

一种联合路由层信息设计的多跳 Ad Hoc MAC 层协议

谢海波, 崔毅东, 徐惠民
(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 提出了一种单信道多跳 Ad Hoc 网络的媒体接入层协议. 利用全向天线的特点, 协议控制帧捎带路由信息, 使邻居节点获知节点间路由状态. 上游节点的 ACK 应答直接触发下游节点的 CTS 握手, 形成 CTS/DATA/ACK 三维交互机制. 协议可有效减少网络的握手开销, 降低重负载时握手帧的冲突概率. 仿真表明, 协议可适应不同的拓扑. 最好情况下, 协议较 IEEE 802.11 协议的吞吐量约提升 16.1%, 端到端延时约降低 16.8%. 改善了多跳 Ad Hoc 网络性能.

关键词: 多跳 Ad Hoc; 媒体接入层; IEEE 802.11 DCF; MARCH; ROADMAP

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2129-05

A Joint Route MAC Layer Design Multi-Hop Ad Hoc MAC Protocol

XIE Hai-bo, CUI Yi-dong, XU Hui-min

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A novel medium access control (MAC) protocol for the single channel multi hop Ad Hoc network is proposed. Using omnidirectional antenna, the control frame tagged with the routing information can be sensed by the neighboring nodes. Furthermore, the ACK message sent by the upstream node triggers the CTS only handshake of the downstream node and, the three way exchange (CTS/DATA/ACK) is performed. This mechanism lowers the probability of the control message collision in heavy load network. Simulation results demonstrate that with various topologies our proposed scheme can outperform IEEE 802.11 with throughput and delay betterment.

Key words: multi-hop Ad Hoc; MAC; IEEE 802.11 DCF; MARCH; ROADMAP

1 引言

多跳是 Ad Hoc 网络的本质特征. 多跳和无中心的网络结构使网络节点间无法共享网络及节点状态, 因而形成著名的隐藏终端、暴露终端等问题^[1].

为降低隐藏终端对网络性能的影响, 通常的做法是在有效数据发送之前使用 RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) 握手^[2-5]. 这种机制通常比 CSMA (Carrier Sense Multiple Access)^[6]等单纯使用载波监听的协议拥有更好的网络性能^[7].

然而, 握手信号在防止数据帧冲突的同时, 也增加了网络的额外开销. 文献[3]指出, 天线从发送到接收需要一定的转换时间, 握手机制的引入增加了节点天线转换的次数和时间. 同时在重负载情况下, 握手信号同样存在较大的冲突概率, 因此减少 RTS/CTS 这种握手开销, 可以进一步提升网络性能^[8-11]. MACA-BI^[7]等协议即从此角度提出了新的握手控制方式. 此类协议由接收节点发起握手, 而发送节点在收到握手之后直接发送数据, 有效减少了握手开销.

按握手信号的发起端分类, 使用握手机制的单信道协议可分为由发送端发起的握手 (sender initiated, 简称 S 型握手),

如 MACA、IEEE 802.11; 和由接收端发起的握手 (receiver initiated, 简称 R 型握手) 如 RIMA、MACA-BI.

理论上 R 型握手协议较 S 型有更好的网络性能, 但此类协议的性能严重依赖于接收节点对上游节点数据来临的预测算法^[11]. 在实际应用中, 由于业务的不确定性, 很难由一种预测算法来准确触发握手信号的发送, 此类协议的有效性值得商榷^[10].

一类混合型握手协议被 Toh, C. K., Dongkyun 等学者提出^[8, 11]. 此类协议通过监听邻居节点的控制信号 (如 MARCH 监听 CTS, ROADMAP 监听 ACK), 获得本节点周围的业务情况, 形成在第一跳节点间使用 S 型握手, 下游节点间使用 R 型握手. 但 MARCH 协议由定时器触发 CTS 握手, 效率不能得到保证, 并会造成对数据帧的冲突; 同时, 业务流间公平性、控制帧传播错误和冲突处理等问题也没有进行讨论. ROADMAP 协议尽管对触发超时进行了处理, 但其不能准确定位业务上游节点, 反而加重了控制帧的冲突现象.

本文基于 IEEE 802.11 提出了一种新的单信道 MAC 层协议. 与其他协议只监听一个控制帧不同, 本协议中, 节点同时监听邻居节点的 CTS 和 ACK 信号, 由 CTS 获取业务状态, 由

ACK 触发下游节点握手. 通过跨层协作, 可有效降低握手开销, 提升网络性能.

