

## 多接口协作的高吞吐多信道 MAC 协议

邓清勇<sup>1,2</sup>, 裴廷睿<sup>2</sup>, 李哲涛<sup>2,3</sup>, 刘安丰<sup>4</sup>, 邓亚风<sup>5</sup>

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 湘潭大学信息工程学院, 湖南 湘潭 411105;

3. 东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室, 江苏 南京 211189;

4. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 5. 韩国亚洲大学计算机工程学院, 韩国 水源 443-749)

**摘要:** 多接口多信道 MAC 协议存在接口利用率不高等问题。为此, 提出 MIC-MAC 协议在多接口节点模型中增加虚拟 MAC 层, 利用单接口的成功握手信息建立源-目标节点之间所有接口同步传输的关系, 提高了吞吐量和控制帧效率。另外, 成功传输的节点选取当前信道作为下次传输的决策信道可以有效改善隐藏终端问题。实验结果表明在单跳网络中, 与 MIMC-SMAC、IEEE 802.11 协议相比, 吞吐量分别提高了 100%~200%; 在多跳网络中有效改善了碰撞和隐藏终端问题。

**关键词:** 多接口; 多信道 MAC 协议; 吞吐量; 隐藏终端

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## High-throughput multi-channel MAC protocol with multi-interface cooperation

DENG Qing-yong<sup>1,2</sup>, PEI Ting-rui<sup>2</sup>, LI Zhe-tao<sup>2,3</sup>, LIU An-feng<sup>4</sup>, DENG Ya-feng<sup>5</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

3. Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China;

4. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

5. Department of Computer Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea)

**Abstract:** Low utilization of the interface always exists in multi-interface multi-channel (MIMC) medium access protocol. Therefore, the multi-interface cooperating (MIC) mechanism was proposed. A virtual MAC layer was designed in multi-interface node and multi-interface cooperative mechanism through one successful handshake of single interface to establish the synchronous transmission relationship between source-destination nodes all interface and data channel groups, thus improving the throughput and efficiency of control frame. Furthermore, nodes with successful transmission choose the current channel set as decision-making channels of the next transmission, which can effectively reduce the impact of hidden terminal. The simulation results of MIC-MAC protocol show that the throughput has increased by 100% to 200% compared with MIMC-SMAC protocol and IEEE 802.11 in single hop network, the collision and hidden terminal problem have also been greatly optimized in multi hop network.

**Key words:** multi-interface, multi-channel MAC protocol, throughput, hidden terminal

收稿日期: 2016-10-15; 修回日期: 2017-05-31

通信作者: 李哲涛, liztchina@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61379115, No.61602398, No.61372049, No.61672447); 湖南省教育厅一般基金资助项目 (No.15C1330); 湖南省重点学科建设基金资助项目; 计算机网络和信息集成教育部重点实验室 (东南大学) 基金资助项目 (No.K93-9-2016-09)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61379115, No.61602398, No.61372049, No.61672447), Hunan Provincial Education Office General Project (No.15C1330), The Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province, Key Laboratory of Computer Network and Information Integration Program (Southeast University), Ministry of Education (No.K93-9-2016-09)

## 1 引言

IEEE 802.11 协议被广泛应用于 ad hoc 网络的建设, 但是单接口单信道通信的链路容量已经难以满足无线 ad hoc 网络中多媒体设备的高吞吐量需求, 因此, 如何提升网络的吞吐量成为当前亟待解决的问题。传统的单信道协议 (如 IEEE 802.11) 应用于多信道网络, 会出现多信道隐藏终端和交汇 (rendezvous) 问题, 需要加以改进才能适用, 例如, 在单接口多信道环境下通过增加同步机制能有效解决隐藏终端问题。另外, 采用多接口多信道通信方式能大幅提高吞吐量和改善延时性能, 并且可以缓解聋效应的影响, 是当前无线 ad hoc 网络提高吞吐量的主要技术手段。

近年来, 学者们提出了多种 MAC 协议来支持多信道之间的通信。文献[1]中提及的 MMAC 协议通过动态分配网络信道给每个接口, 同时预留了传输时间以便在合适的时隙通信。该协议要求节点的所有接口必须同步, 增加了协议开销, 降低了数据通信效率。在此基础上该文献进一步提出了 MIMC-SMAC 协议, 通过接口划分和信道协调方法在时空上提高接口和信道的利用率, 在提高吞吐量的同时解决隐藏终端和交汇问题。文献[2]通过改进传输协议来降低端到端时延, 提高传输数据的可靠性。这些为本文 MAC 协议的改进设计提供了思路。

当前, 多接口多信道网络通常采用交汇和公共控制信道 (CCC, common control channel) 这 2 种通信方式。交汇方式指所有节点的接口随机切换信道并发送控制帧, 当源节点和目标节点恰好同时处在同一信道时, 则能建立传输关系<sup>[3,4]</sup>。该方式能够有效实现较低信道质量下的通信, 其缺点是存在较严重的接入延迟和隐藏终端等问题。不同于交汇方式, 公共控制信道方式<sup>[5]</sup>是利用一个固定的信道传输控制帧, 其他信道则作为数据信道。节点在 CCC 上发送控制帧, 握手完毕后再切换到数据信道发送数据。其优点是可以消除聋效应并降低接入延迟, 但存在的问题是网络性能受 CCC 质量和拥塞情况的影响较大。因此, 如何提高控制帧的效率来降低 CCC 的拥塞, 以及如何改变握手机制来降低节点对 CCC 质量的依赖度成为多接口多信道通信技术领域的研究热点。

在文献[6]中, 大部分接口采用动态调整占空比的方式进行通信, 该方式可以缓解 CCC 的拥塞程度, 但是却限制了吞吐量。在文献[7]中, 作者利用链式网络的特点, 对 CTS 进行复用, 即 CTS 在应答上一

