

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.02.011

# 基于模糊控制和 MIMO 的 ad hoc 网络 STDMA 协议

李建东, 蔡雪莲, 张 瑜, 张 珍

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对应用于 ad hoc 网络的空间时分多址接入(Space Time Division Multiple Access, STDMA)协议不能动态进行时隙分配以及不能充分利用空闲时隙的问题,提出了一种基于模糊控制和多输入多输出(MIMO)技术的多址接入(MIMO-STDMA)协议.该协议经过模糊逻辑控制器中模糊规则的判断和计算,实现给网络中移动节点动态地分配时隙数目和帧长度.移动节点采用预约跟 MIMO 的流控技术,在分配时隙中利用全天线发送,在未分配时隙中基于载波侦听进行预约发送.仿真结果表明,MIMO-STDMA 比 STDMA 能达到更高的网络吞吐量和时隙利用率.

**关键词:** ad hoc 网络;空间时分多址接入;多输入多输出;模糊控制

**中图分类号:** TN820.1<sup>+</sup>5; TP273<sup>+</sup>.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)02-0060-07

## STDMA protocol based on fuzzy control and MIMO for ad hoc networks

LI Jiandong, CAI Xuelian, ZHANG Yu, ZHANG Zhen

(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In the traditional Space Time Division Multiple Access (STDMA) protocol, the time slot is not allocated dynamically and the idle slots potentially exist. To address the issue, based on fuzzy logic control and Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology, a novel STDMA protocol (MIMO-STDMA) is proposed. In MIMO-STDMA, the number of slots and the frame length allocated to a mobile node are determined dynamically through the judgment and calculation based on regulation of the fuzzy controller. Utilizing the reservation and stream control gain of MIMO, in the allocated slots, a node employs full antennas to transmit data. On the contrary, in the unallocated slots the node reserves the transmission by 4-way handshaking with the carrier sense. Finally, simulations are conducted to evaluate the performance of the proposed protocol. The results show that the MIMO-STDMA outperforms the STDMA in terms of throughput and slot utilization.

**Key Words:** ad hoc networks; STDMA; MIMO; fuzzy control

空间时分多址接入协议(Space Time Division Multiple Access, STDMA)是移动 ad hoc 网络的一种无线信道访问控制的机制,通过让多个移动节点共享相同时隙来增加移动 ad hoc 网络的容量<sup>[1]</sup>.很多研究学者提出了针对 ad hoc 网络 STDMA 的时隙分配算法<sup>[2-5]</sup>.但是这些算法都是针对理想的移动 ad hoc 网络,没有将 ad hoc 网络的节点移动性及每个移动节点的时隙利用率考虑进去,所以不能根据每个移动节点当前状态来动态进行时隙分配,在现实应用中具有局限性.

为了克服这种局限性,在 ad hoc 网络 STDMA 时隙分配算法中引入模糊控制的概念.基于模糊控制的媒体访问控制(Media Access Control, MAC)协议可解决链路通信方面存在的不确定或不可预测问题<sup>[6-7]</sup>,即利用 MAC 层的确定参数,通过模糊控制器中的模糊逻辑算法,将模糊预测转化为较为准确的预测.如文

收稿日期:2012-09-21

网络出版时间:2012-11-16

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(61231008);国家自然科学基金面上项目(61271176);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2009CB320404);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0852);国家重点实验室专项基金资助项目(ISN1102003);高等学校创新引智计划资助项目(B08038)

**作者简介:**李建东(1962-),男,教授,E-mail: jldi@mail.xidian.edu.cn.

**网络出版地址:**http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20121116.0924.201302.74.028.html

献[6]利用模糊控制器产生无法准确预测的通信模型来完成对网络的设计和性能评估,具体做法是将 MAC 层的链路错误比特率作为模糊逻辑控制器的输入,链路拥塞度作为输出,以此来获得链路可信度. 基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法是在发送节点的竞争区域中,将节点与中心节点的距离和时隙利用率作为模糊逻辑控制器的输入,将分配给该节点的时隙数目增减作为模糊逻辑控制器的输出,根据模糊控制器的模糊规则,来动态控制分配给节点的时隙数目. 这样,一方面解决了时隙分配的盲目性;另一方面,可以随时动态调整分配给节点的时隙数,适应于 ad hoc 网络中节点移动的不确定性.

