

# 一种异构网络中上下行流公平性优化算法

李沛谕<sup>1</sup>, 李哲青<sup>1</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 夏签<sup>2</sup>

(1.河南科技大学网络信息中心, 河南 洛阳 471023; 2.河南科技大学信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**针对 AP(Access Point)性能优化过程中存在的上下行公平性差的问题, 提出了一种保证上下行带宽公平性的优化算法, 称为 FOUN(Fairness Over Up-flow and Down-flow)智能 AP 优化算法。该算法部署在 AP 的 MAC 层上, 利用差错信道下的二维马尔科夫链对 AP 和无线站点(STA)分别进行建模分析, 在考虑最大重传次数与无线误码率对数据帧发送的影响下, 推导出不同误码率和不同上下行流数目条件下智能 AP 的发送概率, 通过调节智能 AP 的最小竞争窗口和发送概率来保证上下行带宽公平性。实验证明: FOUN 智能 AP 优化算法能够有效提高上下行带宽的公平性以及带宽的合理分配。

**关键词:** 异构网络; 上下行流公平性; 智能 AP; 动态概率性发包机制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1144-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803047

## A Novel Algorithm for Improving Fairness Between Uplink and Downlink Flows in Heterogeneous Network

Li Peiyu<sup>1</sup>, Li Zheqing<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Xia Qian<sup>2</sup>

(1. Network Information Center of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. College of Information Engineering of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In order to improve the fairness between uplink and downlink flows in AP optimization, a novel algorithm called FOUN(fairness over uplink and downlink) is proposed. Considering the influence of the attempt limit and the bit error rate of wireless, the FOUN algorithm modeling of AP and wireless stations is studied separately by using two-dimensional Markov chain, which derives the probability of data sending under the condition of different bit error rate and different number of uplink and downlink flows. Simulation results show that FOUN can improve the fairness of the uplink and downlink bandwidth as well as the throughput.

**Keywords:** heterogeneous network, fairness between uplink and downlink flows, intelligent AP, dynamic probabilistic sending mechanism

## 引言

AP(Access Point)在 TCP/IP 协议栈中实现了不

同网络间的互连, 在异构网络中用户通过 AP 与外部网络进行交互, 主要使用的是网页浏览、视音频点播、文件下载等应用, 数据流均具有明显非对称性, 即下行流量要远远大于上行流量。并且由于传统 AP 的 MAC 层协议是标准的 DCF 协议, 在竞争信道时, AP 和其它无线站点(STA)具有相同的优先级, 因此在同时存在上行流和下行流的情况下, 即



收稿日期: 2016-03-25      修回日期: 2016-05-30;  
基金项目: 河南省重点攻关项目(112102210186, 132102210246);  
作者简介: 李沛谕(1988-), 女, 河南南阳, 硕士, 助教, 研究方向为网络性能改善、网络信息安全与大数据分析。

http: www.china-simulation.com

• 1144 •

使 AP 所需传输的业务量大于其他 STA, 也不能获得更高的接入信道概率, 从而造成了异构网络中上行流与下行流无法公平占用信道的问题<sup>[1-3]</sup>。由此可见, 传统的 AP 已不能满足异构网络上下行流公平性的需求。

为了解决此问题, 文献[4]提出调节 AP 处的缓存分配空间, 通过限制 ACK 数据包在 AP 处占用的缓存, 减少 ACK 数据包所占用无线带宽, 从而提高下行流的吞吐量, 缓解上下行流不公平问题。此机制虽能在一定程度上改善上下行公平性, 但由于并未涉及 MAC 层的改进, 无法从根本上解决公平性问题。文献[5]通过在 AP 和 STA 处部署优化后的 IEEE802.11 协议, 在发送数据时将竞争窗口置为最优, 以保证上下行带宽公平性, 但算法优化代价较高, 且没有考虑误码率对上下行流公平性的影响。文献[6]提出了一个基于最优队列选择的双队列方法, 通过计算优先级与接入概率来实现上下行流的公平性。张兵等<sup>[7]</sup>在马尔科夫模型基础上, 在 AP 处引入一种概率发送机制, 动态的根据当前上下行流的数目, 调整发送概率, 以达到上下行带宽公平分配的目的。文献[8]提出采用马尔科夫模型用来对 DCF 的指数退避过程进行建模, 并分析了在非理想信道下的 DCF 饱和吞吐量模型, 但在上述模型中, 均未考虑无线误码和最大重传次数的影响。

上述这些机制虽然在一定程度上改善了上下行公平性, 但仍存在一些问题。针对此问题, 本文提出一种新的 MAC 层优化算法, 称为 FOUN (Fairness Over Up-flow and Down-flow)算法。该算法部署在 AP 的 MAC 层上, 工作在有线无线边界处。对于有线段和无线段采用不同的 MAC 层协议。在有线段, 采用标准以太网 802.3 协议; 在无线段, 为了解决 MAC 层上下行带宽不公平的问题, 采用改进的 W-MAC 协议, 通过在理想信道下 IEEE802.11 DCF 的马尔科夫模型, 利用差错信道下的 MAC 协议性能分析模型, 综合考虑重传次数及最小竞争窗口的影响, 以上下行带宽比例控制为优化目标, 动态设置智能 AP 处的 MAC 层参数, 从而达到改善无线链路的上下行流公平性的目的。

## 1 模型构建

FOUD 智能 AP 结构见图 1, 采用分段连接的方式加入到普通 AP 中。其中从有线终端(STA)到 AP 为有线段, 从无线终端(WSTA)到 AP 为无线段。

在此智能 AP 模型中, 从无线端到有线端的数据流为上行流, 从有线端到无线端的数据流为下行流。智能 AP 中设置了两个缓存, 上行缓存和下行缓存。上行缓存存储的是上行流数据, 下行缓存存储的是下行流数据。