跳 RTS 的同时, 作为下一跳的 RTS。这种方式可有效降低控制帧的发送数量, 从而减轻 CCC 的拥塞程度, 然而该方法仅适于链式网络。文献[8]将一个接口固定为只发送控制帧的接口, 其他接口作为数据接口使用, 该方式降低了骤发的控制帧数量, 并且节点能够根据自身负载情况建立各个数据信道的虚拟载波计时, 从中选取最优信道, 以此解决隐藏终端问题。在文献[7]中, 将接口划分为控制帧接口和数据接口, 前者仅在 CCC 上发送控制帧, 后者仅在数据信道传输数据和 ACK。通过划分接口, 仅让单个控制帧接口竞争信道, 这可以有效降低 CCC 拥塞。同时, 通过交换节点各自的等待时间列表可实现最优数据信道的选取, 并额外广播 RES 帧以解决隐藏终端问题。采用单个控制帧接口存在的问题是导致节点接入信道的接入延时增加; 另外, 将接口功能进行严格区分无疑会降低该接口的利用效率。文献[8]同样对接口进行了功能划分, 与前者区别是其控制帧接口在成功握手后会转变为数据接口, 同时通过划分竞争周期和传输周期, 并在不同周期中通过切换接口类型来提高接口利用效率, 从而达到提高吞吐量的目的。上述所有方法都是一个接口为多个接口竞争信道, 而完成一次成功的信道竞争仅能建立一对接口间的传输关系, 其效率与单接口一致, 并未真正解决接口间协同工作的问题。除此之外, 文献[1,8,9]通过发送除 RTS/CTS 外的控制帧处理隐藏终端问题, 这种方式会增加 CCC 的负担。文献[10]利用多信道预约机制提高了网络的吞吐量, 但未考虑多接口节点的情况。文献[11]对目前已有的多接口多信道网络中的信道分配算法进行了分析, 指出数据分组调度 (PS) 方法能提高信道利用率, 从而提高网络的吞吐量, 但都未涉及 MAC 协议的修改。文献[12]采用 NS2 设计了一个灵活通用的多接口多信道模型, 通过增加 MIMC 控制子层来管理接口和信道, 同时在数据分组属性中增加接口和信道信息实现均匀调度, 提高了接口负载均衡和信道的公平性, 适用于异构节点通信, 但接口和控制帧效率并没有明显提升。文献[13]设计了虚拟接口层 (第 2.5 层) 对多接口负载和资源进行管理, 综合考虑链路状态路由信息、网络流和信道分配, 跨层优化实现数据分组调度, 但 MAC 队列始终存在于各个接口, 并非集中于第 2.5 层进行管理。综上, 在多接口多信道通信中, 接口的利用效率和信道分配会影响网络的性能, 为此, 本文针对无线 ad hoc 网络设计

了多接口协作协议。所有接口均能竞争信道并发送数据，每个接口单独对应一个默认信道进行控制帧交换，可避免过多控制帧集中在某一信道发送而导致拥塞。与公共控制信道方式不同的是，该默认信道既可传输数据，又可传送控制帧。其具体实现方式如下。当节点某个接口成功进行控制帧交换后，其他所有接口即使没有进行控制帧交换也会同时切换到预约的信道与同一目标节点进行数据传输，即源节点的所有接口同时与目标节点所有接口进行一一对应的数据传输。通过某一个接口的一次控制帧交换，为所有接口建立有效传输，可以极大地提高控制帧握手效率。并且，本协议在预约的信道上成功发送数据后，每个接口会记录当前通信成功的信道，并作为下一次传输数据信道的决策信道，以此降低隐藏终端的影响。

本文的主要贡献如下。

1) 提出了增加虚拟 MAC 层的多接口节点模型，通过将各个接口的 MAC 层子队列统一移至虚拟 MAC 层后依据长度最长优先原则在各接口均匀分配数据分组，消除负载不均衡的现象。

2) 在虚拟 MAC 层中设计了新的握手机制：通过任意一个接口成功与目标节点握手即可建立该节点与目标节点所有接口的数据传输，提高了控制帧握手效率。

3) 针对多信道多接口无线 ad hoc 网络，提出基于组策略的信道分配方法，同时优先考虑源节点上一次成功传输的信道为决策信道，降低多信道网络中隐藏终端的影响。

4) 设计了新的控制帧效率衡量指标，即能够成功建立传输关系的总数量与尝试通过控制帧握手的总次数的比值。传输关系表示每一个接口能够成功完成一次数据传输，不与传输数据量的多少相关，一次成功传输则记为 1。以此衡量控制帧建立传输关系的效率，反映适合多接口中控制帧与数据传输的效率关系。本文中涉及的中英文缩写对照如表 1 所示。

## 2 MIC-MAC 协议

MIC-MAC 协议旨在提高多信道无线 ad hoc 网络吞吐量的同时解决隐藏终端、信道交汇以及接口利用效率的问题，因此本文描述 MIC-MAC 协议时重点关注：接口分配、信道分配和接入控制。本协议的设计是基于以下假设。

表 1 中英文缩写对照

缩写	英文全称	中文注释
MIC	multi-interface cooperation	多接口协作
MMAC	multi-channel MAC	多信道 MAC
MIMC	multi-interface multi-channel	多接口多信道
SMAC	synchronization-based media access control	基于同步的媒介访问控制
RRPS	round-robin packet scheduling	轮询分组调度
MPDU	MAC protocol data unit	MAC 协议数据单元
CCC	common control channel	公共控制信道
RTS	request to send	请求发送
CTS	clear to send	清除发送
ACK	acknowledge	应答
nic	network interface card	网卡
NAV	network allocation vector	网络分配向量
SIFS	short inner frame spacing	短帧间间隔
DIFS	distribute inner frame spacing	分布式帧间间隔
CCW	channel coordination window	信道竞争窗口

1) 无线节点的天线模式为全向天线，在不发生碰撞的情况下，节点发出的消息可以被天线通信半径中同一个信道的所有节点正确接收并解析。

2) ad hoc 网络中所有节点感知到的彼此正交的  $n$  个信道索引号一致，均为  $1, 2, \dots, n$ 。同时，信道完全等价，均可以双向等价地进行 MPDU 的传输。

3) 每个节点都采用多接口，接口数相同且少于信道数。每个接口配备一个没有同步功能的半双工收发器，而且具有动态切换信道的功能，可以在  $224 \mu\text{s}$  内切换至任意信道。