虽然基于模糊控制的 STDMA 协议有效避免了冲突,但节点并没有充分利用未分配给其的时隙,会造成时隙的浪费. 针对该问题,在基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法基础上,结合了 MIMO 技术和预约机制. 移动节点利用 MIMO 的流控技术,在动态分配给其的时隙中,节点利用全部数目的天线进行发送<sup>[8-9]</sup>;在未分配给其的时隙中,若此时节点载波侦听到信道空闲,则节点利用四次握手对信道进行预约发送<sup>[10]</sup>,更好地提高了时隙利用率,同时避免了冲突,提高了网络吞吐量.

## 1 模糊逻辑简介

早在 1974 年, Mamdani 首先将模糊理论成功地应用于控制锅炉和蒸汽机,这标志着模糊控制的诞生. 模糊控制目前在工业过程控制、智能化家用电子产品,自动化仪器仪表器、计算机以及通信等领域得到迅速发展. 模糊逻辑是模糊控制领域中一项重要技术,其主要思想是利用“隶属度”和“隶属函数”来描述差异的中间过度,处理和刻画人类生活中无法用精确的数学语言描述的模糊现象. 对于模型未知或不能确定的描述系统,以及强非线性、大滞后的控制对象,应用模糊集合和模糊规则进行推理,表达过渡性界限或定性知识经验,模拟人脑方式,实行模糊综合判断,推理解决常规方法难于对付的规则型模糊信息问题<sup>[11]</sup>.

图 1 是模糊控制器框图,主要由模糊化器、模糊推理块、解模糊化器这 3 部分组成. 其中,模糊化器主要是为便于控制器的设计和实现,将控制器的输入按其标准化原则限制在规定的范围之内,同时将输入值转换为模糊量. 模糊推理块构成了控制器的核心部分,根据模糊输入量和语言控制规则,通过模糊逻辑推理决定输出量的一个分布函数. 最后,解模糊化器将控制器输出量的分布函数规范化和非模糊化转化为输出量.

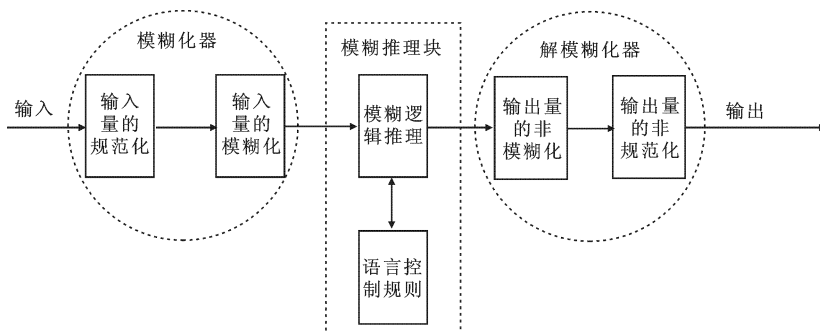


图 1 模糊控制器示意图

在 ad hoc 网络中,因为无线信道的复杂性及网络拓扑的动态变化,简单的数学模型已无法精确描述网络中某一参数的动态变化,而模糊逻辑善于处理不精确信息或模型的特征,使其在通信中渐渐得到应用. 模糊逻辑在 ad hoc 网络路由协议设计方面应用较为广泛<sup>[12-14]</sup>. 利用模糊逻辑可以实现对 MAC 退避窗口大小及竞争窗口大小的动态调整<sup>[15]</sup>,同时对 ad hoc 网络中其他参数进行优化. 例如文献[16]设计了一种 Type-2 模糊逻辑系统,通过该系统预测 MANET 中分组传输时延,并依据预测值调整传输功率,从而提高能量利用率和网络吞吐量,该文献将物理层和数据链路层结合在一起考虑,利用跨层方法,收集并交换层之间相互影响的重要信息及数据,然后在每层中利用自适应的协议及算法来优化整个网络的性能.

## 2 网络模型

无线通信中通信装置发送的信号通过一定传输距离之后,就会逐渐衰减,STDMA 就是利用这种信号逐

渐减弱以至于对其他使用相同信道资源的无线通信信号只有很小干扰的特性,在空间和时间上对时隙进行复用.基于以上特性,如果在一个区域里两个移动节点使用相同的时隙通信会导致数据包碰撞,那么这个区域就称为一个竞争区域.本文中对网络模型的定义来自于文献[17]中对 ad hoc 网络模型的假设和定义.假设 ad hoc 网络中有  $M$  个移动节点,网络中每个节点表示为  $i \in M$ . 根据公式(1)来判断移动节点  $i$  和  $j$  是否能够直接通信<sup>[17]</sup>.