本文结构如下, 第二部分分析相关工作, 第三部分提出新的协议, 第四部分为仿真验证, 第五部分总结全文.

2 相关工作

2.1 IEEE 802.11 协议 DCF 模式

IEEE 802.11 协议 DCF (Distributed Coordination Function) 模式(以下简称 DCF 协议)是典型的 S 型握手, 使用了 RTS/CTS/DATA/ACK 方式的四维交互机制.

协议定义了一系列帧间隔, 其中 SIFS < PIFS < DIFS < EIFS. 节点在发送 DATA 之前首先等待信道空闲 DIFS, 然后启动退避算法, 在退避结束后发起 RTS 握手. 其下一跳节点在收到 RTS 之后等待 SIFS 时间返回 CTS, 并在收到来自于发送端的 DATA 之后间隔 SIFS 返回 MAC 层应答 ACK, 从而完成了一跳数据的传递.

2.2 MARCH 协议

MARCH 协议通过监听邻居节点 CTS 的发送, 来预测上一跳节点的数据达到, 并通过定时器发起本节点的握手. 协议引入了路由标识的概念, 用以表示业务流.

如图 1, 节点 1 收到来自节点 0 的 RTS 握手信号之后向节点 0 发送 CTS, 同时此 CTS 被节点 2 所监听. 节点 0 收到节点 1 的 CTS 之后开始发送 DATA, 并由定时器 T_{CTS} (图 1 中的实体粗线段) 触发下游节点的握手. 节点 2 监听到节点 1 的 CTS 之后启动 T_{CTS} , 等待 t 时间后发送本节点握手信号 CTS. 节点 1 在收到节点 2 的 CTS 之后直接发送 DATA, 形成 R 型握手.

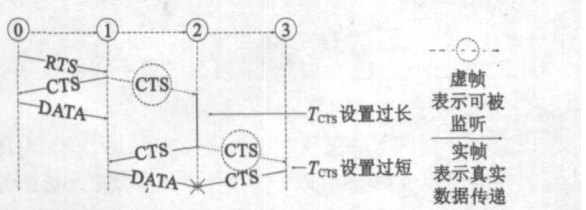


图 1 MARCH 协议 CTS 的延迟发送和 DATA 的冲突

利用 T_{CTS} 触发的 R 型握手不能保证网络效率. 如果 t 过长, 则 CTS 的发送存在较大延时, 影响网络性能; 如果 t 过短, 则 CTS 握手可能与上一跳节点的 DATA 帧发生冲突.

进一步分析, MARCH 没有定义冲突恢复机制, 中间节点并不主动发起握手. 因此控制帧的监听错误, 将直接导致上游节点数据转发的失败, 且无法从冲突中恢复. 同时, MARCH 协议并无考虑公平性问题.

2.3 ROADMAP 协议

与 MARCH 不同, ROADMAP 通过监听 ACK 来触发 CTS 握手的发送. ROADMAP 中, 上游节点的 ACK 代表数据接收结束, 下游节点直接发送 CTS 请求上游节点进行数据转发, 从而避免 MARCH 中定时器 T_{CTS} 触发不精确的问题.

但 ROADMAP 协议可能造成无效 CTS 的发送. 如图 2, 若数据由节点 0 发送到节点 3, 节点 4 监听到来自节点 3 的 ACK 后立即发送 CTS, 此时节点 3 不存在要转发到节点 4 的数据, 则产生无效 CTS 并会阻塞邻居节点.

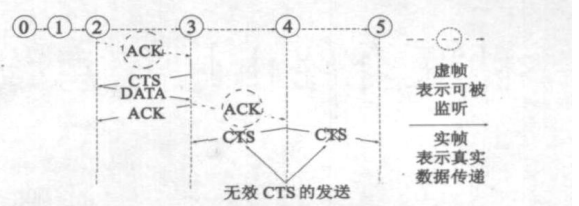


图 2 ROADMAP 协议无效 CTS 的发送

更严重的是, ROADMAP 协议可能导致 CTS 的冲突. 在网络拓扑下, 收到此 ACK 信号的多个邻居节点会盲目发送 CTS, 从而产生 CTS 冲突的现象(参考图 5 拓扑结构). 导致多个节点的退避等待, 造成网络性能急剧恶化.