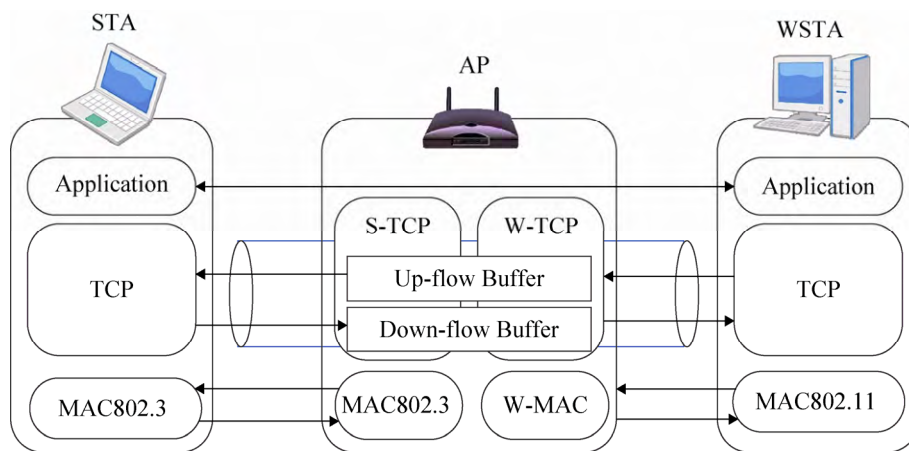


图 1 MAC 层智能 AP 整体结构  
Fig. 1 The structure of AP in MAC layer

本文采用改进的马尔科夫模型,分别对差错信道下的 AP 和 STA 进行建模分析,推导出此信道下 IEEE802.11DCF 饱和吞吐量的计算方法。使用上述模型进行分析必须满足以下条件:

(1) 网络中所有节点采用的网络配置必须相同, AP 采用概率发送机制,其他节点采用基本接入方式进行相互通信;

(2) 网络中所有节点都处于稳定发送的状态,即发送站点的队列中始终有数据需要发送;

(3) 对于一个给定的网络,其中每个节点的碰撞概率固定且相互独立,不受传输历史的干扰;

(4) 相对于无线网络中的 MAC 帧,其他控制帧以及物理层的帧头部要远小于 MAC 帧的长度。

以上下行带宽公平分配为前提,在 AP 和 STA 处设置合适的发送概率  $P$ 。当 AP 或 STA 的退避计数器为 0 时,并不像标准的 DCF 机制一样立即发送数据,而是以概率  $P$  发送数据。同时从竞争窗口范围中重新选取一个随机值,进入退避过程。通过对概率  $P$  的调节,可以使 AP 在竞争信道时根据网络状态动态调整自身优先级,从而实现上下行带宽

的公平分配。此外,考虑差错信道下误码率对于数据传输的影响,当误码率较大时,数据帧发送失败的原因不仅有冲突,还有误码<sup>[9]</sup>。图 2 和图 3 给出了 AP 和有线终端(STA)退避过程的马尔科夫模型。

## 2 FOUD 公平性优化算法

### 2.1 算法描述

本模型定义了一个随机过程  $s(t)$  来表示 AP 或者 STA 在任意时刻  $t$  数据帧的重传次数,即站点在这一时刻所处的退避阶数值。在 IEEE802.11 协议中,数据帧重传次数有上限,本模型中以  $m$  表示。数据帧的重传次数达到最大值后,如果数据发送失败,则丢弃该帧。随机过程  $b(t)$  代表在任意时刻  $t$ , AP 或者 STA 的退避计数器的大小,  $t$  和  $t+1$  表示两个连续的时隙的起始时间。由于在 DCF 机制中,站点有可能因为信道忙、碰撞或者误码导致数据发送失败,因此,时隙应该是时隙宽度  $\delta$  和可变的退避计数器冻结的时间之和。根据上面的分析,二维随机过程  $\{s(t), b(t)\}$  就可以构成一个二维离散马尔科夫链。

