d(m)$ | $Th_{01}$ (kbps) | $Th_{23}$ (kbps) | $Th_{ave}$ (kbps) | FI       |
|--------|------------------|------------------|-------------------|----------|
| 200    | 698.565          | 752.643          | 725.604           | 0.998613 |
| 370    | 0                | 1398.90          | 699.450           | 0.500000 |
| 600    | 1402.91          | 1402.84          | 1402.88           | 1.00000  |

注:  $Th_{01}$  表示节点 0 到节点 1 的流的平均吞吐量。  $Th_{ave}$  表示网络平均吞吐量

当节点 1 和节点 2 的距离是 200m 时,由于物理载波检测范围是 550m,节点 0 向节点 1 发送信号时,节点 0 处于节点 2 的物理载波检测范围内,根据 2.1 节中的讨论,节点 2 虽然无法正确识别节点 0 发送的信号,但它能通过物理载波检测机制检测到信号的存在,从而通知 MAC 层信道变忙。同样,当节点 2 向节点 3 发送信号时,节点 0 也能通过物理载波检测机制检测到信道变忙。仿真结果表明,当两个流的发送节点都在对方的物理载波检测范围内时,物理载波检测机制能在一定程度上给这两个发送节点提供一种同步机制,从而有效避免发送节点之间的冲突,保证公平性。

当节点 1 和节点 2 的距离是 370m 时,两个流的发送节点都不在对方的物理载波检测范围内,接收节点 1 在发

送节点2的传输范围外,且由式(1)可知,发送节点2在接收节点1的冲突干扰范围内。当节点0向节点1发送信号时,由于节点2无法通过物理载波检测机制检测到节点0发送的信号,所以节点2可能同时向节点3发送信号。节点2和节点0发送的信号在节点1处冲突,导致节点0发送的信号无法被节点1正确接收。仿真结果表明,在这种情况下,载波干扰给DCF带来了严重的不公平问题,流2→3完全垄断了信道,这种极端不公平现象也就是文献[6]中提出的1/0公平问题。

当节点1和节点2的距离是600m时,两个流的发送、接收节点都不在另一个流的发送、接收节点的载波干扰范围内,所以两个流都能达到链路饱和容量。

### 3 DCF公平性的改进与仿真

针对载波干扰给DCF协议带来的严重不公平问题,本文提出一种基于冲突和干扰感知的退避(Collisions and Interferences Aware Backoff, CIAB)算法。

#### 3.1 CIAB算法的基本思想

**3.1.1 指标定义** 对于网络中的一个流,本文分别从流的发送方和接收方的角度定义了两个指标来衡量载波干扰对流的通信活动的影响程度:

(1)发方载波干扰指数(SII):本文用 $I_{\text{num}}$ 表示在一个流的发送期间,发送节点物理层检测到的载波干扰信号的数目,用 $A_{\text{num}}$ 表示在此期间发送节点MAC层接收到的ACK帧的数目(即成功发送分组的次数),把当前时刻 $A_{\text{num}}$ 和 $I_{\text{num}}$ 的比值记做SII。对于网络中的一个流而言,SII的值越小,表示从发送方的角度看,该流受载波干扰的影响越大。

(2)收方信号冲突指数(RCI):本文用 $N_{\text{num}}$ 表示一个流的接收节点物理层正确接收到的信号数目,用 $C_{\text{num}}$ 表示该节点因为载波信号的干扰而无法正确接收的信号数目,把 $N_{\text{num}}$ 与 $C_{\text{num}}$ 的比值记做RCI。对于网络中的一个流而言,RCI的值越小,表示从接收方的角度看,这个流受载波干扰的影响越大。

**3.1.2 算法描述** 在节点发送的CTS帧和ACK帧中添加一个字段,存放帧发送时刻该节点的RCI值。这样,流的发送节点能通过接收节点应答的CTS帧和ACK帧获得接收节点的RCI值,发送节点把这个值保存在变量 $RCI_{rx}$ 中,且每次接收到接收节点应答的CTS帧和ACK帧时都更新该变量的值。

当节点要发送或者重传网络层的分组时,节点检查当前的SII值和 $RCI_{rx}$ 值:

(1)如果 $SII \leq C_1$ 或者 $RCI_{rx} \leq C_2$ ,其中 $C_1$ 和 $C_2$ 分别为SII和 $RCI_{rx}$ 的门限值,则说明从发方或收方看,流受到的载波干扰较大,因而获得的信道带宽过少。这种情况

下应该减少节点退避计数器的初始值,因此,本文把竞争窗口CW设置为 $CW_{\text{min}}$ (取31)。

(2)如果 $SII > C_1$ , $RCI_{rx} > C_2$ ,而且节点当前的 $I_{\text{num}}$ 值大于上一次发送或者重传时的 $I_{\text{num}}$ 值,则说明无论从发方还是收方看,流受到的载波干扰较小,因而获得了过多的信道带宽,甚至垄断信道。这种情况下应该增大节点退避计数器的初始值,因此,本文把竞争窗口CW设置为

$$CW = \begin{cases} [CW \cdot \text{rand}[1,2]], & [CW \cdot \text{rand}[1,2]] < CW_{\text{max}} \\ CW_{\text{max}}, & [CW \cdot \text{rand}[1,2]] \geq CW_{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $CW_{\text{max}}$ 取1023, $\text{rand}[1,2]$ 表示在 $[1,2]$ 内随机选择的1个数,记号 $[x]$ 表示不大于 $x$ 的最大整数。

(3)如果 $SII > C_1$ , $RCI_{rx} > C_2$ ,但节点当前的 $I_{\text{num}}$ 值等于初始值或者节点上一次发送或重传时的 $I_{\text{num}}$ 值,考虑到这种情况可能是由于网络中这个流周围没有其他的流,或者周围其他流的发送已经结束而造成的。在这种情况下,如果发送节点按照(2)中的算法增大竞争窗口CW值,会引起流吞吐量的严重下降。因此,在这种情况下,节点按照DCF中的二进制指数退避(Binary Exponential Backoff, BEB)算法确定竞争窗口CW值。

(1)和(2)中描述的算法使网络中的发送节点合作性地调整竞争窗口CW值的大小,从而保证多个流能公平地共享信道带宽。当网络中的某个流周围不存在其他节点的载波干扰时,(3)中的算法能避免这个流的吞吐量下降。

#### 3.2 CIAB算法的仿真与分析

首先利用CIAB算法在2.3节中讨论的网络拓扑和仿真参数下进行仿真分析,然后再考虑在其他网络拓扑下的情况。

仿真实验表明,门限 $C_1$ 的取值对实验结果的影响并不大,只要足够大即可,在本文的仿真中,取 $C_1=50$ 。使用CIAB算法改进DCF协议,当门限 $C_2$ 取不同值时,可以得到表3~表5所示的仿真结果。为了能更清楚地描述CIAB算法对DCF公平性的改善,在图3中给出了当 $d=370\text{m}$ 时,算法改进前后,两个CBR流的吞吐量的比较。其中,图3(a)给出了当门限 $C_2$ 取不同值时两个CBR流的平均吞吐量,图3(b),3(c),3(d)给出了当 $C_2=0.7$ 时,两个CBR流的吞吐量随时间变化的曲线,其中每个点的值为10s时间间隔内CBR流的平均吞吐量。