3 一种联合路由层信息的 MAC 协议

3.1 新的协议流程

本协议同样引入路由标识的概念, 称为 R_{id} (此 R_{id} 表征路由, 比如目的节点 IP+ 剩余跳数), 通过修改 IEEE 802.11 协议帧结构, 在多跳业务的控制帧中包含此 R_{id} (单跳业务不包含). 下游节点同时监听上游节点的 CTS、ACK 并获取 R_{id} . 我们通过图 3 来描述此协议.

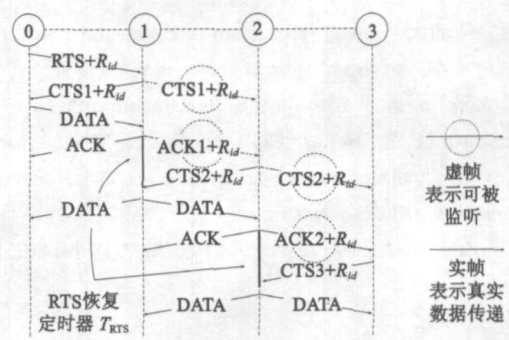


图 3 新协议时序图

如图 3, 设数据从节点 0 发送到节点 3. 节点 0 生成此次数据的路由信息 R_{id} 并包含在 RTS 中向节点 1 发送, 节点 1 提取 RTS 中的 R_{id} , 将其包含在 CTS 中返回节点 0 (图中表示为 CTS1), 此时节点 2 监听到来自于节点 1 的 CTS, 提取 CTS1 信号的 R_{id} 向本节点路由层进行查询, 如果本节点路由层存在此路由, 表明本节点将是节点 1 的下一跳节点, 同时监听节点 1 的 ACK 信号. 节点 2 监听到来自节点 1 的 ACK 信号之后, 直接向节点 1 发送 CTS2 (监听机制详见 3.2)

节点 0 收到来自于节点 1 的 CTS, 开始发送 DATA. 节点 1 收到 DATA 并返回 ACK1 应答, ACK1 包含与 CTS1 相同的 R_{id} . 在此, ACK1 相当于 DCF 协议中的 RTS, 将触发节点 2 的 CTS 直接发送. 同时节点 1 在发送 ACK1 之后启动定时器 T_{RTS} , 若在 T_{RTS} 过期之后 CTS2 仍未到来, 则恢复 S 型握手, 重新发起 RTS.

节点 2 监听到节点 1 的 ACK1 信号, 提取 R_{id} 并包含在 CTS2 中向节点 1 发送, 同时 CTS2 被节点 3 所监听. 此后节点 3 重复节点 2 的操作.

需要注意的是节点 3 在向节点 2 发送 ACK 应答时, 要将 R_{id} 从 ACK 中去除, 表明一条路由的结束.

表 2

传播半径	22.3m	业务	CBR(512 字节/包)
节点距离	20m	天线转换时间	2 μ s
传播模型	TwoWayGround	路由协议	AODV
数据速率	11MB	基本速率	1MB

4.1 线性拓扑

在线性拓扑中(如图 6a),我们选择了 8 个节点,其中数据从节点 0 发送到节点 6。为了观察 ROADMAP 的无效 CTS 对网络性能的影响(参见 2.3 节),我们引入了节点 7。

仿真表明,随着网络负载的增加,IEEE 802.11、ROADMAP 和新协议的吞吐量分别在 80pkgs/s、90pkgs/s、100pkgs/s 的时候趋于平稳,时延特性表现类似。重负载情况下,新协议较 IEEE 802.11 吞吐量提升约 16.1%,时延下降约 16.8%;较 ROADMAP 吞吐量提升约 13.3%,时延下降约 13.1%。如图 7(a)、7(b)所示。而在网络负载比较轻的情况下,三种协议吞吐量性能相近。

线性拓扑中,在重负载情况下,新协议和 ROADMAP 协议较 IEEE 802.11 在吞吐量和时延特性上均有较大的改善。新协议由于避免了 ROADMAP 协议的无效 CTS 发送,网络性能较 ROADMAP 有一定的提高,但改善的效果不明显。这种结果符合事实,在线性拓扑下,由于 ROADMAP 协议和新协议减少了控制信息开销而改善了网络性能。同时,由于 ROADMAP 协议无效 CTS 的发送情况仅存在于目的节点周围,对网络其他节