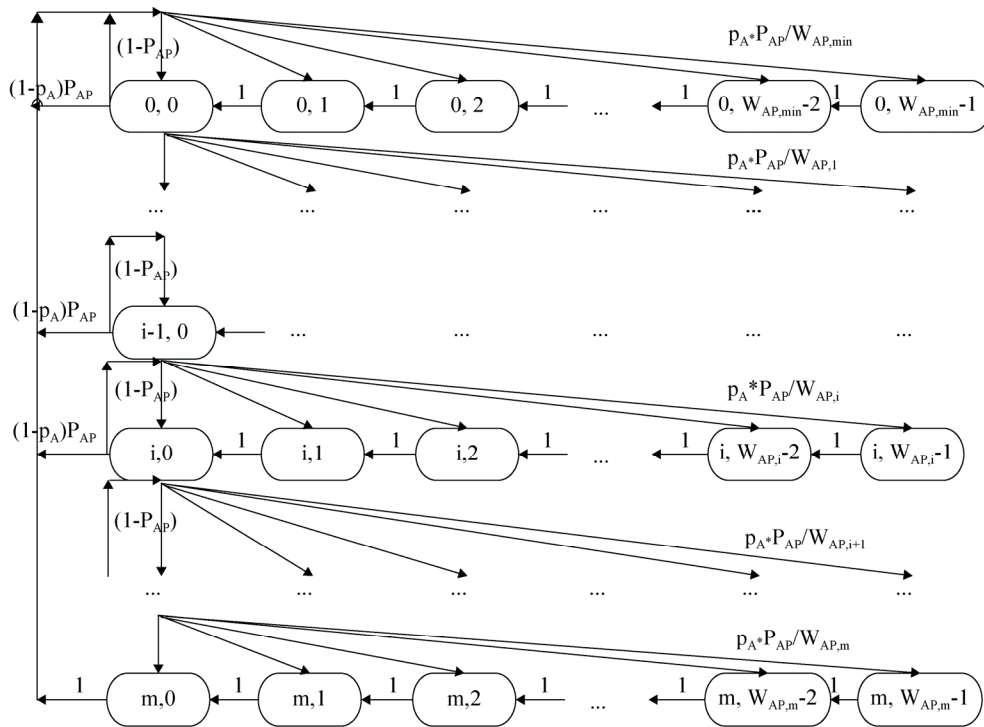


图 2 AP 退避过程的马尔科夫模型

Fig. 2 The backoff process of Markoff model in AP

<http://www.china-simulation.com>

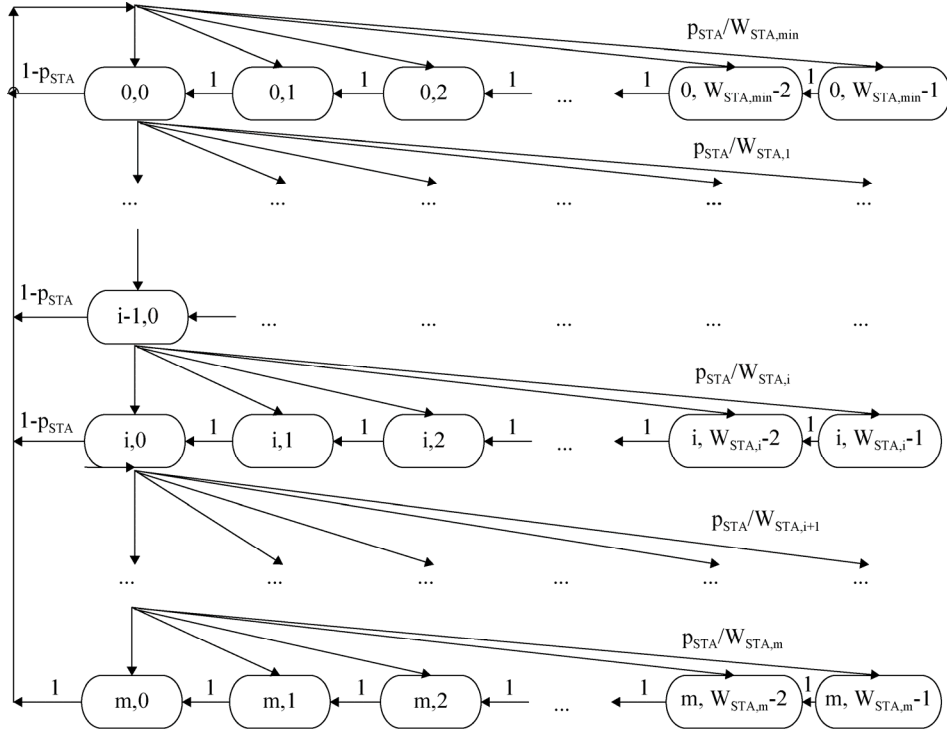


图 3 STA 退避过程的马尔科夫模型  
Fig. 3 The backoff process of Markoff model in STA

图 2 和图 3 中  $W_{AP,min}$  和  $W_{STA,min}$  分别表示 AP 和 STA 的最小竞争窗口,  $m$  表示站点的最大重传次数,  $m'$  表示站点的最大退避阶数, 即站点从最小竞争窗口值到最大竞争窗口值中间的最大变化次数。根据 IEEE802.11 的 DCF 机制, AP 的竞争窗口  $W_{AP,i}$  有如下关系式:

$$W_{AP,i} = \begin{cases} 2^i * W_{AP,min} & 0 < i < m' \\ 2^{m'} * W_{AP,min} & i = m' \end{cases} \quad (1)$$

设  $p_A$  和  $p_{STA}$  为 AP 和 STA 在传输中失败的概率。由于在差错信道中, 除了碰撞会导致数据传输失败外, 误码造成的帧错误也会导致数据传输失败, 设误帧率为:

$$fer = 1 - (1 - BER)^{L+H} \quad (2)$$

式中:  $L$  表示站点发送的数据帧中有效数据的长度;  $H$  表示站点数据帧中 MAC 头部的长度。由于在差错信道下, 误码和碰撞都有可能发送的失败, 所以  $p_A$  和  $p_{STA}$  可以表示为:

$$p_A = 1 - (1 - p_{APfail})(1 - fer) = 1 - (1 - fer)(1 - \beta)^N \quad (3)$$

$$p_{STA} = 1 - (1 - p_{STAFail})(1 - fer) = 1 - (1 - fer)(1 - \alpha p_{AP})(1 - \beta)^{N-1} \quad (4)$$

这里  $p_{APfail}$ 、 $p_{STAFail}$  表示某一时刻, AP 和 STA 数据传输失败的概率;  $\alpha$ 、 $\beta$  代表某一时刻, AP 和 STA 退避计数器为 0 时, 将要接入信道的概率。

定义:

$P_A\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\}$  表示在 AP 处, 当时刻为  $t$ ,  $s(t) = i_0, b(t) = k_0$  时,  $t+1$  时刻  $s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1$  的概率。将其简化为  $P_A\{i_1, k_1 | i_0, k_0\}$ , 可以得到 AP 的马尔科夫模型的非空转移概率:

$$\begin{aligned} P_A\{i, k | i, k+1\} &= 1 \quad k \in [0, W_{AP,i} - 2], i \in [0, m] \\ P_A\{0, k | i, 0\} &= (1 - p_A)P_{AP} / W_{AP,min} \quad k \in [0, W_{AP,min} - 1], i \in [0, m] \\ P_A\{i, k | i-1, 0\} &= p_A * P_{AP} / W_{AP,i} \quad k \in [0, W_{AP,i} - 1], i \in [0, m] \\ P_A\{i, k | i, 0\} &= (1 - P_{AP}) / W_{AP,i} \quad k \in [0, W_{AP,i} - 1], i \in [0, m] \\ P_A\{0, k | m, 0\} &= 1 / W_{AP,min} \quad k \in [0, W_{AP,min} - 1] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中第一个公式表示, 在一个空闲时隙来临时, AP 的退避计数器减 1; 第二个公式表示, 当 AP 发送数据成功后, 从  $[0, W_{AP,min}]$  随机选取一个

整数作为退避计数器的值，重新启动新的退避过程；第三个公式表示，AP 发送数据失败，在竞争窗口增大一倍，从  $[0, W_{AP,i}]$  范围中选取一个整数，将其存入退避计数器中，重新启动退避计数；第四个公式表示，AP 竞争到信道，但是按照概率发送的原则，并未发送数据，而是重新根据当前竞争窗口，从  $[0, W_{AP,i}]$  范围中选取一个整数，将其存入退避计数器中，重新启动退避计数；第五个公式表示当 AP 的重传次数达到最大重传次数值时，无论数据是否发送成功，都会回到初始状态，准备发送新的数据帧。STA 的转移概率与 AP 类似。