表3  $d=200\text{m}$ 时CIAB公平性仿真实验数据

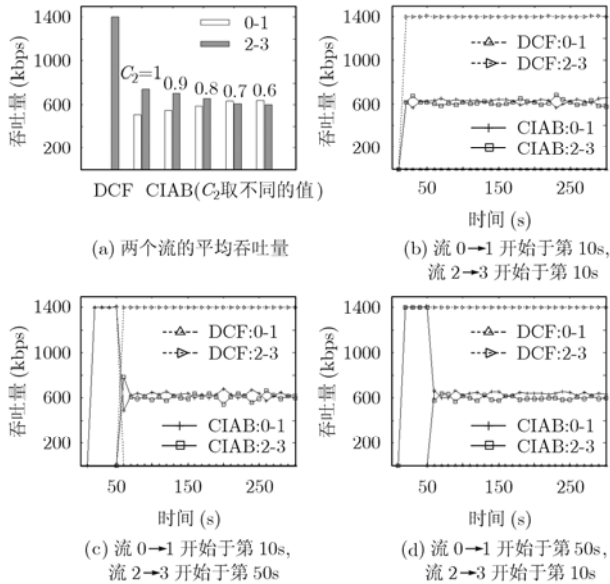
| $C_2$ | $Th_{01}(\text{kbps})$ | $Th_{23}(\text{kbps})$ | $Th_{\text{ave}}(\text{kbps})$ | FI       |
|-------|------------------------|------------------------|--------------------------------|----------|
| 1.0   | 706.685                | 698.386                | 702.536                        | 0.999965 |
| 0.9   | 735.853                | 667.097                | 701.475                        | 0.997604 |
| 0.8   | 766.772                | 635.696                | 701.234                        | 0.991341 |
| 0.7   | 817.738                | 584.718                | 701.228                        | 0.973135 |
| 0.6   | 871.136                | 531.316                | 701.226                        | 0.944545 |

表4  $d=370\text{m}$  时 CIAB 公平性仿真实验数据

| $C_2$      | $Th_{01}(\text{kbps})$ | $Th_{23}(\text{kbps})$ | $Th_{ave}(\text{kbps})$ | FI              |
|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1.0        | 502.794                | 745.195                | 623.995                 | 0.963645        |
| 0.9        | 543.443                | 701.787                | 622.615                 | 0.984088        |
| 0.8        | 587.972                | 653.494                | 620.733                 | 0.997222        |
| <b>0.7</b> | <b>631.504</b>         | <b>606.748</b>         | <b>619.126</b>          | <b>0.999600</b> |
| 0.6        | 638.067                | 600.818                | 619.443                 | 0.999097        |

表5  $d=600\text{m}$  时 CIAB 公平性仿真实验数据

| $C_2$ | $Th_{01}(\text{kbps})$ | $Th_{23}(\text{kbps})$ | $Th_{ave}(\text{kbps})$ | FI      |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------|
| 1.0   | 1398.63                | 1398.53                | 1398.58                 | 1.00000 |
| 0.9   | 1398.55                | 1398.52                | 1398.54                 | 1.00000 |
| 0.8   | 1398.41                | 1398.52                | 1398.47                 | 1.00000 |
| 0.7   | 1398.68                | 1398.60                | 1398.64                 | 1.00000 |
| 0.6   | 1398.59                | 1398.50                | 1398.55                 | 1.00000 |

图3  $d=370\text{m}$  时算法改进前后4节点网络中两个流吞吐量的比较

与表2比较可以发现,在考虑节点物理载波检测范围大于通信范围的情况下,CIBA 算法能有效改善因载波干扰引起的DCF不公平问题。但网络平均吞吐量有所下降,这主要是由于算法在CTS帧和ACK帧中添加了一个RCI字段引起的。当 $d=600\text{m}$ 时,两个流的发送、接收节点都不在另一个流的发送、接收节点的载波干扰范围内,由于3.1.2节中算法(3)的作用,两个流都能达到链路饱和容量。当 $d=200\text{m}$ 或者 $370\text{m}$ 时,在本文讨论的参数 $C_2$ 的取值范围内,流 $0 \rightarrow 1$ 的吞吐量随 $C_2$ 的减小而单调上升,流 $2 \rightarrow 3$ 的吞吐量随 $C_2$ 的减小而单调下降,如表3,表4所示。为使两个流获得较好的公平性,当 $d=200\text{m}$ 时,取 $C_2=1$ ;当 $d=370\text{m}$ 时,取 $C_2=0.7$ 。之所以在这两种情况下使流达到公平的门槛值不同,是因为当 $d=200\text{m}$ 时,发送节点

0和2在对方的物理载波检测范围内,发送节点所受到的载波干扰较大,而当 $d=370\text{m}$ 时,发送节点0和2不在对方的物理载波检测范围内,发送节点所受的载波干扰相对较小。综合实验数据,本文给出门限 $C_2$ 的建议值为

$$C_2 \in [0.6, 1] \quad (4)$$

在前面的分析中,网络中只有两个流,下面对网络中存在多个流的情况进行仿真和分析。采用图4所示的网络拓扑,节点之间的距离均为 $200\text{m}$ ,同时建立节点0到节点1,节点2到节点3和节点4到节点5的3个CBR流,仿真时间为 $300\text{s}$ ,CBR流在仿真开始后的第10s建立并开始传输数据,直到仿真结束为止。其余仿真参数与前面的实验一致。分别考虑算法改进前后,门限 $C_2$ 取不同值时的情况,仿真结果如图5所示。