$$\text{SNR}(i, j) = P_i / (L_b(i, j)N_r) \geq \gamma_0, \quad (1)$$

其中,  $P_i$  表示节点  $i$  的传送速率,  $L_b(i, j)$  表示节点  $i$  和  $j$  之间传送功率在路径上的损失,  $N_r$  表示热噪声效应. 整个网络的所有节点稀疏地分布在空间中,即网络中包括不同的竞争区域. 如果网络区域  $A$  和  $B$  中任意移动节点之间的信噪比(SNR)小于某个阈值  $\gamma_0$ , 那么网络区域  $A$  和  $B$  则可以认为是竞争区域,通过空时分复用,网络区域  $A$  和  $B$  中的节点可以用相同的时隙来通信. 图 2 给出了一个有 16 个移动节点的 ad hoc 网络,是本文基于模糊控制 STDMA 协议的 ad hoc 网络拓扑示意图. 网络区域  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是竞争区域. 在相同竞争区域的移动节点不能用相同时隙通信,例如同属竞争区域  $A$  的移动节点 4、5、6、7、8 不能用相同的时隙来进行通信. 而分别在不同竞争区域的节点可以共用相同的时隙,例如分别处于竞争区域  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的移动节点 4、9、14 可以共用相同的时隙来进行通信.

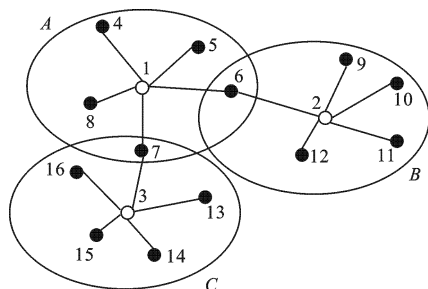


图 2 网络拓扑示意图

每个竞争区域中都有一个惟一被称为中心服务器的节点,与该竞争区域中每个移动节点在地理位置上相对固定.为了各个竞争区域的中心服务器节点之间的干扰影响达到最小,中心服务器节点之间要达到一定的距离.图 2 中的节点 1、2、3 就是满足条件的中心服务器节点.本文中心服务器节点的主要作用是根据该区域各个移动节点当前移动状态和时隙利用率,动态决定分配给各移动节点的时隙数和帧长度.

### 3 基于模糊控制和 MIMO 的 STDMA 协议

ad hoc 网络中基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法及具体过程,如节点间距离和时隙利用率的隶属度和隶属函数见文献[17]的详细描述.该算法是在 STDMA 的基础上,为了更好地适应 ad hoc 网络拓扑的灵活性,将节点间距离和时隙利用率两个量作为模糊集合,输入模糊逻辑控制器,经过模糊控制器的模糊规则的判断和计算,实现根据移动节点的当前移动状态和时隙利用率动态地决定分配给网络中移动节点的时隙数目以及帧长度.这样,分配给节点的时隙是无冲突的,而且时隙分配结果会随着拓扑变化而发生变化.

根据基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法,对图 2 所示网络拓扑中的节点进行时隙分配.在不同竞争区域的节点可以分配在同一时隙(见图 3),例如节点 4、9、13.在同一竞争区域的节点分配在不同的时隙,例如节点 4、5、6、7.其中,时隙  $n$  的个数随竞争区域中节点个数的增多而相应地增加.

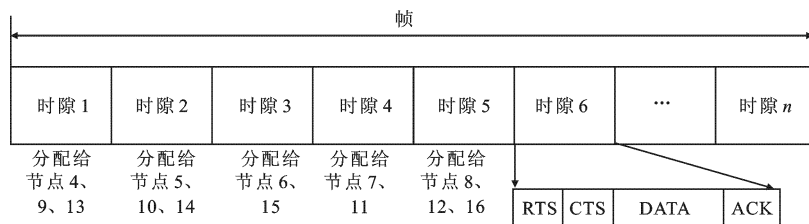


图 3 基于模糊控制给节点分配时隙的示意图

虽然基于模糊控制的 STDMA 协议有效避免了冲突,但节点并没有充分利用未分配给其的时隙,会造成时隙浪费.例如,节点 4 在时隙 1 中没有业务发送,在同一竞争区域的节点 5、6、7、8 如果有业务发送,可以载波侦听空闲后,引用 RTS/CTS 预约机制占用该时隙,这样时隙利用率就大大提高了.而且如果能有效结合 MIMO 技术,通过利用 MIMO 技术的流控,也会大大提高网络吞吐量. MIMO 的流控技术即在存在干扰链路时,为提高网络综合利用率,允许一条链路仅使用它最大可能流数 ( $m$ ) 中的一个子集时 ( $k < m$ ),发射功率就可以只分布在这  $k$  个最强的数据流上,如果有  $x$  条干扰链路,最大允许发送数据流数目  $k = \lfloor m/x \rfloor$

( $\lfloor m/x \rfloor$  表示  $m/x$  的值取整), 以此来抑制干扰.