### 2.1 多接口节点模型

在多接口节点<sup>[14]</sup>中，每个节点拥有  $k$  个接口，以  $nic_1, nic_2, \dots, nic_k$  进行编号区分。层次模型结构一般如图 1(a)所示，每个  $nic$  包含了物理层和 MAC 层，且拥有一个独立的 MAC 队列，与网络层直接连接。由于网络层封装后的数据分组会随机分配给不同的接口以及各个接口中的 MAC 层队列不能共享，导致数据分组无法从  $nic_1$  中的 MAC 队列调度到  $nic_k$  中的 MAC 队列，即出现负载不均衡，甚至单个接口零负载而停止工作的情况，因此极大降低了接口利用率。

为此，本文在该节点模型中的 MAC 层与网络层之间构建虚拟 MAC 层来实现多接口协同工作，如图 1(b)所示。将原属于各个接口的 MAC 队列统

一移至虚拟 MAC 层合并为一个队列，其中，MAC 队列分为多个 MAC 子队列，每个子队列中存储着对应不同目标节点的数据分组，不同流的负载情况对应不同的队列长度。由于虚拟 MAC 层并非硬件实现，因此不具备如 MAC 地址等一般的 MAC 属性，但增加了分组队列处理和接口协同功能。

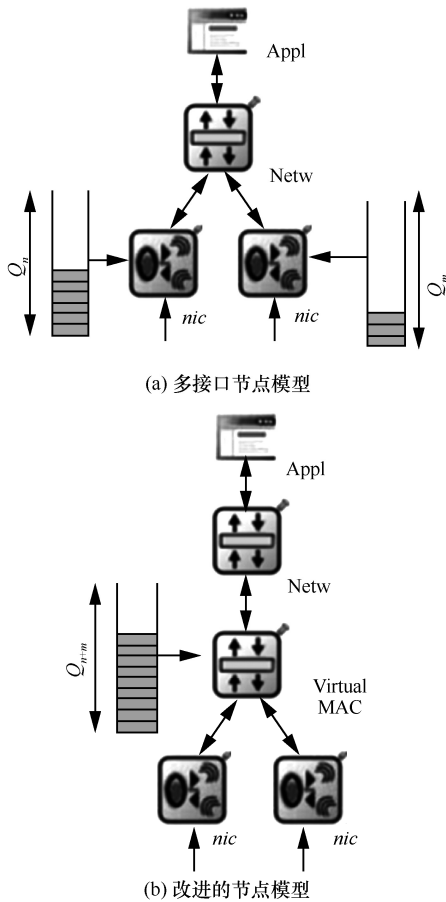


图 1 MIC-MAC 的节点模型

1) 分组队列处理机制。当虚拟 MAC 层中存在某一目标节点的 MAC 队列长度大于 1 时，意味着有多个数据分组需要发送至同一目标节点。为了缓解网络拥塞，网络层优先处理密集流，因此，在 MAC 层竞争信道过程中优先考虑将队列长度最长的子队列所对应节点作为目标节点。所有接口共享同一 MAC 队列，假设有  $m$  个数据分组要分配到  $k$  个接口，按接口编号从大到小顺序均匀分配数据分组，剩余数据分组在下一轮进行传输，该方法可以消除多接口间的负载不均衡现象。

2) 接口协同工作机制。通过一次握手即建立源节点与目标节点之间多个接口的传输关系。当数据分组的的目标节点相同，并且源节点和目标节点都有

相同数目接口能够同时传输时，通过任意一个接口的成功握手，使所有接口都能一一对应地进行一次数据传输，其他接口无需再次发送控制帧即可与同一目标节点通信。

## 2.2 MIC-MAC 协议中信道竞争和数据交换

在多信道 ad hoc 网络环境中，节点可以使用多个信道通信，这使信道接入控制变得更加灵活。MIC-MAC 协议首先将网络中节点感知到的可用信道划分为  $\frac{n}{k}$  组，若  $\frac{n}{k}$  不为整数，则剩余的信道划分为一组；然后再将信道组分为默认信道组和数据信道组。

**默认信道组：**从  $n$  个信道中选取  $k$  个信道构成默认信道组，网络初始化阶段预设后，网络中所有节点均能利用它进行控制帧交换。

**数据信道组：**除默认信道组以外的信道组集合，各节点利用数据信道组进行数据分组交换。决策信道组是指根据信道决策算法选出的数据信道组，当所有数据信道组均被占用时，节点可选择默认信道组作为决策信道组进行数据分组传输，但会影响协议性能。

### 2.2.1 多接口协作的握手机制

MIC-MAC 协议的多接口协作握手机制旨在解决握手效率低下的问题，以此来提高网络吞吐量。MIC-MAC 协议中节点初始化 NAV 列表与 IEEE 802.11 协议的 NAV 相似，包含通过接收 RTS、CTS 获取的各个信道的使用状况，但不同之处在于 MIC-MAC 协议 NAV 列表记录的是信道被占用后释放的时间戳，而 IEEE 802.11 协议的 NAV 记录的是信道持续占用时间。图 2 描述了基于 MIC-MAC 协议的 3 接口节点的信道协调和数据交换过程，节点的接口按以下步骤以协作的方式工作。

**步骤 1** 各个接口按编号对应信道索引号的规则切换至预分配的默认信道，同时启动退避计时器开始竞争信道，图 2 用不同灰度代表不同的退避时间。

**步骤 2** 当某个接口退避计时为 0 时，其他接口暂停退避计时。节点选取最长 MAC 子队列对应的节点作为目标节点，并根据信道决策算法得到决策信道，开始发送带有决策信道信息的 RTS。若没有可用决策信道，则等待到至少有一个可用信道后再次开始竞争。

