

IEEE 802.11 DCF 差错帧模型的分析与仿真算法改进

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: 该文提出了 IEEE 802.11 DCF 差错帧模型的概念,并在详细分析这一模型的基础上,指出了 GloMoSim 仿真环境中现有的 DCF 差错帧模型仿真算法存在的问题,然后严格按照 DCF 差错帧模型中的相关规约改进了该仿真算法。仿真与分析表明,与 GloMoSim 中现有的仿真算法相比,改进后的仿真算法能正确地模拟 IEEE 802.11 DCF 协议处理差错帧的相关规约,为仿真实验提供了更加可靠的结果。

关键词: Ad hoc 网络; DCF 协议; 差错帧模型; GloMoSim

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1234-05

Analysis of IEEE 802.11 DCF Error Frame Model and Improvement of the Simulation Algorithm

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 concept of IEEE 802.11 DCF error frame model is proposed. This paper points out the error of the simulation algorithm of the DCF error frame model in GloMoSim in detail, based on the analysis of the model. To solve this problem, the algorithm is modified strictly according to the specifications of the DCF error frame model. The simulation results show that compared with the original simulation algorithm, the modified algorithm can simulate the related specifications of the DCF error frame model more correctly, thus can provide more reliable simulation results.

Key words: Ad hoc networks; DCF protocol; Error frame model; GloMoSim

1 引言

近几年来,无线 Ad hoc 网络的研究引起了人们广泛的关注。新提出的大量网络协议和算法需要进行验证才能证明其有效性,验证方法包括数学分析法,实验法和仿真法。其中,数学分析法需要以某些假设条件作为前提,故而有较大的局限性;而实验法需要较高的实验成本,能验证的网络规模非常有限。因此,研究人员通常采用计算机仿真的方法对 Ad hoc 网络中的新协议和算法进行验证。而为了得到可靠的仿真结果,就要求仿真软件能客观正确地模拟各种网络协议。

介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议是 Ad hoc 网络研究领域的一个热点。IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function)^[1]是无线局域网中的标准协议,目前已被广泛应用于无线 Ad hoc 网络 MAC 协议的研究^[2, 3]。本文在 2.3 小节中定义了 IEEE 802.11 DCF 协议差错帧模型(Error Frame Model, EFM)的概念,并在详细讨论该模型的基础上,分析了 GloMoSim^[4]仿真环境中现有的差错帧模型仿真算法存在的问题,然后在 GloMoSim 环境下,严格按照 DCF 差错帧模型中的相关规约改进了该仿

真算法。仿真与分析证明,与 GloMoSim 中现有的仿真算法相比,改进的仿真算法能正确地反映 IEEE 802.11 DCF 协议处理差错帧的相关规约,能为仿真实验提供更加可靠的结果。

2 IEEE 802.11 DCF 差错帧模型的分析

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 是基于载波检测机制的无线局域网 MAC 协议。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^[5]。因此,存在着传输范围、物理载波检测/载波干扰范围和冲突干扰范围这样 3 个不同的概念。

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。

假设发送节点 0 向接收节点 1 发送信号时,节点 0 载波干扰范围外的某一节点 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 可能同时向其他节点发送信

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[6]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 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 是发送节点和接收节点之间的距离。由于 SNR_{rx} 通常设置为 10dB, 所以 r_{if} 通常取 $1.78d$ 。

2.2 DCF中的帧间间隔

IEEE 802.11 DCF 协议定义了 3 种不同的帧间间隔(InterFrame Space, IFS): 短帧间距(Short InterFrame Space, SIFS)、DCF 帧间间隔(DCF InterFrame Space, DIFS)和扩展帧间间隔(Extended InterFrame Space, EIFS) [1]。SIFS 是由物理层决定的, 对于跳频(FHSS)和直接序列扩频(DSSS)的物理层, SIFS 的值分别为 $28\mu\text{s}$ 和 $10\mu\text{s}$ 。DIFS 和 EIFS 的值分别由式(2), 式(3)决定。

$$\text{DIFS} = \text{SIFS} + 2 \times \text{SlotTime} \quad (2)$$

$$\text{EIFS} = \text{SIFS} + [(8 \times \text{ACKsize}) + \text{preambleLength} + \text{PLCPHeaderLength}] / \text{BitRate} + \text{DIFS} \quad (3)$$

其中 SlotTime 为一个时隙的时间, preambleLength 为前导帧的长度, PLCPHeaderLength 为物理层收敛协议(Physical Layer Convergence Protocol, PLCP)子层头部的长度, BitRate 为发送的比特率。采用直序扩频的物理层时, DIFS 的值为 $50\mu\text{s}$, EIFS 的值约为 $364\mu\text{s}$ 。