### 3.1 协议描述

MIMO-STDMA 保留基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法, 同时结合 MIMO 技术. 假定发送节点  $U$  和接收节点  $V$ , 网络中节点天线数目为  $M$ . 主要思想是, 先利用基于模糊控制的 STDMA 给网络中节点分配时隙, 再采用 MIMO 的流控技术, 在分配给节点  $U$  的时隙中, 节点  $U$  用全天线发送; 在未分配给节点  $U$  的时隙中, 若此时节点  $U$  载波侦听到信道空闲, 则节点  $U$  利用四次握手对信道进行预约发送. 每个时隙分成准备发送 (Ready To Send, RTS), 确认发送 (Clear To Send, CTS), 数据发送和应答 (ACKnowledge, ACK) 4 个阶段. 预约分组有 RTS 分组、3 种类型的 CTS 分组和 ACK 分组.

RTS 分组通知发送需求和发送端最大容许发送数据流数. 为使系统通过量最大, 容许发送的最大数据流数等于发送节点处天线数目. 发送 RTS 之前要发送一个训练序列, 用于接收节点获得信道状态信息, 并通过 CTS 分组反馈回发送端.

控制分组 CTS 分成  $CTS_1$ 、 $CTS_2$ 、 $CTS_3$  3 种分组类型, 且分别用于 3 种情况: 接收节点只收到一个 RTS 分组; 接收节点收到  $l$  (其中  $M > l > 0$ ) 个邻节点发送给它的 RTS 分组, 并且没有收到发送给其他节点的 RTS 分组; 接收节点不仅接收到  $l$  个邻节点发送给它的 RTS 分组, 并且接收或侦听到发送给其他节点的 RTS 分组.

ACK 分组是接收节点在成功接收到数据分组之后, 向发送节点回复的确认控制分组. 每个发送节点或接收节点仅以一个数据流交换 RTS/CTS/ACK 分组, 这样有利于接收节点冲突分解. 下面具体介绍该协议操作步骤.

首先根据基于模糊控制的 STDMA 时隙分配算法, 对网络中的节点进行时隙分配. 具体是在发送节点的竞争区域中, 利用中心节点采集移动节点与中心节点的距离和时隙利用率, 作为模糊逻辑控制器的输入, 将分配给该节点的时隙数目增减作为模糊逻辑控制器的输出. 移动节点距离中心节点越近, 时隙利用率越高, 则增加分配给该节点的时隙数目, 反之, 则减少分配给该节点的时隙数目. 在分配给发送节点的时隙, 接收节点对发送节点的预约回复  $CTS_1$  分组, 发送节点用全部天线数发送数据. 若节点想占用未分配给它的时隙, 首先载波侦听信道忙闲, 如果侦听到信道是忙状态, 节点保持静默; 如果侦听到信道是空闲, 节点发送 RTS 分组对信道进行预约. 如果接收节点仅接收到一个发送给它的 RTS 分组, 就向发送节点回复一个  $CTS_1$  分组, 通知发送节点可以并行发送  $M$  个数据流给接收节点; 如果接收节点只接收到  $l$  个邻节点发送给它的 RTS 分组, 则向发送节点发送一个  $CTS_2$  分组, 通知发送给它 RTS 的节点可以各自并行发送  $\lfloor M/l \rfloor$  (其中,  $\lfloor M/l \rfloor$  表示取不大于  $M/l$  的最大整数, 下同) 个数据流给接收节点; 如果接收节点不仅接收到  $l$  个邻节点发送给它的 RTS 分组并且接收或侦听到发送给其他节点的 RTS 分组, 说明接收节点受到其他传输干扰, 然而接收节点并不能确定其他传输是否预约成功, 也不能确定这些传输要使用几个数据流, 所以为了减少传输干扰同时提高通过率, 接收节点向发送给它 RTS 分组的每个邻节点回复一个  $CTS_3$  分组, 通知它们各发送一个数据流给接收节点.

