

基于分簇的 Ad Hoc 网络媒体接入控制协议 C-USAP

熊 轲,马 换,刘 强

(北京交通大学 计算机与信息技术学院,北京 100044)

摘 要:在未来大规模无线自组织网络中,不但要保证数据的高效传输,还要保证能够适应网络拓扑结构的快速变化.现有的 M-USAP(改进的统一时隙分配协议)能够在一帧内完成全网控制信息的交互,每个节点拥有全网路由信息,在小规模网络中能够快速适应网络拓扑结构的变化.但是随着网络规模的增大,存在路由开销大、收敛慢、端到端时延大、节点吞吐量小、时隙复用率低和网络反应迟钝等问题.针对上述问题,提出一种适用于大规模无线自组织网络的媒体接入控制协议 C-USAP(分簇式统一时隙分配协议).该协议基于分簇思想,簇内采用动态时分多址协议,簇间采用多频段分割技术,实现高效的簇内和簇间节点交互.仿真结果表明:该协议具有路由收敛快、业务收发平稳、端到端时延小、时隙复用率高和网络灵活等特点.

关键词:分簇;C-USAP;帧结构;信令交互;网关选取

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A

C-USAP: a media access control protocol based on clustering in Ad Hoc networks

XIONG Ke,MA Huan,LIU Qiang

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China)

Abstract: The future large-scale wireless Ad Hoc network, which is not only to ensure the efficient transmission of data, but also to ensure the network topology can adapt to the rapid changes. The existing Modified-Unifying Slot Assignment Protocol (M-USAP) can complete the interaction of the control information of the whole network in one frame, and each node has entire routing information of the network. Thus, M-USAP can quickly adapt to the changes of the network topology in the small-scale network. Nevertheless, with the increasing of the network's scale, there are some shortcomings such as large routing overhead, slow routing convergence, high end-to-end delay, low node throughput, slot reuse rate and slow network response. In view of the above problems, this paper proposes a Clustering-Unifying Slot Assignment Protocol (C-USAP) for large-scale Ad Hoc networks. The protocol is based on clustering technology, the dynamic time division multiple access protocol is adapted to inner-cluster communication and the multi-band segmentation technology is adopted to inter-cluster communication, which achieves the interaction of inner-cluster and inter-cluster. The simulation results show that this protocol

收稿日期:2017-07-06

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX03001021-003)

Foundation item: National Science and Technology Major Project of China (2016ZX03001021-003)

第一作者:熊轲(1981—),男,陕西汉中,人,教授,博士,博士生导师.研究方向为移动互联网,5G 网络等. email: kxiong@bjtu.edu.cn.

引用格式:熊轲,马换,刘强.基于分簇的 Ad Hoc 网络媒体接入控制协议 C-USAP[J].北京交通大学学报,2018,42(2): 46—53.
XIONG Ke, MA Huan, LIU Qiang. C-USAP: a media access control protocol based on clustering in Ad Hoc networks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(2): 46—53. (in Chinese)

has the characteristics of fast convergence of routing, smooth transmission and reception, low end-to-end delay, high slot reuse rate and network flexibility.

Keywords: clustering; C-USAP; frame structure; signaling interaction; gateway selection

无线自组织网络(Wireless Ad Hoc Network)是由一组带有无线收发装置的移动终端组成的一个多跳临时性自治网络,具有无需架设网络基础设施、可快速展开和抗毁性强等特点,可广泛应用于战场环境、灾难救援及其他需要临时建立网络的场合^[1].

媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议是 Ad Hoc 网络协议的重要组成部分,其性能的优劣直接影响到整个 Ad Hoc 网络的性能^[2].目前 Ad Hoc 网络 MAC 协议的研究一般分为 3 类:基于竞争机制的 MAC 协议、基于预留方式的 MAC 协议和混合类 MAC 协议.