定义：

$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_A \{s(t) = i, b(t) = k\}$ ,  $k \in [0, W_{AP,i} - 1]$ ,  $i \in [0, m]$  为当时刻  $t$  趋向无穷时，AP 处于状态  $s(t) = i, b(t) = k$  的概率，可得：

$$b_{i,0} = p_A \times P_{AP} \times b_{i-1,0} + (1 - P_{AP})b_{i,0} \rightarrow \quad (6)$$

$$b_{i,0} = p_A \times b_{0,0}, 0 < i < m$$

$$b_{i,k} = \frac{W_{AP,i} - k}{W_{AP,i}} (p_A \times P_{AP} \times b_{i-1,0} + (1 - P_{AP})b_{i,0}) \rightarrow$$

$$b_{i,k} = (W_{AP,i} - k) / W_{AP,i} \times b_{i,0} \quad (7)$$

$$0 < i < m, 0 < k < W_{AP,i}$$

由于模型中所有状态概率之和为 1，联立公式

(1)、(6)和(7)，可以得到：

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_{AP,i}-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_{AP,i}-1} \frac{W_{AP,i} - k}{W_{AP,i}} \quad (8)$$

通过对公式(8)求解，可以得到 AP 第一次发送数据时退避计数器为 0 的概率  $b_{0,0}$  的表达式：

$\alpha$  为网络中 AP 在某一时刻退避计数器为 0 的概率，由前面分析可知， $\alpha$  可以表示为当退避阶数

为  $i$  时，退避计数器为 0 时的概率之和，即：

$$b_{0,0} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2(1-2p_A) \times}{W_{AP,\min}(1-(2p_A)^{m+1})(1-p_A) +} \rightarrow \\ \leftarrow \frac{(1-p_A)}{(1-2p_A)(1-p_A^{m+1})} \quad m \quad m' \\ \frac{2(1-2p_A) \times}{W_{AP,\min}(1-(2p_A)^{m+1})(1-p_A) + (1-2p_A)(1-p_A^{m+1}) +} \rightarrow \\ \leftarrow \frac{(1-p_A)}{W_{AP,\min} 2^{m'} p_A^{m'+1} (1-2p_A)(1-p_A^{m-m'})} \quad m \quad m' \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^m b_{i,0} = \frac{1-p_A^m}{1-p_A} b_{0,0} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2(1-2p_A) \times}{W_{AP,\min}(1-(2p_A)^{m+1})(1-p_A) +} \rightarrow \\ \leftarrow \frac{(1-p_A^m)}{(1-2p_A)(1-p_A^{m+1})} \quad m \quad m' \\ \frac{2(1-2p_A) \times}{W_{AP,\min}(1-(2p_A)^{m+1})(1-p_A) + (1-2p_A)(1-p_A^{m+1}) +} \rightarrow \\ \leftarrow \frac{(1-p_A^m)}{W_{AP,\min} 2^{m'} p_A^{m'+1} (1-2p_A)(1-p_A^{m-m'})} \quad m > m' \end{array} \right. \quad (10)$$

与之类似，设  $c_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{STA} \{s(t) = i, b(t) = k\}$ ,  $k \in [0, W_{AP,i} - 1]$ ,  $i \in [0, m]$  为当时刻  $t$  趋向无穷时，STA 处于状态  $s(t) = i, b(t) = k$  的概率，通过与 AP 相似的推导过程，可以得到 STA 第一次发送数据时退避计数器为 0 的概率  $c_{0,0}$  表达式如下：

$\beta$  为网络中 STA 在某一时刻退避计数器为 0 的概率，则  $\beta$  可以表示为当退避阶数为  $i$  时，退避计数器为 0 的概率之和，表达式如下：

$$c_{0,0} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2(1-2p_{STA})(1-p_{STA})}{W_{STA,\min}(1-(2p_{STA})^{m+1})(1-p_{STA}) + (1-2p_{STA})(1-p_{STA}^{m+1})} \quad m \quad m' \\ \leftarrow \frac{(1-p_{STA})}{W_{STA,\min} 2^{m'} p_{STA}^{m'+1} (1-2p_{STA})(1-p_{STA}^{m-m'})} \quad m > m' \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^m C_{i,0} = \frac{1-p_{STA}^m}{1-p_{STA}} C_{0,0} = \begin{cases} \frac{2(1-2p_{STA})(1-p_{STA}^m)}{W_{STA,\min}(1-(2p_{STA})^{m+1})(1-p_{STA})+(1-2p_{STA})(1-p_{STA}^{m+1})} & m = m' \\ \frac{2(1-2p_{STA}) \times}{W_{STA,\min}(1-(2p_{STA})^{m+1})(1-p_{STA})+(1-2p_{STA})(1-p_{STA}^{m+1})+} \leftarrow & \\ \leftarrow \frac{(1-p_{STA}^m)}{W_{STA,\min} 2^{m'} p_{STA}^{m+1} (1-2p_{STA})(1-p_{STA}^{m-m'})} & m > m' \end{cases} \quad (12)$$

在推导出了 AP 和 STA 在某一时刻退避计数器为 0 的概率  $\alpha$ 、 $\beta$  的表达式后, 由式(3)、(10)可知, 当其他网络参数确定时,  $\alpha$  的表达式中, 未知的参数有  $P_{AP}$  和  $\beta$ 。由式(4)、(12)可知,  $\beta$  的表达式中, 有  $\alpha$  这个未知参数。如何得到这些参数的取值, 是对 IEEE802.11 进行性能分析时要解决的问题。通过上下行带宽公平性分析和优化求解, 可以得到这些参数的计算公式。