3 种不同的帧间间隔提供了 3 种不同的帧发送优先级。由式(2), 式(3)可以看出, SIFS 是最短的帧间间隔, 为某些控制帧(比如 CTS 帧, ACK 帧)以及需要连续发送的数据帧分片提供最高的信道访问优先级。

DIFS 用于节点的发送过程。为了避免冲突, IEEE 802.11 DCF 协议规定, 当节点有数据包需要发送时, 它首先监听信道, 如果信道持续空闲的时间达到 DIFS, 则发送数据包。如果信道忙或空闲的时间小于 DIFS, 则继续监听信道, 当信道持续空闲的时间达到 DIFS 后, 节点再随机退避一段时间, 这段时间的长度取决于随机选取的退避计数器初始值。如果在这段时间内信道仍然保持空闲, 退避计数器的值递减为 0 后节点就可以发送数据包。如果节点在随机退避的时间内检测到信道变忙, 则停止退避计数器递减, 并保留当前计数器的剩余值, 在下次检测到一个 DIFS 的信道空闲时间后, 再次启动退避计数器, 并从保留的剩余值开始递减, 如果在该过程中又检测到信道忙, 则再次延迟发送。如此反复, 直到退避计数器的值递减为 0 后, 节点才能发送数据包。

由式(3)可知, EIFS 比 DIFS 长很多, 主要用于节点接收到差错帧的情况, 在 2.3 小节中, 将对此详细讨论。

2.3 DCF中的差错帧模型

IEEE 802.11 DCF 协议规定, 各种类型的帧都含有一个

帧校验序列(Frame Check Sequence, FCS), 其中包含了长度为 32bit 的循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Code, CRC), 用于检验帧在传输过程中有无差错。如果接收节点通过物理载波检测机制检测到信道上存在信号, 并正确接收了 PLCP 头, 节点就能从 PLCP 头中的协议数据单元长度(PSDU Length Word, PLW)子域获知正在接收的帧的长度, 从而开始接收帧。接收完毕后, 如果 CRC 指示接收到的帧有差错, 则当物理载波检测机制检测到信道空闲后, 该节点在 EIFS 长度的时间内不能发送数据包, 从而保证了位于该节点冲突干扰范围内的其他发送节点能正确接收到 ACK 帧。本文把 DCF 协议规定的, 与差错帧相关的一系列规约定义为 IEEE 802.11 DCF 差错帧模型。

对于 DCF 差错帧模型, 我们还需指出以下几个要点。

(1) 如果仅仅通过物理载波检测机制检测到信道忙, 却没有正确接收到 PLCP 头, 节点则不会认为接收到了一个差错帧。因此, 当物理载波检测机制指示信道空闲后, 节点就可以开始尝试发送数据包。文献[2]提出了一种增强的载波检测机制(Enhanced Carrier Sensing, ECS), 从而提高 802.11 DCF 协议的公平性。但是文献[2]中的分析认为, 当节点通过物理载波检测机制检测到信道忙后, 节点就应该开始 EIFS 长度时间的退避, 这显然是不正确的。文献[3]讨论了以 802.11 DCF 作为 MAC 协议的 Ad hoc 网络的安全问题, 但在分析 DCF 协议不公平性问题时也犯了类似于文献[2]中的错误。

(2) EIFS 长度的等待时间过后, 如果信道空闲, 且发送队列中有数据包要发送, 则节点开始执行随机退避过程, 退避结束后就可以发送数据包。

(3) 如果节点在 EIFS 长度的等待时间内接收到一个正确帧(CRC 检测无错), 则终止等待过程, 节点仍按照正常的发送规约(见 2.3 节)尝试发送数据包。

(4) 如果节点在 EIFS 长度的等待时间内再次接收到一个差错帧, 则当物理载波检测机制检测到信道空闲后, 该节点重新开始等待 EIFS 长度时间的计时, 在这段时间内节点不能发送数据包。

3 GloMoSim 仿真环境中 DCF 差错帧模型仿真算法的改进

3.1 现有算法存在的问题与改进

GloMoSim 是一种基于 Parsec(Parallel Simulation Environment for Complex System)语言的无线移动网络仿真环境, 它采用类似于 OSI7 层模型的分层结构, 各层之间通过标准的 API 接口和消息传递机制进行交互 [7]。

在 GloMoSim 中, 现有的 DCF 差错帧模型仿真算法比较简单。当节点的 Radio 层判定信道上的一个信号能被接收, 即满足 $p_r \geq \text{rxThreshold}$, $\text{SNR} \geq \text{SNR}_{rx}$ 的条件时, Radio 层变为接收状态, 并把这一变化通知 MAC 层。同时, 在 DCF

协议的实现中,把MAC层维护的变量IsInExtendedIifsMode设置为true。Radio层接收信号完毕后,如果在接收过程中没有发生冲突,则把帧传递给MAC层,并把IsInExtendedIifsMode变量设置为false;否则,变量IsInExtendedIifsMode的值保持true不变。