总之, 接收节点根据收到的 RTS 分组情况决定回复给发送节点的 CTS 分组类型. 发送节点根据接收到的 CTS 分组类型选择天线数目进行数据发送. 接收节点成功接收到数据后, 向发送节点回复 ACK 分组, 发送节点收到 ACK 分组表明在此时隙成功发送完毕, 等待下一个时隙再开始发送. 否则本次传输失败, 节点等待下一个时隙再发起传输. 描述发送节点  $U$  和接收节点  $V$  操作过程的伪代码如下:

(1) 发送节点  $U$  的操作过程伪代码:

```

1  time slot allocation by fuzzy control (distance to center node, utilization of time slot);
2  while (time slot  $n$ ) {
3    If ( $n =$  time slot allocated to node  $U$ ) node  $U$  sends data to node  $V$  uses all antennas;
4    else {
5      listens channel;
6      if (channel is free) node  $U$  sends RTS to node  $V$  to reserve channel;
7      else node  $U$  keeps quiet;
    }
8  waits CTS;
9  switch (CTS) {

```

```

10 case CTS1: node U sends data to node V uses all antennas;
11 case CTS2: node U sends data to node V uses  $\lfloor M/l \rfloor$  antennas;
12 case CTS3: node U sends data to node V uses 1 antennas;
    }
13 waits ACK;
14 n++;
    }

```

(2) 接收节点  $V$  的操作过程伪代码:

```

1 if (node V received RTS only for itself and heard nothing) {
2   if (RTS==1) node V replies CTS1 to node U;
3   else node V replies CTS2 to all nodes who send RTS to it; }
4 else node V replies CTS3 to inform all nodes who send RTS to it of using 1 antenna to send data;
5 waits data;
6 if (node V received data successfully) node V replies ACK to transmitting node;
7 else failed transmitting;

```

通过伪代码所描述的过程可见,不仅能够利用模糊控制对移动 ad hoc 网络中的节点进行动态的空分复用时分隙分配,提高了时分隙利用率,而且利用 MIMO 技术的流控和多包接收能力,在节点所分配的时分隙中,理论上可以获得  $M$  倍原来的网络吞吐量;在节点未分配的时分隙中,引入载波和预约机制占用空闲信道,进一步提高了网络吞吐量和时分隙利用率。

### 3.2 协议实现分析

笔者假设采用 MIMO-STDMA 的网络拓扑结构,如图 2 所示。其中,同一竞争区域内的一跳节点范围内的节点是相互通信的,两跳节点范围内是相互侦听的,网络中所有节点的天线数目为 4。时分隙分配帧结构参见图 3。下面,以竞争区域  $A$  中的时分隙 1 中的传输情况为例,来具体分析 MIMO-STDMA 的操作过程。

因为时分隙 1 是分配给节点 4 的,所以节点 4 在此时分隙传输无冲突,用 4 根天线并行全速发送数据包。节点 5、6、7 在时分隙 1 开始阶段载波侦听到信道忙碌,为避免冲突,不进行数据发送。

图 4 是节点在未分配给它的时分隙并侦听到信道空闲后,进行传输。此时节点 4 在分配给它的时分隙 1 中没有数据包发送,信道空闲。图 4(a)表示目的节点收到多个发送给它的 RTS 分组。节点 5、7 有数据要发送给节点 6,在时分隙 1 开始阶段载波侦听到信道空闲,开始进行预约。目的节点 6 收到了 2 个发给自己的 RTS 分组,分别给发送节点 5、7 回复一个 CTS<sub>2</sub> 分组,通知它们可以同时分别并行发送 2 个数据流给节点 6。节点 6 成功接收到数据分组以后,在 ACK 阶段给节点 5、7 回复 ACK 分组。该过程中利用到了 MIMO 多天线的多包接收和抑制干扰的特性,节点 6 可以接收和分离来自不同节点的数据流。图 4(b)表示接收节点收到发给其他节点的 RTS 分组和接收节点只收到 1 个发给自己的 RTS 分组的传输示意图。节点 5、7 分别有数据发送给节点 6、8,在时分隙 1 的开始阶段载波侦听到信道空闲,开始进行预约。此时,对于目的节点 6,不仅收到节点 5 发给自己的 RTS 分组,同时也收到节点 7 发给节点 8 的 RTS 分组,目的节点 6 给发送节点 5 一个 CTS<sub>3</sub> 分组,通知节点 5 用一个数据流来发送。而对于目的节点 8,不仅到节点 7 发给自己的 RTS 分组,并且侦听到节点 5 发给节点 6 的 RTS 分组,因此给发送节点 7 回复一个 CTS<sub>3</sub> 分组,通知节点 7 发送一个数据流。