## 2.2 算法性能分析

假设网络中同时存在  $M$  个下行流和  $N$  个上行流, 每个 STA 产生一个上行流, 那么当 AP 与 STA 竞争信道时, AP 成功发送的概率即  $M$  个下行流成功发送数据的概率为:

$$U_{AP} = \alpha(1-\beta)^N P_{AP} \quad (13)$$

单个 STA 竞争信道成功的概率为:

$$U_{STA} = \beta(1-\alpha P_{AP})(1-\beta)^{N-1} \quad (14)$$

设上行带宽和下行带宽的分配系数为  $Q$ , 则如果  $Q$  越大, 则上行流与下行流之间的公平性越差, 当  $Q=1$  时, 每个上行流和下行流的带宽分配达到了相对公平。在这里, 当所有数据流的帧长和发送速率相同时, 分配系数  $Q$  可以表示为单个上行流与单个下行流的吞吐量之比, 表达式如下:

$$Q = \frac{U_{AP} / M}{U_{STA}} = \frac{\alpha(1-\beta)^N P_{AP} / M}{\beta(1-\alpha P_{AP})(1-\beta)^{N-1}} \quad (15)$$

只有当  $Q=1$  时, 无线网络中每个上行流和下行流带宽才达到相对公平, 因此本文后续试验中分配系数  $Q$  的数值取为 1。根据式(15)可以得到:

$$P_{AP} = \frac{M\beta}{\alpha - \alpha\beta + M\alpha\beta} \quad (16)$$

由式(16)可知, 当  $\alpha$ 、 $\beta$  满足式(16)时即可满足上下行带宽公平分配条件。将式(16)代入(4)中可

得:

$$p_{STA} = 1 - (1 - p_{STAfail})(1 - fer) = \frac{1 - (1 - fer)(1 - \beta)^N}{1 - \beta + M\beta} \quad (17)$$

联立(12)、(17), 给定  $W_{STA,\min}$ , 即可求得 STA 在某一时刻退避计数器为 0 的概率  $\beta$  的取值。根据 IEEE802.11b 协议, 设  $W_{STA,\min}=31$ , 随着误码率及上下行流数目的变化, 无线站点 STA 在某一时刻退避计数器为 0 的概率  $\beta$  的取值大小变化如图 4 所示。

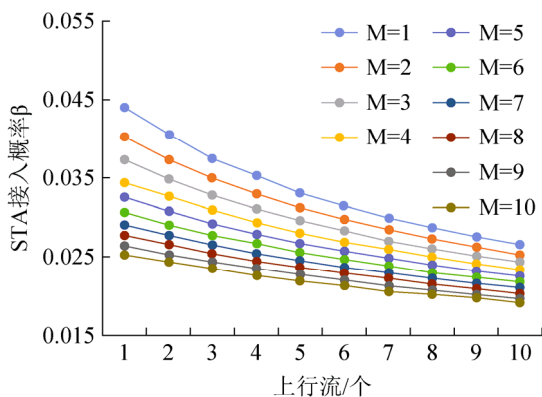
当上行流个数和下行流个数一定时, 无线链路中的误码率会影响无线节点接入信道的概率。当误码率增大时, STA 接入信道的概率随之降低; 当上行流和误码率一定时, 随着下行流数目的增大, STA 的接入概率逐渐减小; 当下行流和误码率一定时, 随着上行流数目的增大, STA 的接入概率也会逐渐减小。联立(3)、(10), 给定  $W_{STA,\min}$ , 即可求得 AP 在某一时刻退避计数器为 0 的概率  $\alpha$  的取值。

求得  $\alpha$ 、 $\beta$  后, 将其值带入(16)中, 由于公式(16)中  $P_{AP}$  是在带宽分配系数  $Q=1$  的情况下计算得来的, 即上行流和下行流的带宽分配此时达到了相对公平。因此由公式(16)可求得当网络中有  $M$  个上行流和  $N$  个下行流, 误码率为 BER, AP 和 STA 最小竞争窗口为  $W_{STA,\min}$  和  $W_{AP,\min}$  时, 可保证上下行带宽公平性的发送概率  $P_{AP}$  的取值。

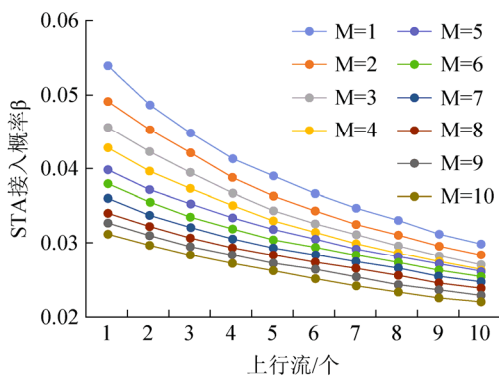
由于 FOUN 算法采用概率发送机制, 为了提高其接入概率, 其最小竞争窗口要小于 STA 的最小竞争窗口。因此, 根据大量实验的分析, 本算法设 AP 处的最小竞争窗口  $W_{AP,\min}$  为 7, 不同误码率和不同上下行流条件下, AP 端的  $P_{AP}$  取值如图 5 所示。

图 5 中, 横坐标代表上行流的数目, 纵坐标代

表在上下行流数目一定时,  $P_{AP}$  的取值。可以看出, 当误码率一定和下行流数目一定时, 随着上行流数目的增大, AP 的接入概率会逐渐降低, 这是由于上行流数目增大时, 为了保证上下行带宽的公平分配, 需要降低 AP 的发送概率, 提高上行流的带宽分配比例。当上行流和下行流数目一定时, 随着误码率的增大, AP 的发送概率会逐渐降低。当无线网络中的上下行流数目达到一定限度时,  $P_{AP}$  会大于 1, 此时, 由于网络中无线节点较多, 业务负担较重, 信道竞争激烈, AP 无法维持较高的发送概率, 从而会导致上下行带宽失衡。当上下行流数目一定时, 误码率越大,  $P_{AP}$  的值越小, 这是由于误码率增大时, AP 和 STA 的发送概率同时降低, 当多个 STA 发送数据时, 误码率对于 STA 的影响较大, 为平衡上下行吞吐量, 需要降低  $P_{AP}$  的取值, 降低 AP 的发送概率, 达到上下行带宽的公平分配。