在载波检测指示信道空闲的情况下,当节点网络层队列中有数据包要发送时,MAC层检查IsInExtendedIifsMode变量的值,如果该变量的值是false,则表示节点上一次接收信号成功,没有发生冲突,节点在开始随机退避前应等待信道空闲DIFS长度的时间;如果该变量的值是true,则表示该节点上一次接收信号时,因为发生冲突而未能正确接收,因此,节点在开始随机退避前则必须等待信道空闲EIFS长度的时间。

由上述仿真算法可知,如果节点在接收某一信号的过程中发生冲突,检测到一个差错帧,那么在该节点再次接收到一个正确帧之前,该节点在每次发送前都必须等待信道空闲EIFS长度的时间才能开始执行随机退避。由于EIFS比DIFS长很多,这必然给该节点的发送造出极大的不公平。结合2.3小节中的分析可知,这与IEEE 802.11DCF协议中规定的差错帧模型是不一致的。因此,上述仿真算法并没有完全正确实现DCF差错帧模型,因而无法在仿真中得到可靠的结果。

为了能在仿真中正确模拟DCF差错帧模型,根据2.3小节中的分析,本文改进了GloMoSim仿真环境中现有的DCF差错帧模型仿真算法。改进后的算法包括Radio层和MAC层两部分,伪码如下所示:

Algorithm 1 Radio Layer EFM Algorithm

CASE: One signal heard from the channel, and the transmission has finished

```

if The signal received correctly by the radio then
    Hand over the frame to the MAC layer
    M802_MustWaitEIFS = false
    M802_EIFSWaitingTimerDuration = 0
    if The node is waiting for M802_EIFSWaiting
Timer to expire then
        Cancel M802_EIFSWaiting Timer
        Attempt to transmit frames according to the
DCF protocol
    end if
else
    M802_MustWaitEIFS = true
end if

```

Algorithm 2 MAC Layer EFM Algorithm

CASE: Received a frame from the radio

```

if The received frame is a RTS frame then
    if The carrier sensing mechanism indicates that the
medium is idle and
        M802_EIFSWaitingTimerDuration<=the

```

```

current time then
    Transmit CTS frame after SIFS time duration
else
    RTS frame is ignored
end if
end if
CASE: The radio mode changes to IDLE
if M802_MustWaitEIFS == true then
    Set M802_EIFSWaitingTimerDuration=the current
time+EIFS
    M802_MustWaitEIFS = false
end if
CASE: The radio mode changes from IDLE to other busy
mode
if The node is waiting for M802_EIFSWaiting Timer
to expire then
    Cancel M802_EIFSWaiting Timer
end if
CASE: M802_EIFSWaiting Timer expired
    Set M802_EIFSWaitingTimerDuration=0
if The carrier sensing mechanism indicates that the
medium is idle then
    Execute the random backoff, and after the backoff,
the node can send the packet
else
    Attempt to transmit frames according to the DCF
protocol
end if
CASE: The FIFO queue of the node has packets to send
if Radio mode is IDLE then
if M802_EIFSWaitingTimerDuration>the current
time then
    Set M802_EIFSWaiting Timer (Duration of the
timer =
        M802_EIFSWaitingTimerDuration-the current
time)
else
    Attempt to transmit frames according to the
DCF protocol
end if
end if

```

3.2 仿真与分析

通过仿真实验,本文将GloMoSim中现有的DCF差错帧模型仿真算法与改进的仿真算法做了比较。采用图1所示的网络拓扑,节点0和节点3分别在节点1和节点2的传输范围内,节点1在节点2的载波检测范围内。同时,当节点0向节点1发送数据包时,由于节点0和节点1之间的距离是250m,根据式(1),节点2在节点1的冲突干扰范围内,节点0向节点1发送的帧与节点2向节点3发送帧和 Date

帧可能在节点 1 处发生冲突。同理,当节点 3 向节点 2 发送数据包时,节点 1 也在节点 2 的冲突干扰范围内,节点 3 向节点 2 发送帧与节点 1 向节点 0 发送的帧可能在节点 2 处发生冲突。同时,为了尽量减少上层协议对 DCF 差错帧模型的影响,我们在仿真中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。

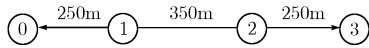


图 1 仿真网络拓扑

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 | 251m | SIFS | 10μs |
| 物理载波检测范围 | 550m | DIFS | 50μs |
| PHY 头大小 | 192bit | CW _{min} | 31 |
| MAC 头大小 | 224bit | CW _{max} | 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 1 到节点 0 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。图 2 给出了 DCF 差错帧模型仿真算法改进前后,这两个 CBR 流的吞吐量仿真结果(ori 和 mod 分别表示仿真算法改进前后的结果)。其中,图 2(a)给出了当仿真的随机种子(seed)取不同随机值时,两个 CBR 流的平均吞吐量;图 2(b), 2(c)分别给出了在 seed 取 44567、34256 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。