**步骤 3** 目标节点收到 RTS 后，当前接口在扫

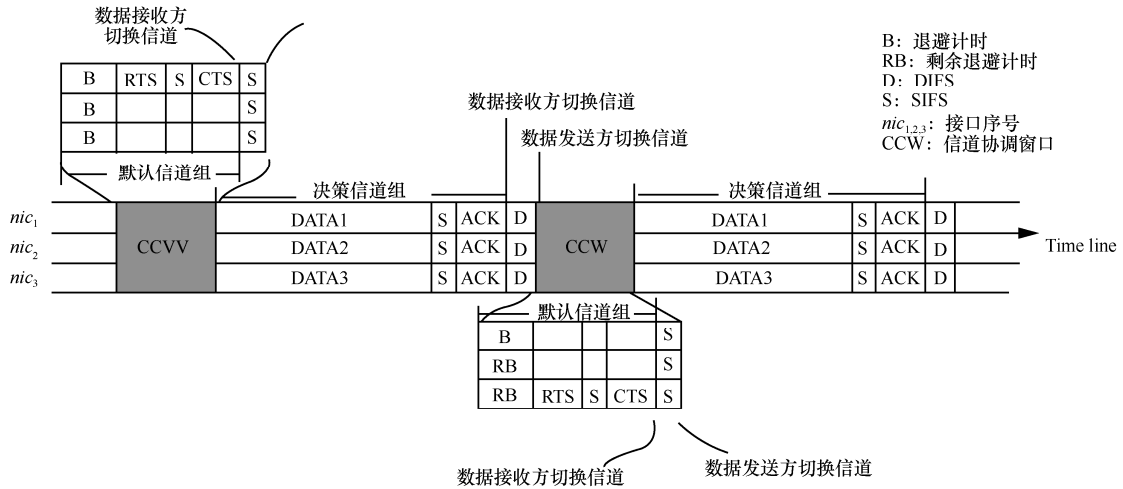


图 2 MIC-MAC 协议的信道竞争和数据交换过程

描信道 *SIFS* 空闲之后发送附有决策信道的 *CTS*。此时，目标节点中的剩余接口暂停退避计时。在 *CTS* 发送完毕后，目标节点的所有接口切换至各自预定的决策信道，等待接收数据。依据式(1)计算并设置数据超时计时器。

$$T_{\text{timeout}} = T_{\text{DATA}} + SIFS + T_{\text{ACK}} + SIFS \quad (1)$$

其中， $T_{\text{DATA}}$ 、 $T_{\text{ACK}}$  分别为传输数据和 *ACK* 所需的时间。当不同接口同时应答或发送 *RTS* 时，仅处理接口编号最小的接口。

非目标节点收到 *RTS* 后，在 *NAV* 列表中记录 *RTS* 中决策信道信息。

**步骤 4** 源节点接收到 *CTS* 后，各接口按式(1)计算并设置数据超时计时器，在切换到各自的决策信道扫描 *SIFS* 后，每个接口发送一次数据。其他节点接收到 *CTS* 后，记录 *CTS* 中对应信道的 *NAV* 时间，在扫描当前信道持续 *DIFS* 空闲后继续退避计时。

**步骤 5** 目标节点接口中成功接收到数据分组的接口回复 *ACK*，发送完 *ACK* 后各接口切换回对应的默认信道。没有成功接收数据分组的接口会在数据超时计时器为 0 时再切换回默认信道，然后接口重新开始退避计时来竞争信道。

**步骤 6** 源节点在接收到 *ACK* 后，各个接口选取当前信道作为下次决策信道，然后切换回默认信道重新开始退避计时。若未能正确接收 *ACK*，各个接口在数据超时计时器为 0 后再切换回默认信道并继续退避计时来竞争信道。

### 2.2.2 基于组策略的多信道分配方法

多信道网络中网络的性能与信道的合理分配

密切相关。MIC-MAC 协议中的数据信道已经划分成  $\left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$  个组，一个节点每轮选择一个数据信道组进行数据传输。当节点中某一个接口竞争到决策信道后，其他接口可以根据接口编号的关系选取到该决策信道所在的数据信道组中对应的信道。因为接口编号唯一且接口数目与信道组的信道数目一致，可确保每个接口选取到一一对应的信道，从而避免节点内各个接口间冲突。

节点随机选取信道组，优先考虑未被占用过的信道组 (line 2)，若本组中信道数目小于接口数目，则按优先编号较大的接口分配信道，未分配信道的接口则为空闲状态。若所有信道组均被占用过，则选取空闲时间最长的信道组 (line 5)。考虑到占用默认信道会影响协议性能，最后才考虑包含有默认信道的信道组。在节点成功发送数据之后，会一直采用当前信道组作为决策信道组；反之，则再次判断 *NAV* 列表重新选取信道组。信道决策过程的伪代码如算法 1 所示。

#### 算法 1 信道决策

- 1) 假设网络中有  $n$  个信道，每个节点有  $k$  个接口，其中  $k < n$ ，将所有信道划分布  $\frac{n}{k}$  个组；
- 2) if 存在多个空闲的信道组  $i$ ,  $i \in [1, \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor]$
- 3) 随机选取空闲信道用  $i$  作为决策信道组，其中， $i \in [1, \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor]$ ; /\*默认信道组为最后的备选\*/

- 4) else if 不存在空闲信道组
- 5) if  $\min\text{Time}[i] = \min[\text{currentTime} - \text{NAV}[j]] > T_{\text{DATA}}, j \in \text{set}[i]$ , 将  $\max[\{\min\text{Time}[i]\}]$  的信道组作为决策信道; /\*默认信道组作为最后的备选\*/
- 6) end if
- 7) end if
- 8) if 节点经由当前信道组成功发送过数据
- 9) 选择当前信道组作为决策信道组
- 10) else
- 11) 跳转到 2);
- 12) end if

由本文的信道决策过程可知，由成功传输过的源节点选择当前信道组作为下一次传输的决策信道组(line 8)，可以减少在已有数据传输的信道上再次传输数据的情况，从而有效解决多信道中存在的隐藏终端问题，降低多跳网络中隐藏终端的影响。

### 2.2.3 基于 MIC-MAC 协议的网络通信

图 3 是简单的多接口多信道无线 ad hoc 网络模型，其中，节点 A、B、C、D、E、F 均有 3 个接口。整个网络中信道数目为 12，共分为 4 组，其中，(1, 2, 3)为默认信道组，其他组为数据信道组。网络初始化后，所有节点在默认信道组上开始竞争，过程见 2.2.1 节。当源节点 A 中任意接口退避计时为 0，根据 MAC 队列长度选择目标节点 B 发送 RTS 和决策信道信息，其他节点继续竞争。节点 A 与节点 B 的通信过程如图 4 所示。节点 A 的接口(1, 2, 3)对应选择信道(7, 8, 9)传输数据。多跳网络中节点工作方式与单跳网络一致，未被选为源目标的其他节点作为转发节点。