## 4 性能仿真

用 MATLAB 仿真平台分别对在 MIMO-STDMA 和 STDMA 下的系统平均吞吐量和时分隙利用率进行了仿真。每链路使用 4 根发射天线和 4 根接收天线。经过模糊控制后会根据不同竞争区域内的用户数给每个用户分配  $n$  个固定时分隙,完成一次所有用户传输的时分隙称为一个时分隙周期。笔者只分析一个竞争区域内在不同协议下的平均系统吞吐量和时分隙利用率。

图 5(a)到图 5(c)给出了每用户有不同次数的传输机会时,MIMO-STDMA 和 STDMA 下的平均系统吞吐量。图中横坐标为每时分隙同时发起传输的用户数,纵坐标为平均每时分隙的吞吐量(字节/时分隙)。仿真时假

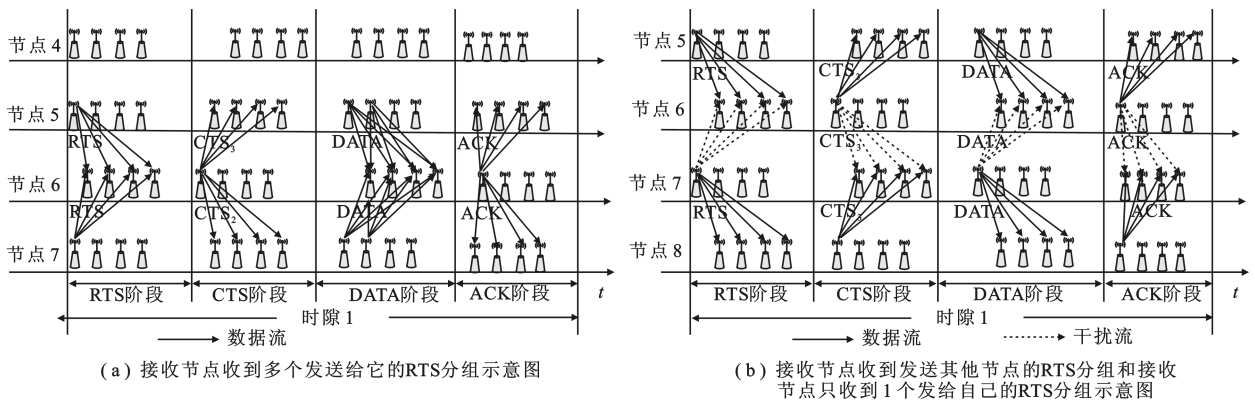
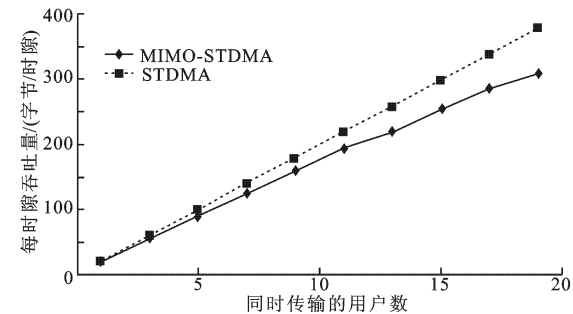
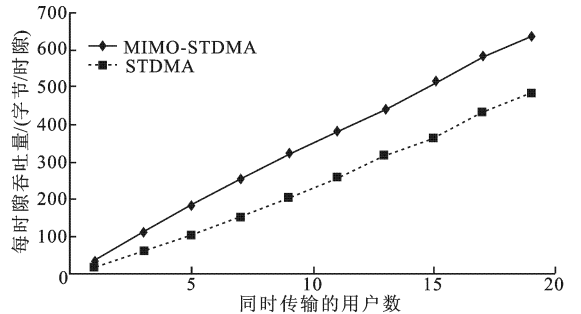