对于图 1 所示的网络拓扑,文献[8]通过实验的方法证明, CBR 流 1→0 和 2→3 的吞吐量应该几乎相等。但如图 2 所示, DCF 差错帧模型仿真算法改进前得到的仿真结果却表明,这两个 CBR 流的吞吐量存在着严重的不公平问题。当 seed 取不同的随机值时,两个流的平均吞吐量随机的表现出较大的差距,在最严重的情况下(seed 取 44567),流 1→0 的平均吞吐量几乎是流 2→3 的平均吞吐量的两倍。吞吐量随时间变化的曲线也表明,在仿真的过程中,两个 CBR 流的吞吐量一直随机地存在着较大的差距,在某些 10s 长度的时间段内,一个流的吞吐量为 0,而另一个流完全占用了信道带宽。产生这种不公平现象的原因在于,现有的 DCF 差错帧模型仿

真算法规定,检测到一个差错帧的节点在接收到下一个正确帧之前,都必须先等待信道空闲 EIFS 长度的时间,才能开始执行发送前的随机退避。图 2 中的仿真结果与 3.1 节中的分析是一致的。

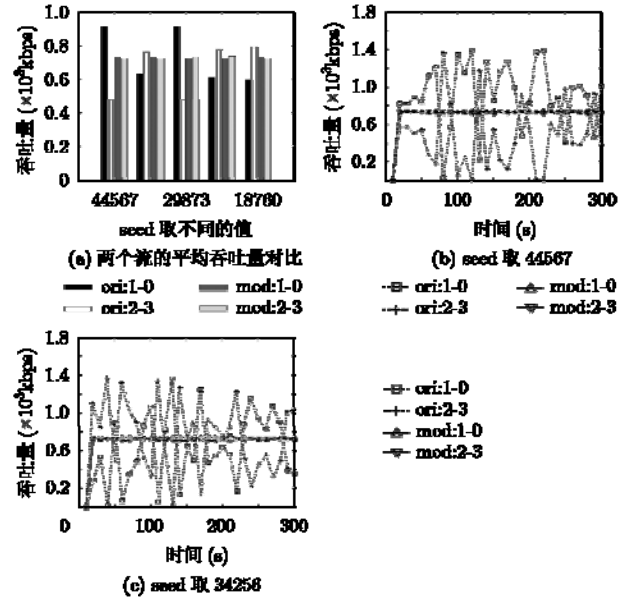


图 2 DCF 差错帧模型仿真算法改进前后两个 CBR 流的吞吐量仿真结果的对比

采用改进的 DCF 差错帧模型仿真算法后,如图 2 所示,当 seed 取不同的随机值时,两个流的平均吞吐量近似相等。同时,吞吐量随时间变化的曲线表明,在仿真过程中,两个 CBR 流的吞吐量也一直没有出现太大的差距,这与文献[8]中的实验结果是一致的。本文在仿真中假定信道带宽是 2Mbps,饱和吞吐量应为 1.4Mbps 左右^[9]。由图 2(a)可知,采用改进的 DCF 差错帧模型仿真算法后,两个 CBR 流的吞吐量之和保持在 1.4Mbps 左右,与文献[9]中的结论一致。

4 结束语

本文在详细讨论 IEEE 802.11 DCF 协议差错帧模型的基础上,分析了 GloMoSim 仿真环境中现有的 DCF 差错帧模型仿真算法存在的问题,并在 GloMoSim 环境中改进了该算法。仿真与分析证明,现有的仿真算法与 DCF 差错帧模型中的相关规约不一致,会给冲突干扰范围内的两个流带来严重的不公平问题,而改进后的仿真算法严格遵照 DCF 差错帧模型中的相关规约,能得到与实际情况相符的仿真结果。

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] Li Z, Nandi S, and Gupta A K. Improving fairness in IEEE 802.11 using enhanced carrier sensing. *IEEE Proceedings: Communications*, 2004, 151(5): 467-472.
- [3] Zhou Y, Wu D, and Nettles S. Analyzing and preventing MAC-layer denial of service attacks for stock 802.11 systems. Proceedings of Workshop on Broadband Wireless Services and Applications 2004, San Jose, CA, USA, Oct. 2004.
- [4] <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/> and related web pages it linked.
- [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] 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.
- [7] Bajaj L, Takai M, and Ahuja R. GloMoSim: A scalable network simulation environment. UCLA Computer Science Department. Technical Report-990027, 1997.
- [8] Bararia S, Ghandeharizadeh S, and Kapadia S. Evaluation of 802.11a for streaming data in Ad-hoc networks. 2004 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks, Boston, MA, United States, Aug 9-11 2004: 72-81.
- [9] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- 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.