文献[3]为基于竞争机制的 CSMA/CA 算法,采用离散时间分布随机算法,产生无冲突的传输计划.但节点竞争信道产生的延迟和数据包缓存队列延时随着网络负载的增加而增大.文献[4-5]采用多信道接入方式,文献[4]提出了一种混合多信道 H-MMAC 协议,允许节点在通知传输指示消息(Announcement Traffic Indication Message, ATIM)窗口期间传输数据,提高信道资源的利用率.但可能丢失来自其他频道上的邻居预留信息,导致隐藏终端问题,且容易受到公共控制信道饱和问题.文献[5]提出一种基于 TDMA 的多信道 MAC 协议,采用双接口方式进行通信,适合低负载网络.文献[6]网络拓扑为平面结构,采用的是基于预留方式的 USAP 协议,文中结合层次优先级机制解决了自组织网络中信道接入的问题,适合小规模网络.文献[7]提出了一种 M-USAP 协议,能够快速适应网络拓扑的变化,但当网络规模增大,造成路由开销、时延增大和广播信道阻塞.文献[8]采用基于分簇的 TDMA/CDMA 方案,簇内基于一跳、采用 TDMA,簇间采用 CDMA-TDMA 技术,使用不同的扩频码隔离实现同时传输.但文献[9-10]簇内节点数相对较小,容易引发簇首竞争的问题,影响簇的稳定性,且簇的维

护开销和分组投递时延较大.

针对上述问题,为了满足大规模网络的需求,本文作者提出无线自组织网络媒体接入控制协议 C-USAP 研究,该协议采用合适的网络结构、分簇技术,对 M-USAP 协议进行改进,实现高效、公平地利用有限的信道资源,降低时延,提高时隙复用率,减小路由开销,增强网络灵活性.

本文网络结构满足下列要求.

1)将网络分为多个簇,每个簇由簇首和普通节点组成,不同簇工作在不同频段.

2)簇间通过网关节点交互实现整个网络的通信.①簇首除了选取网关,也对迟入网节点分配控制时隙.簇首节点不可选为网关节点,选取路由路径时尽量不选取簇首,防止簇首成为网络瓶颈.②簇内和簇间节点交互不必先到达簇首节点再相互转发.普通节点仅知道本簇节点路由,网关节点知道本簇与对簇节点路由,降低路由开销,提高网络灵活性.

3)网关节点不会选为多点中继(Multi Point Relay, MPR)节点发送拓扑控制(Topology Control, TC)消息,防止 TC 消息出簇,网关成为瓶颈,保证网络的安全.

1 C-USAP 协议帧结构设计

本节首先从帧结构介绍 M-USAP 帧结构,其次对 C-USAP 帧结构进行详细设计.

1.1 M-USAP 协议帧结构

传统 USAP 协议^[11]经过一个时元才能完成一次控制信息的交互.为了使 USAP 协议能快速适应网络拓扑结构的变化,通过增加每一帧中控制时隙的个数,保证每个节点在一帧内完成控制信息的交互.文献[12]提出了 M-USAP 协议,其帧结构如图 1 所示.

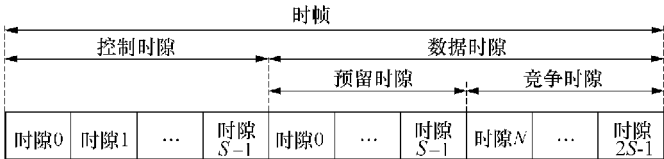


图 1 M-USAP 帧结构

Fig.1 Frame structure of M-USAP

在 M-USAP 协议中,时帧分为控制时隙和数据时隙两部分.网络中的每个节点占用一个控制时隙,

节点在自己对应的控制时隙发送控制包.数据时隙分为预留时隙与竞争时隙两部分.其中,数据时隙是控制时隙的 2 倍.网络中的每个节点分配一个预留时隙,节点遵循两跳之外复用原则,根据业务负载申请竞争时隙,且网络中的每个节点拥有全网路由信息.

但是,随着网络规模的增大,控制时隙和数据时隙增多,时帧变长,导致时延增大、时隙复用率降低和网络灵敏度减弱.每个节点维护的路由条目增加,网络开销增大,路由收敛慢.针对上述问题,本文对 M-USAP 协议帧结构进行改进,提出 C-USAP 协议.