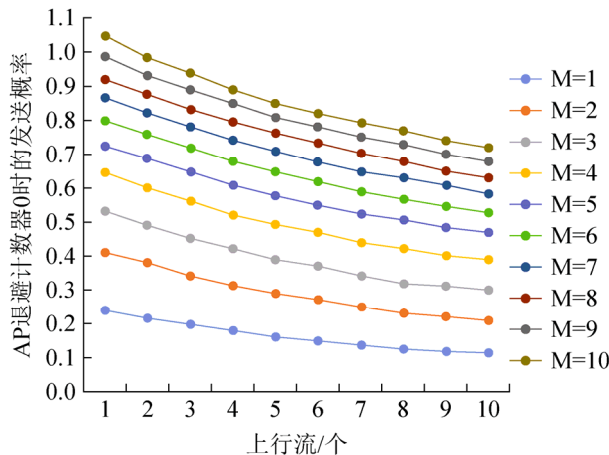


(a) BER=0.00001

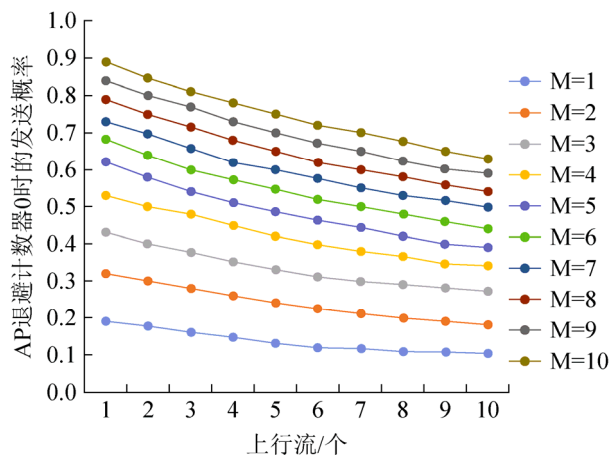


(b) BER=0.0001

图4 不同误码率对 STA 的接入概率  $\beta$  的影响  
Fig. 4 The impact of different error rates on the access probability  $\beta$  of STA



(a) BER=0.00001



(b) BER=0.0001

图5 不同误码率和上下行流数目对  $P_{AP}$  的影响

Fig. 5 The impact of different error rates and numbers of upflow and downflow to  $P_{AP}$

至此, 便可通过修改 AP 处的 MAC 层协议, 设置参数  $P_{AP}$ , 达到上下行带宽公平分配的优化目标。

本算法的目标就是求 AP 处的参数  $P_{AP}$ , 达到整个网络上下行带宽公平分配的目的。由于无法直接计算出这个参数的取值, 只能通过先求出满足上述优化条件的  $\alpha$ 、 $\beta$  的取值, 通过  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $P_{AP}$  的关系来计算这个参数。先通过上下行带宽公平分配的限制条件, 求得  $P_{AP}$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  的关系, 再将这个关系式带入  $\alpha$ 、 $\beta$  的表达式中, 将这些表达式中的参数  $P_{AP}$  消去, 之后得到的  $\alpha$  表达式仅与  $\beta$  有关,  $\beta$  表达式可以直接求出, 再通过  $\beta$  求出  $\alpha$ , 这样的  $\alpha$ 、 $\beta$  关系必然满足优化目标, 通过式(5)~(15)求出  $P_{AP}$ , 最后在 AP 处进行设置。

### 3 仿真实验

网络拓扑如图 6 所示, STA 代表有线端, WSTA1 和 WSTA 2 分别表示两个无线接收端。STA 与 AP 之间通过有线链路连接, WSTA1 和 WSTA 2 采用改进的 WLAN802.11 接入 AP, FODU 算法部署在 AP 处, 仿真实验在 NS2 中完成。

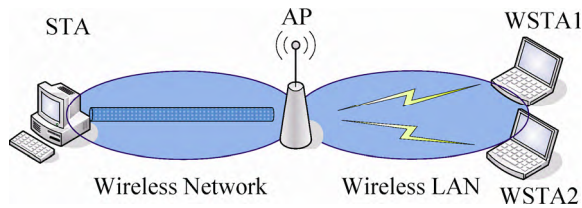


图 6 网络拓扑图  
Fig.6 Network topology

将 FODU 加入网络仿真模型中, 所有的上下行流都为 CBR(恒定比特率)流, 发送速率为 1M/s, 各个发送站点的发送队列非空。传输层采用 TCPveno 协议, 数据链路层采用 IEEE802.11 协议, 智能 AP 和 STA 采用 DCF 基本接入机制发送数据, 具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 FODU 智能 AP 仿真参数  
Tab.1 Simulation parameters of FODU AP

| 参数              | 数值                    |
|-----------------|-----------------------|
| SIFS            | 10 $\mu$ s            |
| DIFS            | 50 $\mu$ s            |
| Slot time       | 20 $\mu$ s            |
| $CW_{AP, min}$  | 7                     |
| $CW_{STA, min}$ | 32                    |
| m               | 5                     |
| m'              | 5                     |
| 数据速率            | 1 M/s                 |
| 基本速率            | 1 M/s                 |
| MAC 帧头部大小       | 272 bit               |
| 数据分组长度          | 1 024 bit             |
| RTS Threshold   | 2 345 Bytes           |
| BER             | 0, 0.000 01, 0.000 03 |
| 上行流数目           | 6, 7, 8               |
| 下行流数目           | 1~8                   |

FODU 智能 AP 优化算法的实现需要实现不同的无线网络发送机制, 因此, 需要修改 NS2 的源

代码。其中涉及到的文件为: IEEE802.11.cc 和 IEEE802.11.h 两个文件。

1. 在 IEEE802.11.h 中添加相关的变量和函数, 用于实现不同的无线网络发送机制。相关变量及函数如表 2 所示。

表 2 FODU 智能 AP 关键变量及函数  
Tab.2 Key variables and functions of FODU AP

| 名称  | 说明                                    |
|---|---------------------------------------|
| mpFlag  | FODU 智能 AP 和普通 AP 的标志                 |
| p_ap  | FODU 智能 AP 发送数据的概率 $P_{AP}$           |
| double STA_count<br>(double value);               | 计算 STA 的某一时刻发送概率 $\beta$              |
| double AP_count<br>(double value, double sta_p)   | 计算 AP 的某一时刻发送概率 $\alpha$              |
| double AP_p_count<br>(double value, double sta_p) | 根据传入的参数计算 FODU 智能 AP 发送数据的概率 $P_{AP}$ |
| void probability()                                | 调用概率发送机制                              |
| void pro_calculate()                              | 计算调用 FODU 智能 AP 计算概率的相关函数             |