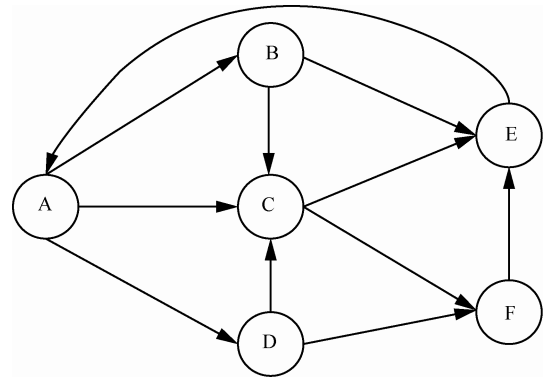


图 3 多接口多信道无线 ad hoc 网络模型

### 3 吞吐量理论分析

假设信道数目为  $n$ ，流数目为  $N$ ，每个节点拥有  $k$  个接口，最小竞争窗口为  $W$ ，最大竞争窗口为  $2^m W$ ，其中， $m$  为正整数。设单个接口在某一默认信道下发生碰撞的概率为  $P_{\text{col}}$ ，成功竞争到信道的概率为  $P_{\text{suc}}$ 。由于默认信道相互独立，它们之间传输的控制帧不会相互影响，而每个默认信道中接入的接口数目与节点数目是一致的，因此各个默认信道下接口的碰撞概率都为  $P_{\text{col}}$ 。由此可得  $P_{\text{suc}}^{[7]}$

$$P_{\text{suc}} = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \tag{2}$$

其中，

$$\tau = \frac{1}{W_{\text{back-off}}} \tag{3}$$

$$W_{\text{back-off}} = (1 - P_{\text{col}}) \frac{W}{2} \sum_{i=0}^m (2P_{\text{col}})^i + (1 - P_{\text{col}}) \frac{2^m W}{2} \sum_{i=m+1}^{\infty} (P_{\text{col}})^i \frac{1 - P_{\text{col}} - P_{\text{col}}(2P_{\text{col}})^m W}{1 - 2P_{\text{col}}} \tag{4}$$

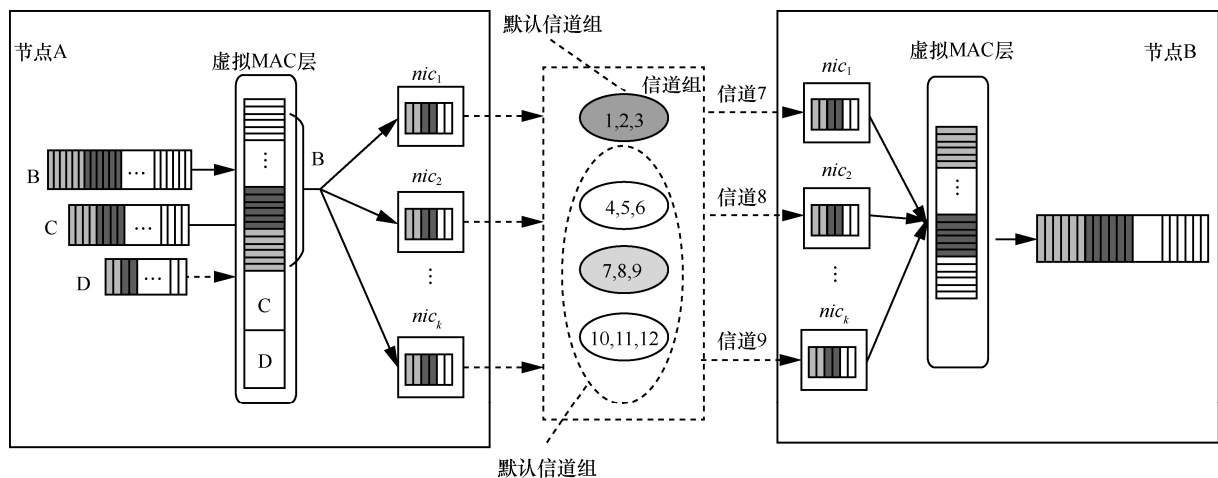


图 4 基于 MIC-MAC 协议的节点通信

由于本协议只需要某一个接口能竞争到信道即可为所有接口建立连接, 因此, 对于有  $k$  个接口的节点竞争到信道的概率  $P$  为

$$P = 1 - (1 - P_{\text{suc}})^k \quad (5)$$

对单个节点而言, 完成一次成功传输所需时间  $T_{\text{suc}}$  和完成一次成功握手所需时间  $T_{\text{con}}$  分别为

$$T_{\text{suc}} = SIFS + T_{\text{DATA}} + SIFS + T_{\text{ACK}} \quad (6)$$

$$T_{\text{con}} = T_{\text{RTS}} + SIFS + T_{\text{CTS}} \quad (7)$$

其中,  $T_{\text{RTS}}$ 、 $T_{\text{CTS}}$ 、 $T_{\text{DATA}}$ 、 $T_{\text{ACK}}$  分别为传输 RTS、CTS、数据分组以及 ACK 所需的时间。

由于存在  $k$  个默认信道, 所以同时能完成最大成功握手的次数为  $k$ , 即  $k$  个节点恰好在不同的默认信道上成功握手。则  $k$  个流成功握手的平均时长为成功和失败的时长总和  $T_{\text{Ksum}}$

$$T_{\text{Ksum}} = T_{\text{con}}P + (T_{\text{con}} + ST)(1 - P) \quad (8)$$

则  $N$  个流都完成成功握手所需的时间  $T_{\text{Sumcon}}$  至少为

$$T_{\text{Sumcon}} = \frac{T_{\text{Ksum}}N}{k} \quad (9)$$

则所有节点完成一次数据传输需要的时间  $T_{\text{sum}}$  为

$$T_{\text{sum}} = T_{\text{Sumcon}} + T_{\text{suc}} \quad (10)$$

因此, 可得到最大吞吐量  $S$  为

$$S = \left( \frac{1}{T_{\text{sum}}} \right) T_{\text{suc}} Nk \quad (11)$$

## 4 仿真与结果分析

本文利用 OMNeT++[15] 仿真工具比较了 MIC-MAC、RRPS、MIMC-SMAC 和 IEEE 802.11 协议在不同的 ad hoc 网络仿真场景中的性能表现。仿真实验随机部署 30 个节点在 200 m×200 m 的二维空间, 且设定不同数目的流, 每一个流的源节点