1.2 C-USAP 帧结构设计

C-USAP 协议的思想是将网络进行分簇,每个簇占用一个频道.簇内通过 USAP 实现时隙复用,提高节点对时隙的复用率,从而提高节点的平均吞吐

量.簇间采用多频段分割技术,各个簇工作在不同频道,簇与簇之间互不干扰,簇间节点之间通过网关切频进行通信.改进后的 C-USAP 协议帧结构分为簇间探测帧、簇内控制帧、簇间交互帧和数据帧 4 部分,如图 2 所示.

- 1)簇间探测帧所有节点工作在同一频率,主要用于选取网关.
- 2)簇内控制帧普通节点工作在本簇,网关节点偶数帧工作在本簇,奇数帧工作在对簇.在本节点所属控制时隙发送邻居发现(NMOP0)、时隙申请(NMOP1)和时隙确认(ACK 包),用于节点申请数据时隙.
- 3)簇间交互帧发送 NMOP4 包,更新 NMOP0 包,簇首对网关、新入网节点进行控制时隙分配.
- 4)数据时隙根据本节点与目的节点所属簇,考虑是否切频发送上层的广播、单播业务.

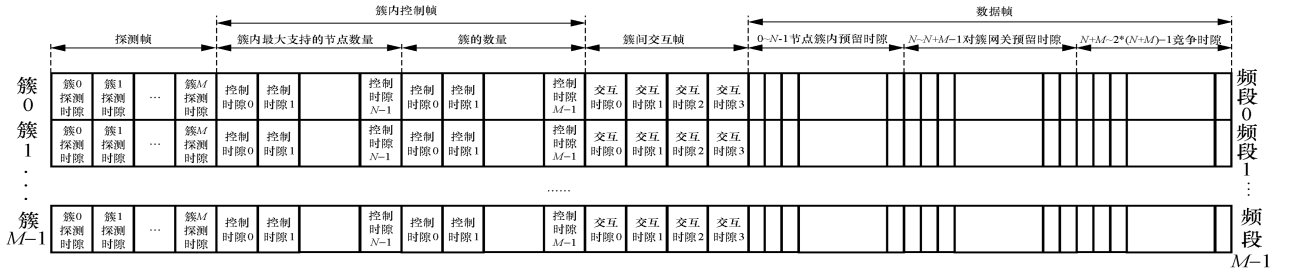


图 2 C-USAP 帧结构

Fig.2 Frame structure of C-USAP

2 C-USAP 控制信令交互

2.1 簇检测信令

在子网间探测帧,帧内时隙数与簇的个数相同,每个簇占用一个时隙.所有节点在不同时隙统一切频到占用当前时隙的簇频率,各簇的所有节点在本簇占用的时隙发送簇检测包(cluster-detect),在其他时隙监听其他簇的检测包进行邻居发现,每个节点可以同时接收多个检查包.如图 3 所示,簇 0 ~ M 分别占用探测时隙 0 ~ M 进行邻居发现,在探测时

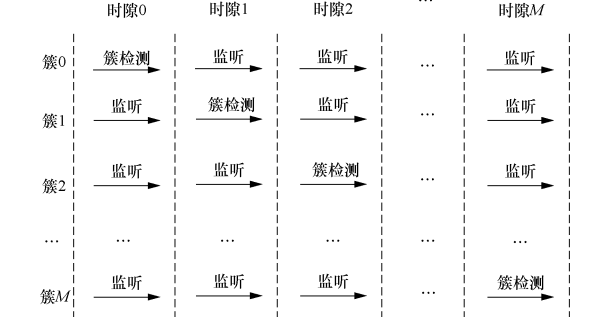


图 3 探测帧

Fig.3 Frame detection

隙 0,所有节点切频到簇 0 所占用频率,簇 0 节点发送簇检测信令,其他节点监听进行邻居发现.簇检测信令包括簇 ID、节点 ID 和时元循环数等信息.