2. 在 IEEE802.11cc 中实现相关计算函数, 相关计算函数如表 2 所示, 最后在发送数据之前, 根据标志变量 mpFlag 决定是否采用概率发送机制。

1) 在数据发送开始时, 向 IEEE802.11.cc 中传入 mpFlag 参数, 用于标识 FODU 智能 AP 和普通 AP。在 FODU 智能 AP 上的 IEEE802.11cc 初始化时, 首先调用 pro\_calculate(), 用于计算相关概率。

2) pro\_calculate() 首先调用 STA\_count() 函数计算 STA 的发送概率  $\beta$ , 然后再调用 AP\_count() 计算 AP 的发送概率  $\alpha$ 。之后, 将计算得到的  $\alpha$ 、 $\beta$  传入函数 AP\_p\_count() 中, 最终得到 FODU 智能 AP 发送概率  $p_{ap}$ 。

3) 当 FODU 智能 AP 接收到有线端的数据并需要进行转发时, 调用 check\_pktTx() 函数。在 check\_pktTx() 函数中, 采用 0-10000 的随机数来模拟概率, 当得到的随机数符合概率发送条件时, 发送数据, 如果不符合概率发送条件, 则重新进入退避过程。



4) 当 FODU 智能 AP 调用 `recv()` 函数接收到无线端的数据时, 重新调用 `pro_calculate()` 计算 FODU 智能 AP 发送概率  $p_{ap}$ 。如果 FODU 智能 AP 发送概率发生变化, 则更新  $p_{ap}$ 。

衡量网络上下行带宽公平性指标  $f$ 、上行流平均吞吐量  $T_u$ 、下行流平均吞吐量  $T_d$  的计算公式如下:

$$f = \max(T_u, T_d) / \min(T_u, T_d)$$

$$T_u = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M T_u(i) \quad (18)$$

$$T_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_d(i)$$

式中:  $T_u$  和  $T_d$  代表上行流和下行流的平均吞吐量;  $M$  和  $N$  分别代表上行流与下行流的数目。公平性指标  $f > 1$ , 当公平性指标  $f$  越接近于 1, 公平性越好,  $f$  越大, 公平性越差。仿真结束后, 得到误码率为 0, 0.000 01, 0.000 03 时, 普通 AP 和 FODU 智能 AP 下的公平性指标对比, 如表 3~5 所示。上下行流平均吞吐量如表 6 所示。表中  $M$  代表下行流数目,  $N$  代表上行流数目, 中间的取值代表公平性指标  $f$ 。

在不同的上下行数据流数目和不同误码率条件下, 普通 AP 和 FODU 智能 AP 优化算法的平均吞吐量如图 7 所示。通过表 3~5 可以看出, FODU 智能 AP 优化算法相对于传统 IEEE802.11 协议具有更好的上下行带宽公平性, 且在不同误码率条件下, FODU 智能 AP 优化算法的加入在一定程度上提高了链路吞吐量, 这是由于 FODU 智能 AP 优化算法的竞争窗口较低, 可以以更高的概率接入信道, 从而提高了链路的吞吐量。

表 3 普通 AP 和 FODU 智能 AP 的公平性(BER=0)  
Tab.3 Fairness between ordinary AP and FODU AP(BER=0)

| M | 普通 AP 上行流数目(N) |       |       | FODU 智能 AP 上行流数目(N) |      |      |
|---|----------------|-------|-------|---------------------|------|------|
|   | 6              | 7     | 8     | 6                   | 7    | 8    |
| 1 | 1.59           | 29.85 | 19.65 | 1.38                | 1.17 | 1.13 |
| 2 | 15.47          | 9.06  | 1.417 | 1.15                | 1.12 | 1.18 |
| 3 | 5.42           | 1.17  | 9.47  | 1.29                | 1.20 | 1.11 |
| 4 | 1.36           | 9.26  | 18.88 | 1.09                | 1.22 | 1.15 |
| 5 | 6.51           | 26.39 | 14.51 | 1.30                | 1.18 | 1.10 |
| 6 | 19.90          | 12.65 | 2.26  | 1.34                | 1.22 | 1.36 |
| 7 | 9.90           | 4.07  | 2.75  | 1.25                | 1.32 | 1.45 |
| 8 | 3.38           | 3.48  | 1.51  | 1.06                | 1.00 | 1.03 |

表 4 普通 AP 和 FODU 智能 AP 的公平性(BER=0.00001)  
Tab.4 Fairness between ordinary AP and FODU AP (BER=0.000 01)

| M | 普通 AP 上行流数目(N) |       |       | FODU 智能 AP 上行流数目(N) |      |      |
|---|----------------|-------|-------|---------------------|------|------|
|   | 6              | 7     | 8     | 6                   | 7    | 8    |
| 1 | 1.50           | 19.66 | 13.06 | 1.07                | 1.06 | 1.08 |
| 2 | 9.04           | 5.85  | 1.54  | 1.26                | 1.04 | 1.09 |
| 3 | 3.46           | 1.49  | 6.90  | 1.01                | 1.03 | 1.23 |
| 4 | 1.36           | 6.02  | 9.35  | 1.02                | 1.52 | 1.27 |
| 5 | 4.23           | 8.99  | 9.71  | 1.05                | 2.60 | 1.35 |
| 6 | 8.88           | 7.42  | 2.99  | 1.24                | 1.94 | 1.10 |
| 7 | 5.68           | 2.33  | 8.26  | 1.66                | 1.27 | 1.61 |
| 8 | 2.59           | 6.61  | 2.01  | 1.19                | 1.27 | 1.50 |