和目标节点随机选取, 每个流均为满载。假设网络中有 14 个信道, 网络初始建立拓扑的时间 30 s, 实验数据均取自第 30~150 s 之间, 其他仿真参数如表 2 所示。

表 2 实验仿真参数

参数	值	参数	值
Min_cw	16	ACK	120 bit
Max_cw	1 024	DIFS	50 μs
MAC head	224 bit	SIFS	10 μs
PHY head	192 bit	ST	20 μs
RTS	(128 + 8) bit	Data rate	2 Mbit/s
CTS	(136 + 8) bit	Control	
数据分组大小	4 096 bit	frame rate	1 Mbit/s

### 4.1 不同接口数目的网络性能对比

本节讨论 MIC-MAC 协议接口数目的变化对网络性能的影响。在单跳网络中, 节点的接口数目分别为 2 和 3, 分别选取 1、2 和 1、2、3 信道作为默认信道, 测试结果如表 3 所示。

随着接口数目的增加, 节点控制帧效率也不断提升; 在接口数目一定时, 控制帧效率基本不受流数目影响。由于控制帧效率的提高, 可使接口更快速地接入信道, 从而吞吐量也有提升。当流数目为 1 时, 采用双接口节点的单个接口平均吞吐量为 1.035 Mbit/s, 采用三接口节点的单个接口平均吞吐量为 1.11 Mbit/s。因此当流数目一定时, 随着接口数目增加, 单个接口平均吞吐量也会增加。在接口数目一定时, 吞吐量将随流数目的增加而增加。值得注意的是, 在流数目由 3 增加到 4 时, 三接口节点吞吐量的增长幅度有所放缓。其原因是 3 个接口占用 3 个默认信道, 而 4 个流满载时会占用 12 个信道, 此时总信道数目为 14; 由于 12+3>14, 此情况下必然会占用默认信道, 这将影响节点接入信道的时间从而导致吞吐量提升幅度变小。另外, 随着接口数量增加, 参与竞争的接口增多, 必然导致 RTS

表 3 不同接口数目下 MIC-MAC 协议的性能对比

流数目	吞吐量/(Mbit·s <sup>-1</sup> )		RTS 失败/次		数据分组失败/次		控制帧效率	
	双接口	三接口	双接口	三接口	双接口	三接口	双接口	三接口
1	2.070	3.340	0	0	0	0	2	3
2	4.160	6.720	3	22	0	0	1.999	2.990
3	6.029	10.023	17	158	0	0	1.999	2.990
4	7.730	12.230	33	753	0	0	1.998	2.980

碰撞数量也有所增加。综上，接口数目可以根据信道数目以及网络负载来进行综合选取。

### 4.2 单跳网络性能分析

实验选取单跳网络对 MIC-MAC、RRPS、MIMC-SMAC 和 IEEE 802.11 的测试结果进行对比。其中，每个节点拥有 2 个接口，分别选取信道 1、信道 2 为默认信道，传输距离为 150 m，载波监听距离 200 m。

图 5 为不同流数目下的吞吐量表现，可知 MIC-MAC 协议吞吐量的实验仿真结果与式(11)计算结果基本相一致。对比不同协议的吞吐量可知，本协议吞吐量比 MIMC-SMAC 提升了近 1 倍，并且远高于 IEEE 802.11，而 RRPS 采用轮询调度机制实现数据分组在接口和信道上的均匀分配，在流数少的情况下信道利用率高，因此吞吐量得到了较大改善。随着流数目的增加，信道利用率趋于平稳，因此吞吐量不再上升。同时由于 RRPS 并没有修改 MAC 协议，仍然沿用 IEEE 802.11 的 RTS/CTS，因此失败 RTS 数目、控制帧效率与 IEEE 802.11 基本一致。由前文分析可知，MIC-MAC 协议双接口在默认信道同时竞争信道，只需其中一个成功即可，这能缩短建立传输所需时间。而在传输稳定后，各个节点均有各自专属的信道传输数据，从而没有数据碰撞发生，保证了稳定的高吞吐量。当网络中有 7 个流，即信道出现满负载时，此时数据将占用默认信道，从而会影响控制帧的传输，这将引起吞吐量增幅下降。

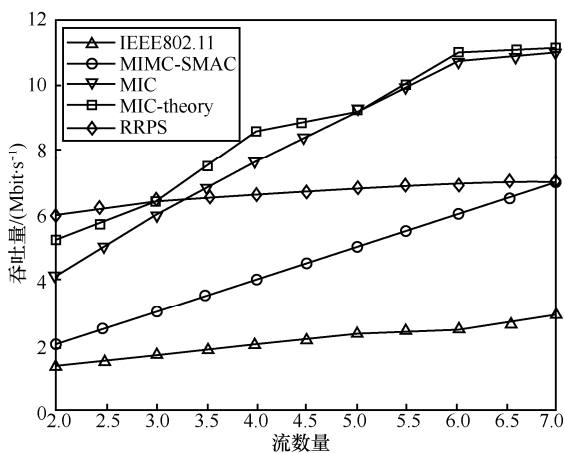


图 5 吞吐量的比较

由图 6 可知，MIC-MAC 协议在 RTS 失败数目上远低于 MIMC-SMAC 以及 IEEE 802.11，其原因在于 IEEE 802.11 存在较严重的聋效应，而 MIMC-SMAC 协议的 RTS 碰撞概率较高。由于 MIC-MAC 协议使用了默认信道，因此不存在聋效

应。另外，通过分析 MIC-MAC 协议的信道竞争过程可知，其 RTS 碰撞概率要远低于 MIMC-SMAC 协议。图 7 详细描述了本协议 RTS 碰撞过程并分析了碰撞次数减少的原因。由于节点完成一次成功传输所需时间是相同的，如果它在竞争成功的起始时刻没有发生碰撞，如节点 A、节点 C，那么在成功传输后再次竞争时也不会发生碰撞。即使存在双默认信道，如节点 A、节点 B，各个默认信道间的退避也不会相互影响。大部分节点经过成功传输后再次竞争信道的几乎是错开的。