点影响较小,因此新协议较 ROADMAP 协议在线性拓扑下的优势并不明显。

4.2 交叉路由拓扑

我们选择 13 个节点形成两条交叉路由的拓扑(如图 6b),来了解在交叉路由下新协议的性能。其中路由 I: 0...3...6,路由 II: 7...3...12。

如图 7(c)、7(d),重负载情况下,新协议较 IEEE 802.11 吞吐量提升约 12.6%,较 ROADMAP 协议提高约 62.7%;端到端时延特性,新协议较 IEEE 802.11 降低约 13.1%,较 ROADMAP 降低大约 38%。

正如文章第二部分的分析,ROADMAP 难以适应非线性拓扑的网络。在交叉路由情况下(如图 6b),节点 3 邻居节点的 CTS 冲突成为影响性能的主要原因。

4.3 网状拓扑

网状拓扑重负载情况下,新协议较 IEEE 802.11 在网络吞吐量上提高 16.1%,时延降低 16.5%;较 ROADMAP 协议在吞吐量上提高 83.2%,时延降低 78.5%。

ROADMAP 协议性能恶化的原因是多方面的。如图 6c 所示,在数据传递过程中,节点 4、5、9、10、11 处可能存在 CTS 的冲突,同时节点 15 处存在无效 CTS 的发送。若在此拓扑下存在多条路由,性能下降将更为明显。

可以看出,新协议可适应任意的拓扑。在任意的拓扑环境下,随着负载的增加,新协议表现出比 IEEE 802.11 更好的网络性能。

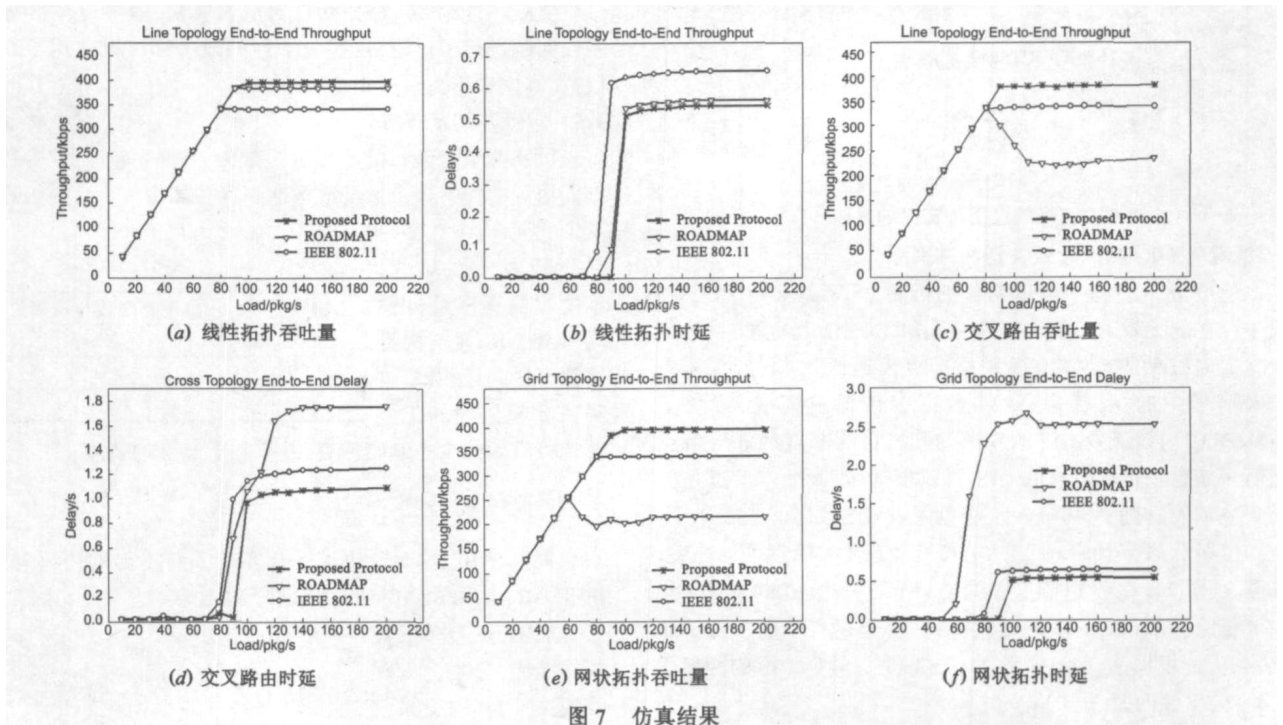


图 7 仿真结果

5 结语

本文提出了一种联合路由层信息设计的 MAC 层协议,目的在于减少握手信号的开销。通过控制帧捎带传播路由信息,同时使用 S 型和 R 型混合握手的机制,在精确预测数据来临