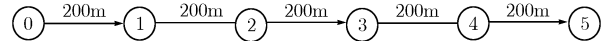


图4 6节点网络拓扑

在图4所示的网络拓扑中,节点0和节点4相距较远,不在对方的物理载波检测范围内,根据2.2节中的讨论,由于节点0和节点4之间缺少物理载波检测提供的同步机制,它们的发送是独立的。节点2处于节点0和节点4之间,无论是节点0发送,还是节点4发送,节点2都会因为物理载波检测机制检测到信道忙而推迟发送。所以,在这种情况下,节点2因为受到严重的载波干扰而几乎无法发送数据。如图5所示,当没有采用CIAB算法改进DCF协议时,流 $0 \rightarrow 1$ 和流 $4 \rightarrow 5$ 几乎垄断了整个信道,而流 $2 \rightarrow 3$ 的吞吐量非常小;采用CIAB算法改进DCF协议后,公平性有了很大的改善,在取参数 $C_2=1$ 或 $0.9$ 的情况下,3个流的平均吞吐量近似相等。

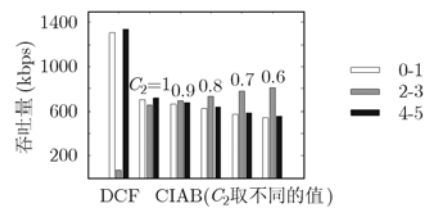


图5 算法改进前后6节点网络中各个流吞吐量的比较

## 4 结束语

本文在节点的物理载波检测范围大于通信范围的情况下讨论了物理载波检测机制对IEEE 802.11DCF协议公平性的影响,针对载波干扰给DCF协议带来的严重不公平问题,本文提出了一种基于冲突和干扰感知的退避算法。仿真证明,该算法能有效地改善DCF协议的公平性,并且没有引起网络吞吐量的严重下降。

## 参考文献

- [1] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and

- PHYsical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11- 1999, IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, Ed., 1999.
- [2] Bensaou B, Wang Y, and Ko C C. Fair medium access in 802.11 based wireless Ad-Hoc networks. Proceedings of IEEE/ACM MobiHoc, Boston, Massachusetts, USA, 2000: 99-106.
- [3] Wang Y and Bensaou B. Achieving fairness in IEEE802.11 DFWMAC with variable packet lengths. Proceedings of GLOBECOM'01, San Antonio, TX, USA, 2001, vol.6: 3588-3593.
- [4] Xiao Y, Zhang L, Shan X, Ren Y, and Ma Z. Neighbor-medium-aware MAC protocol with fairness for wireless Ad hoc networks, *IEICE Trans. on Communications*, 2004, 87(9): 2738-2746.
- [5] Kamerman A and Monteban L. WaveLAN®- II : A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. *Bell Labs Technical Journal*, 1997, 2(3): 118-133.
- [6] He J and Pung H K. One/zero fairness problem of MAC protocols in multi-hop Ad hoc networks and its solution. Proceedings of the International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, Nevada, USA, 2003: 479-485.
- [7] Xu K, Gerla M, and Bae S. How effective is the IEEE 802.11RTS/CTS handshake in Ad hoc networks, In Proc. GLOBECOM2002, Taipei, 2002, 1: 72-76.
- [8] Bajaj L, Takai M, and Ahuja R. GloMoSim: A scalable network simulation environment. UCLA Computer Science Department, Technical Report-990027, 1997.
- [9] Jain R, Durrezi A, and Babic G. Throughput fairness index: An explanation. <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/atmf/a99-0045.htm>, Feb. 1999.
- 雷 磊: 男, 1981 年生, 博士生, 研究领域为 Ad hoc 网络.
- 许宗泽: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为数字通信.