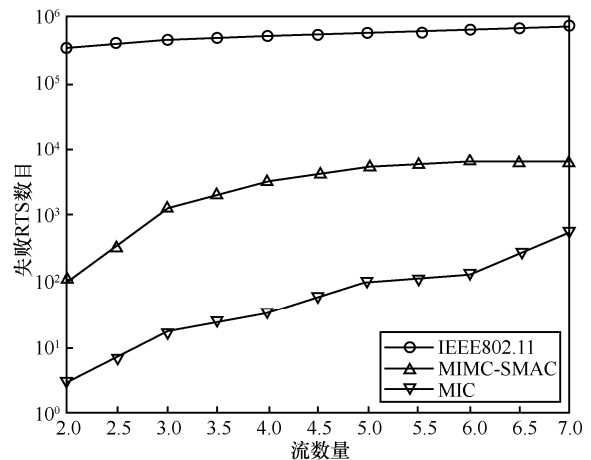


图 6 失败 RTS 数目

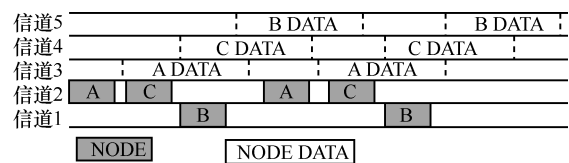


图 7 MIC-MAC 协议竞争信道过程

图 8 为 MIC-MAC、MIMC-SMAC 和 802.11 协议控制帧效率对比，控制帧效率的计算式为

$$\eta = \frac{\text{建立成功传输的次数}}{\text{发送RTS的总次数}} \times 100\% \quad (12)$$

式(12)用于衡量多接口多信道协议中控制帧与接口成功传输数据的关系，其值可反映一次控制帧握手能建立的平均成功传输数量。由图 7 可知，MIMC-SMAC 协议采用一次控制帧握手仅为一个接口建立传输，理想情况下其控制帧效率为 100%。由于存在碰撞，实际控制帧效率维持在略低于 100%。由于 IEEE 802.11 协议存在大量的 RTS 丢失，其控制帧效率远低于其他 2 个协议。MIC-MAC 协议通过一个接口即可为其他所有接口同时建立传输，在节点有 2 个接口的情况下，其控制帧效率略

低于 200%。特别是当接口数目增加时，MIC-MAC 协议的控制帧效率还会增加。这无疑将极大减轻默认信道的拥塞程度，同时可使节点更快速地接入信道以获得高吞吐量。

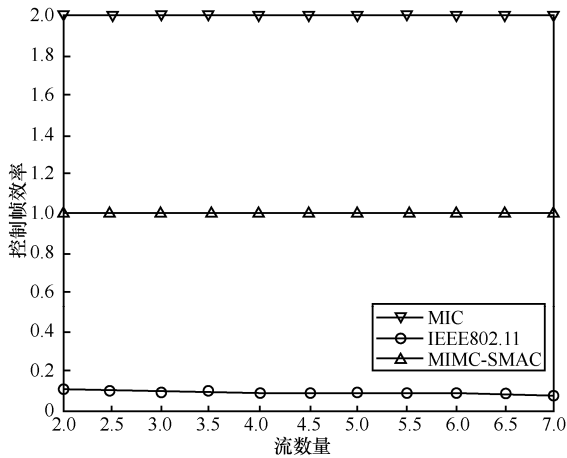


图 8 控制帧效率

图 9 为 3 个协议在不同流数目下的延时对比。从图中可以看出本协议设计的多接口协作机制能有效缩短接入信道的时间，从而降低数据分组传输平均延时。图中 IEEE 802.11 在流数目较少的情况下延时会比 MIMC-SMAC 低，原因是 MIMC-MAC 为了充分避免隐藏终端的影响而设置了固定竞争周期，导致了平均延时的增加。而当流数目增加后，过多的碰撞则会导致 IEEE 802.11 协议的平均延时显著增加，而此时 MIMC-SMAC 则始终保持平稳的水平。对于 MIC-MAC 协议，多个接口同时参与信道竞争，并且当有一个接口优先竞争到信道后能为其他接口建立传输的机制大大缩短了各个接口为自己竞争信道所需的时间，从而使 MIC-MAC 的平均延时较低。

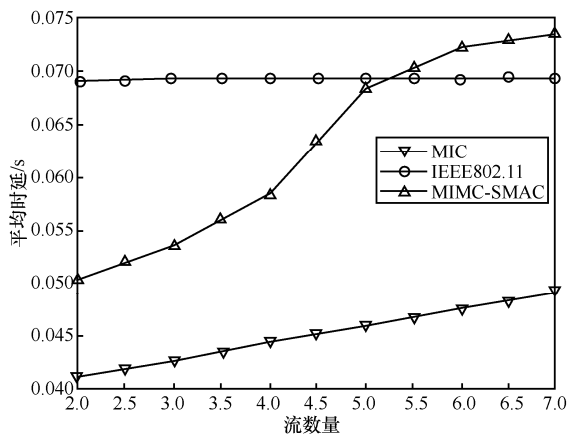


图 9 平均时延的比较

### 4.3 多跳网络性能分析

本节将测试并分析隐藏终端对 MIC-MAC 协议的影响。多跳网络中每个节点拥有 2 个接口，分别选取信道 1、信道 2 为默认信道，传输距离为 150 m，载波监听距离 220 m，节点均匀散布在 500 m×500 m 的二维空间中。

由图 10 可知多跳网络中吞吐量略低于单跳网络；而图 11 表明，单跳网络中 RTS 和数据分组发送失败的指标优于多跳网络。其原因是 MIC-MAC 通过源节点选择决策信道，而在各个源节点选取到属于自己的特有信道前依旧会受到隐藏终端的影响，这将导致多跳网络中的数据分组失败次数要多于单跳网络。随着网络趋向稳定，各个源节点将选取到属于自己的特有信道，最终可以完全消除隐藏终端的影响。因此，对总的吞吐量影响也不大。