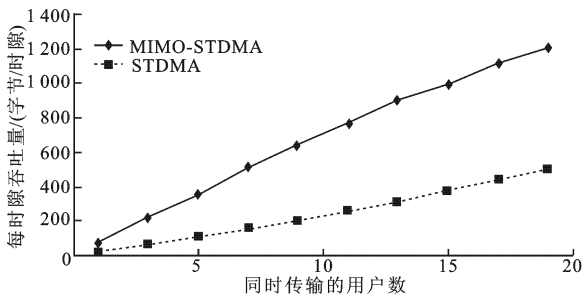
图 4 节点在未分配给它的时隙发起传输示意图



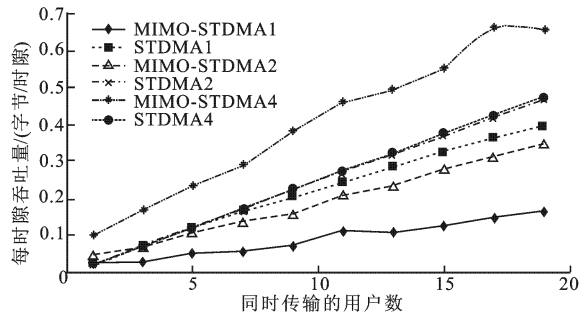
(a) 每用户有一次传输机会下的系统平均吞吐量对比示意图



(b) 每用户有两次传输机会下的系统平均吞吐量对比示意图



(c) 每用户有四次传输机会下的系统平均吞吐量对比示意图



(d) 每用户有不同次数传输机会下的系统平均吞吐量对比示意图

图 5 每用户有不同传输机会数下的系统平均吞吐量和时隙利用率对比

设竞争区域内共 40 个用户,每个流分组大小为 200 Byte,以下仿真均为此假设.图 5(a)给出了不同传输用户数下,每用户只有一次分组传输机会时的平均系统吞吐量.从图中可以看出,STDMA 的平均吞吐量略大于 MIMO-STDMA 的平均吞吐量,这是由于 STDMA 给每个用户分配固定时隙,允许至多两次传输机会.当每用户只有一次机会发送分组时,刚好可以在各自的时隙上无冲突地采用全天线发送.MIMO-STDMA 允许用户在未分配给它的时隙上采用竞争的方式进行传输,由于冲突及流控的存在,导致实际发送的流数小于 4,系统平均吞吐量下降.图 5(b)和图 5(c)分别给出了每用户有 2 次和 4 次分组传输机会下的平均系统吞吐量.可以看出,MIMO-STDMA 的平均系统吞吐量高于 STDMA 的平均系统吞吐量,这是由于 STDMA 只能在固定分配时隙上传输,若用户第 2 次传输不发生在用户分配时隙上,则不能完成第 2 次传输,所以吞吐量较低.MIMO-STDMA 允许非当前时隙的用户通过竞争获得资源,完成数据传输,因此用户的两次传输可以通过分配的或竞争到的时隙来完成,吞吐量较高.在同时传输用户数为 20,每用户有 2 次和 4 次分组传输机会的情况下,MIMO-STDMA 的平均系统吞吐量分别高于 STDMA 约 30%和 140%.

比较图 5(b)和图 5(c)可看出,用户需要发送的机会越多,系统平均吞吐量越大,但并不随用户发送机会(负载)无限增长.这是因为对于 STDMA 来说,用户只在固定时隙上传输,当分配给用户的时隙都被充分利用时,系统平均吞吐量就保持基本稳定,未分配给用户的时隙不会因为用户发送机会数增多而得到利用.对于 MIMO-STDMA,当用户发送机会数达到一定的值时,碰撞会比较频繁,从而导致系统吞吐量达到饱和.

图 5(d)给出了同时发送用户数不同的情况下,每用户发送机会为 1、2、4 时对应的时隙利用率,其中横坐标是同时发起传输的用户数,纵坐标是被利用的时隙与一个时隙周期中总时隙数的比值. 图中, MIMO-STDMA<sub>*i*</sub> 中的 *i* 表示每用户时隙周期内的发送机会数. 可以看出,每用户发送机会为 1、2 时 STDMA 的时隙利用率高于 MIMO-STDMA. 这并不是说明 STDMA 的效率高,而是因为网络轻负载时,由于固定时隙分配 STDMA 在 *m* 个时隙完成传输,而 MIMO-STDMA 允许在空闲时隙传输,因此 *n* 个时隙就能完成相同的数据量,其中  $n < m$ . 而随着用户发送机会数逐渐增加,固定时隙分配的时隙利用率并没有提高(因为只能在固定时隙传输),而 MIMO-STDMA 则可以利用空闲时隙进行数据传输,从而时隙利用率变高. 如图中所示,当同时用户数为 20,每用户发送机会为 4 次时, MIMO-STDMA 的时隙利用率比 STDMA 约高 30%.