表 5 普通 AP 和 FODU 智能 AP 的公平性(BER=0.00003)  
Tab.5 Fairness between ordinary AP and FODU AP (BER=0.000 03)

| M | 普通 AP 上行流数目(N) |       |       | FODU 智能 AP 上行流数目(N) |      |      |
|---|----------------|-------|-------|---------------------|------|------|
|   | 6              | 7     | 8     | 6                   | 7    | 8    |
| 1 | 2.37           | 18.9  | 3.05  | 1.28                | 1.17 | 1.04 |
| 2 | 8.68           | 1.37  | 1.02  | 1.04                | 1.05 | 1.10 |
| 3 | 1.23           | 1.60  | 1.40  | 1.08                | 1.17 | 1.23 |
| 4 | 1.18           | 2.69  | 1.08  | 1.26                | 1.24 | 2.28 |
| 5 | 1.87           | 1.15  | 9.92  | 1.26                | 1.07 | 1.34 |
| 6 | 1.56           | 7.56  | 10.21 | 1.07                | 1.48 | 1.41 |
| 7 | 5.78           | 13.23 | 6.43  | 1.38                | 3.56 | 1.15 |
| 8 | 11.42          | 5.21  | 3.96  | 1.01                | 1.01 | 1.05 |

表 6 普通 AP 和 FODU 智能 AP 上下行平均吞吐量(M=6,N=2)  
Tab.6 Average throughput of up flow and down flow between ordinary AP and FODU AP(M=6,N=2)

| 误码率 (BER) | 普通 AP 上行平均吞吐量(kbit/s) | 普通 AP 下行平均吞吐量(kbit/s) | FODU 智能 AP 上行平均吞吐量(kbit/s) | FODU 智能 AP 下行平均吞吐量(kbit/s) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0         | 241.537               | 15.616 69             | 117.9                      | 99.9                       |
| 0.000 01  | 224.046               | 24.770 81             | 73.3                       | 92.466                     |
| 0.000 02  | 80.034                | 66.482 31             | 78.4                       | 93.466                     |
| 0.000 03  | 219.645               | 25.297 94             | 84.7                       | 88.066                     |

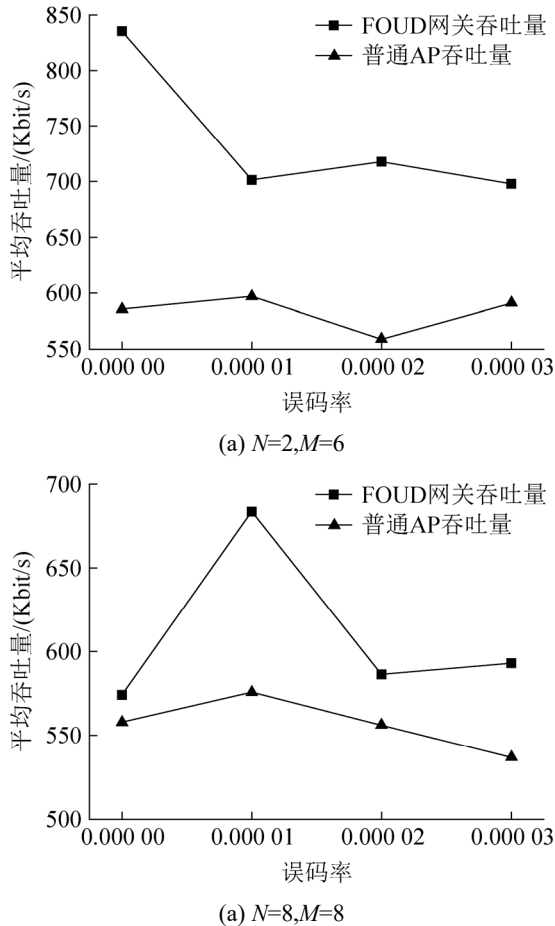


图 8 普通 AP 与 FOUd 智能 AP 上下行数据流平均吞吐量  
Fig.8 Average throughput of up flow and down flow between ordinary AP and FOUd AP

## 4 结论

本文针对传统 IEEE802.11 在无线网络中无法保持上下行带宽公平性的问题,提出一种 MAC 层 AP 优化算法即 FOUd 智能 AP 优化算法。首先,在 AP 处引入概率发送机制;其次,利用差错信道下的马尔科夫链对 AP 和 STA 分别进行数学分析,通过数学建模和相关公式推导,以上下行带宽公平分配为优化目标,得到保证上下行带宽公平分配的参数取值。大量的实验结果表明 FOUd 智能 AP 可有效改善上下行流公平性,提高了链路吞吐量以及网络性能。

## 参考文献:

- [1] K Jun. Differentiating Contention Window for Fairness of Uplink and Downlink in Error-Prone IEEE 802.11 WLAN[J]. *IEEE Transactions on Communications* (S0916-8516), 2013, E96.B(2): 660-663.
- [2] W S Lim, D W Kim, Y J Suh. Achieving Fairness Between Uplink and Downlink Flows in Error-Prone WLANs[J]. *Communications Letters IEEE*(S1089-7798), 2011, 15(8): 822-824.
- [3] Wang C. Achieving per-flow and weighted fairness for uplink and downlink in IEEE 802.11 WLANs [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*(S16871472), 2012(1):1-9.
- [4] Yuichi Nisida, Hui Wang, Hiroaki Matsumoto, et al. Retransmission Control in a TCP with a Performance Enhancing Proxy[R]. Phoenix Park, Korea:International Conference on Advanced Communication Technology 2008: 1881-1886.
- [5] Abeysekera BAHS, Matsuda T, Takine T. Dynamic Contention Window Control to Achieve Fairness between Uplink and Downlink Flows in IEEE 802.11 WLANs[J]. *Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, 11(15): 2109-2114.
- [6] Priya S S, Murugan K. Enhancing TCP Fairness in Wireless Networks using Dual Queue Approach with Optimal Queue Selection[J]. *Wireless Personal Communications* (S0929-6212), 2015, 1-14.
- [7] 张兵, 高泽华, 文柳, 等. IEEE 802.11 中上下行带宽公平分配机制[J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(2): 126-130.  
Zhang B, Gao Z H, Wen L, et al. Study on fair bandwidth allocation scheme between uplink and downlink flows under IEEE802.11 [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(2): 126-130.
- [8] Chen H. Revisit of the Markov model of IEEE 802.11 DCF for an error-prone channel[J]. *IEEE Communications Letters*(S1089-7798), 2011, 15(12):1278-1280.
- [9] Peng X, Jiang L, Xu G. Performance analysis of RTS/CTS scheme in WLAN with the impact of bit errors[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2012, 12(13):1165-1174.