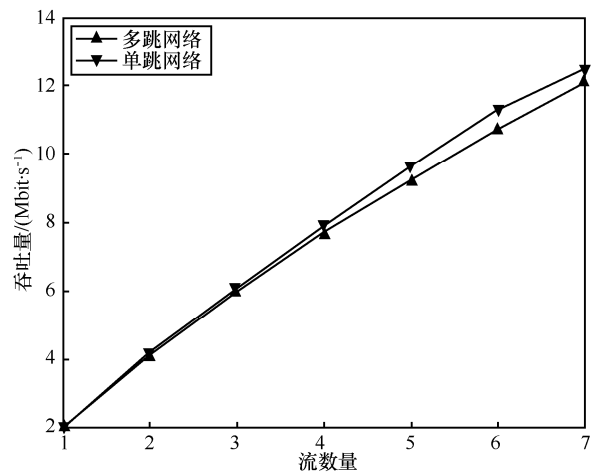


图 10 MIC-MAC 在单跳和多跳网络中的吞吐量

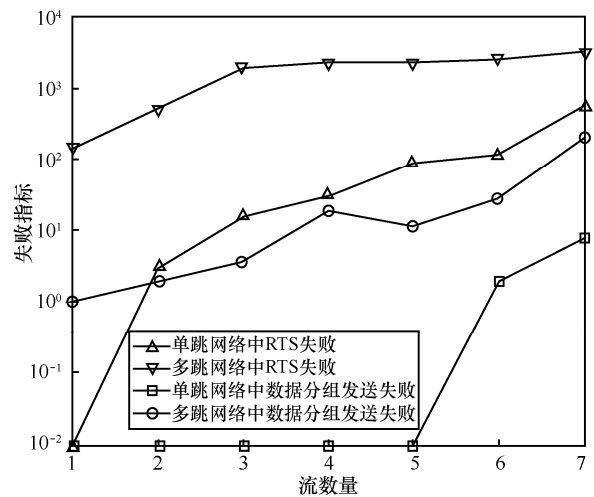


图 11 RTS 与数据分组碰撞次数

## 5 结束语

本文提出一种可实现多接口协作的无线 ad hoc 网络 MAC 协议, 采用 MIC-MAC 协议可以提升多接口多信道网络的吞吐量。该方法通过单个接口成功握手为它的多个接口建立传输连接, 可有效减少建立传输的时间, 提高控制帧效率和吞吐量。另外, 通过选取已成功传输的信道作为决策信道, 消除了隐藏终端的影响。单跳网络的仿真结果表明 MIC-MAC 协议的性能远优于 IEEE 802.11 以及 MIMC-SMAC 协议。多跳网络的仿真结果说明本协议降低了隐藏终端对网络性能的影响。

### 参考文献:

- [1] FANGMIN L, XIAOLIN M, FEI H, et al. Synchronisation-based, multi-channel multi-interface medium access scheme in ad hoc network[J]. Communications, IET, 2011, 5(14): 2082-2090.
- [2] LIU Y, LIU A, LI Y, et al. APMD: a fast data transmission protocol with reliability guarantee for pervasive sensing data communication[J]. Pervasive & Mobile Computing, 2017.
- [3] 何鹏, 阎保平, 李志, 等. CM-MAC: 一种基于分簇的多信道车载网 MAC 协议[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(3): 502-510.  
HE P, YAN B P, LI Z, et al. CM-MAC: a cluster-based multi-channel MAC protocol for VANET[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(3): 502-510.
- [4] LIN Z, LIU H, CHU X, et al. Jump-stay based channel-hopping algorithm with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks[C]//INFOCOM. 2011: 2444-2452
- [5] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUEH T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50-65.
- [6] 王志刚, 李金宝. AMCB: 基于多控制信道预约和冲突通知的无线传感器网络 MAC 协议[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(S2): 166-170.  
WANG Z G, LI J B. AMCB: asynchronous multi-control-channel reservation and conflict information based MAC protocol for wireless sensor network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(S2): 166-170.
- [7] BONONI L, DI FELICE M, MOLINARO A, et al. Enhancing multi-hop communication over multi-radio multi-channel wireless mesh networks: a cross-layer approach[J]. Computer Communications, 2011, 34(13): 1559-1569.
- [8] 罗娟, 潘陈, 李仁发. 无线 mesh 网络中多射频多信道 MAC 机制设计[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(2): 253-260.  
LUO J, PAN C, LI R F. Design of MAC scheme in multi-channel multi-radio WMNs[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(2): 253-260.
- [9] LEI H, GAO C, GUO Y, et al. Wait-time-based multi-channel MAC protocol for wireless mesh networks[J]. Journal of Networks, 2012, 7(8): 1208-1213.
- [10] 张德升, 李金宝, 郭龙江. 基于多信道预约的传感器网络 MAC 协议研究[J]. 通信学报, 2011, 32(4):126-137.  
ZHANG D S, LI J B, GUO L J. Study on multi-channel reservation based MAC protocol for sensor networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 126-137.
- [11] AL ISLAM A B M A, ISLAM M J, NURAIN N, et al. Channel assignment techniques for multi-radio wireless mesh networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 988-1017.
- [12] LIU X, LI Y F, KUANG H L, et al. A generic model of multi-interface and multi-channel for multi-hop wireless networks[C]//The 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). 2015: 1083-1089.
- [13] KÖBEL C, GARCÍA W B, HABERMANN J. Definition of an 802.11 interface management process in a proposed system for transmission capacity enhancement in wireless mesh networks[J]. Journal of Computer Networks and Communications, 2015: 4.
- [14] HELGASON Ó, KOUYOUMDJIEVA S T. Enabling multiple controllable radios in OMNeT++ nodes[C]//The 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques. 2011: 398-401.
- [15] KÖPKE A, SWIGULSKI M, WESSEL K, et al. Simulating wireless and mobile networks in OMNeT++ the MiXiM vision[C]//The 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. 2014: 806-815.

### 作者简介:



邓清勇 (1981-), 男, 湖南武冈人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线通信、认知网络、智能电网。



裴廷睿 (1970-), 男, 湖南通道人, 博士, 湘潭大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、多媒体通信。

李哲涛 (1980-), 湖南邵阳人, 博士, 湘潭大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、压缩感知。

刘安丰 (1971-), 男, 湖南汉寿人, 博士, 中南大学教授, 主要研究方向为物联网网络计算、传感网络、新型网络体系结构、服务计算等。

邓亚风 (1990-), 男, 湖南益阳人, 韩国亚洲大学计算机工程学院博士生, 主要研究方向为 WLAN、车联网等。