上述仿真是一个时隙周期内有固定数目用户进行数据传输. 图 6 给出了每时隙随机有 *k* 个用户传输数据,这样更能从平均意义上衡量不同协议的平均性能. 图 6(a)给出了不同数目的用户随机发起传输时,系统平均每时隙的吞吐量. 对于 STDMA 来说,用户只在固定时隙上传输,最好的情况是每时隙随机发起传输的 *k* 个用户中,都有一个被分配在当前时隙上传输,此时平均每时隙吞吐量最大,最坏情况是 *k* 个用户没有一个被分配在当前时隙传输,此时系统平均吞吐量为零. 而对于 MIMO-STDMA, *k* 个用户可以通过竞争获得未分配给它的当前时隙完成传输,因此平均吞吐量高于 STDMA. 图 6(b)给出了对应的平均时隙利用率,对于 STDMA,若 *k* 个用户没有被分配在当前时隙,则本时隙空闲. 对于 MIMO-STDMA, *k* 个用户通过竞争获取资源进行传输,每时隙都被充分利用. 无论是系统平均吞吐量还是时隙利用率,从平均意义上看 MIMO-STDMA 性能更优.

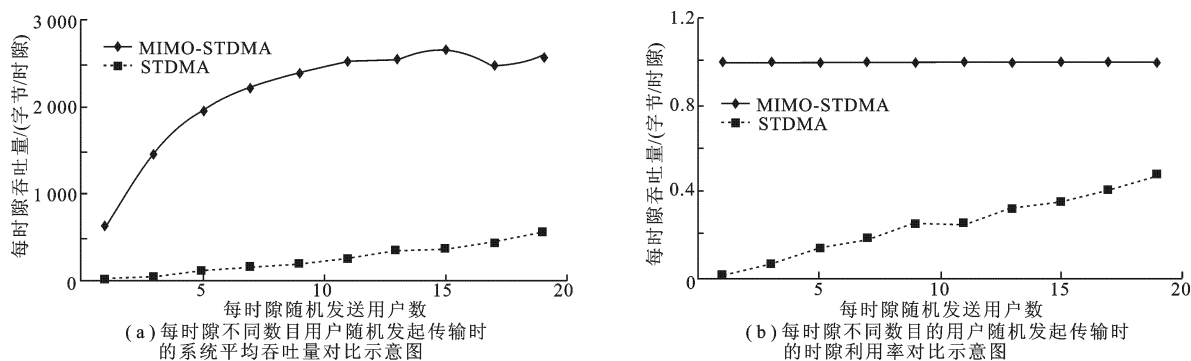


图 6 每时隙不同数目的用户随机发起传输时的系统平均吞吐量和时隙利用率对比

## 5 结束语

在 ad hoc 网络 STDMA 时隙分配算法的基础上,提出了一种新的基于模糊控制和 MIMO 技术的 STDMA 协议. 该协议引入模糊控制的概念,给网络中所有节点动态分配时隙,适应 ad hoc 网络中节点移动的不确定性. 并且结合预约机制和 MIMO 的流控技术,节点在动态分配给其的时隙中进行无冲突传输,在未分配给自己的时隙中根据预约采用流控技术发送数据,提高了时隙利用率和网络吞吐量,优化了网络性能. 最后通过仿真结果证实:当竞争区域内有 20 个节点同时发起传输,且每个节点有 4 次传输机会时, MIMO-STDMA 的平均系统吞吐量高于 STDMA 约 140%,时隙利用率高于 STDMA 约 30%;当每个时隙有不同数目的用户随机发起传输时, MIMO-STDMA 的性能在平均意义上亦优于 STDMA.

## 参考文献:

- [1] Alireza S S, Kamran A. Developing a Fuzzy Logic Based Multicast Routing Protocol[J/OL]. [2012-10-10]. <http://www.engineeringvillage.com/controller/servlet/Controller?SEARCHID=171c52cb13d1529885dM301eproduct2con1&CID=quickSearchDetailedFormat&DOCINDEX=1&database=7&format=quickSearchDetailedFormat&tagscope=&displayPagination=yes>.
- [2] Nelson R, Kleinrock L. Spatial TDMA: a Collision-free Multihop Channel Access Protocol[J]. IEEE Trans on Communications, 1985, 33(9): 934-944.
- [3] Ramaswami R, Parhi K K. Distributed Scheduling of Broadcasts in a Radio Networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Communications. Washington: IEEE Computer Society, 1989: 497-504. (下转第 193 页)