的同时减少握手开销,提升了网络性能。新协议同时侦听 CTS 和 ACK 控制帧,并定义了监听错误处理,业务定位机制,有效避免了其他协议缺陷。通过定义主动发送 CTS 的帧间隔,及定义节点内部业务调度机制,不会加重协议的公平性问题。

本协议不能兼容 IEEE 802.11 协议。同时由于引入 MAC

层访问路由层的机制,增加了协议的复杂度.然而协议相较 IEEE 802.11 协议从性能上得到了提升.

参考文献:

- [1] F Tobagi, L Kleinrock. Packet switching in radio channels: Part II—the hidden terminal problem in carrier sense multiple access and the busy tone solution[J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23(12): 1417–1433.
- [2] P Kam. MACA: A new channel access method for packet radio [A]. Proc of ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference[C]. London: 1990. 134–140.
- [3] C L Fullmer, J J Garcia Luna Aceves. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet radio networks[J]. Computer Communications Review, 1995, 25(4): 262.
- [4] IEEE 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications[S].
- [5] V Bharghavan, A Demers, S Shenker, L Zhang. MACAW: A media access protocol for wireless LANs[J]. Computer Communications Review. 1994, 24(4): 212.
- [6] L Kleinrock, F Tobagi. Packet switching in radio channels: Part I—carrier sense multiple access modes and their throughput delay characteristics[J]. IEEE Transactions on Communications, 1975, 23(12): 1400–1416.
- [7] F Talucci, M Gerla, L Fratta. MACA-BI (MACA By Invitation) A receiver oriented access protocol for wireless multihop networks[A]. Proc of PIMRC[C]. Helsinki, Finland: IEEE Press, 1997. 435–439.
- [8] K Dongkyun, C K Toh, C Yanghee. ROADMAP: A robust ACK-driven media access protocol for mobile ad hoc networks [A]. Proc of MILCOM[C]. McLean, VA: IEEE Press, 2001. 7–8.
- [9] J J Garcia Luna Aceves, A Tzamaloukas. Receiver initiated collision avoidance in wireless networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(2): 249–263.
- [10] R M De Moraes, J J Garcia Luna Aceves. Receiver initiated collision avoidance in multihop ad hoc networks[A]. Proc CIC'04[C]. Las Vegas: IEEE Press, 2004. 124–126.
- [11] C K Toh, V Vassiliou, G Guichal, C H Shih. MARCH: A medium access control protocol for multihop wireless ad hoc networks[A]. Proc MILCOM[C]. Los Angeles: IEEE Press, 2000. 345–349.
- [12] Z Fang, B Bensaou, Y Wang. Performance evaluation of a fair backoff algorithm for IEEE 802.11 DFWMAC[A]. Proc MOBIHOC[C]. Lausanne, Switzerland: 2002. 48–57.
- [13] H Luo, P Medvedev, J Cheng, S Lu. A self coordinating approach to distributed fair queueing in ad hoc wireless networks [A]. Proc INFOCOM[C]. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1370–1379.
- [14] V Kanodia, A Sabharwal, B Sadeghi, E Knightly. Ordered packet scheduling in wireless ad hoc networks: mechanisms and performance analysis[A]. Proc MOBIHOC[C]. Lausanne, Switzerland: 2002. 58–70.
- [15] The network simulator version 2 (ns2) [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

作者简介:



谢海波 男, 1978 年生于河南, 2000 年获武汉大学学士学位, 现为北京邮电大学博士研究生. 主要研究方向: Ad Hoc 网络的 MAC 层协议分析与设计. E-mail: haibo_xie@yahoo.com.cn



崔毅东 男, 1976 年生于吉林, 2005 年获北京邮电大学博士学位, 现为北京邮电大学电信工程学院教师. 主要研究方向: 无线/Internet QoS 研究. E-mail: cuiyd@buptnet.edu.cn

徐惠民 男, 1963 年毕业于北京邮电大学, 现为北京邮电大学电信工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向: 协议测试 Internet 研究. E-mail: huimin@bupt.edu.cn