2.2 簇内信令交互

在多跳 Ad Hoc 网络下,需要为邻居节点之间的数据传输合理的分配时隙,以避免传输冲突.文献[13-14]簇间通过簇首进行通信,在每个时隙开始设定载波侦听部分,簇首采用双时隙,优先保证簇间的通信,但导致簇内通信存在大量丢包.本文簇内采用 USAP 协议,把簇内控制帧分为两部分,分别为簇内控制时隙、簇间网关节点控制时隙.每个节点占用 1 个控制时隙,普通节点工作在本簇,网关节点作为一种特殊身份的节点,能够工作在两个簇.其中,网关节点在对簇的控制时隙编号 R_i 满足

$$R_i = N + C_i \tag{1}$$

式中: N 为本簇控制时隙支持的最大簇内节点数; C_i 为网关节点所属的簇 ID.

簇内控制帧结构如图 4 所示.簇内控制帧主要用于邻居发现、时隙申请、时隙确认,交换与更新节点存储的消息表,根据传输情况来分配时隙,并了解

剩余可用的时隙情况。

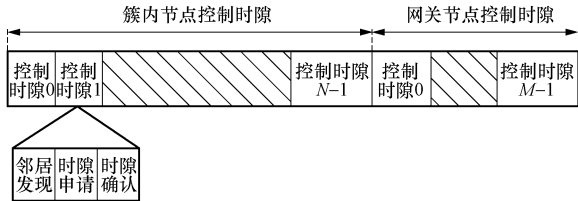


图 4 簇内控制帧结构

Fig.4 Inner-cluster control frame structure

1)邻居发现.每个节点在自己所属的控制时隙广播 NMOP0 包进行邻居发现,NMOP0 包格式如图 5 所示。



图 5 NMOP0 包格式

Fig. 5 NMIP0 packet format

簇首跳数为本节点离簇首的跳数,根据收到邻居节点的 NMOP0 包进行比较更新处理获得;邻居信息是本节点收到邻居节点的 NMOP0 包,本节点将邻居节点作为自己的一跳邻居,同时解析邻居节点的 NMOP0 包,将邻居节点的一跳邻居信息作为自己的二跳邻居策略新建或更新邻居信息;控制时隙分配是簇首根据收到的 NMOP0 包对新节点入簇进行控制时隙分配,普通节点收到 NMOP0 包只对控制时隙分配信息进行转发;收到 NMOP4 包的节点更新 NMOP0 中新节点信息,其余节点进行转发。

控制时隙分配仅能簇首进行操作,普通节点进行转发.簇首收到下层的 NMOP4 包或者根据 NMOP0 包中新节点信息,考虑本簇负载、资源剩余情况对申请加入本簇的节点的准入性进行仲裁并进行控制时隙分配。

2)时隙申请.每个节点根据业务量的大小计算所需的数据时隙数量,根据已分配的数据时隙数确定是否需要申请时隙或者释放时隙.每个节点将自己所需要申请的时隙信息通过 NMOP1 广播给其邻居节点.当节点收到来自邻居节点的 NMOP1 包对其进行解析,收集所有邻居节点的时隙申请信息,然后统一进行时隙仲裁,以确定将时隙资源分配给哪个邻居节点占用.图 6 为 NMOP1 包格式。

节点在申请时隙时遵循两跳之外复用原则,普通节点有一套时隙表,网关节点有两套时隙表.网关节点在本簇申请时隙时考虑在对簇的时隙使用情况,在对簇申请时隙时考虑在本簇的时隙使用情况。

时隙有 4 个状态,分别为 00、01、10、11.其中:00

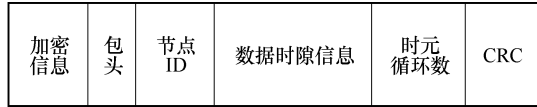


图 6 NMOP1 包格式

Fig. 6 NMOP1 packet format

为空闲;01 为本节点占用;10 为一跳邻居节点占用;11 为二跳邻居节点占用.当网关节点在本簇申请时隙时,查询网关在对簇维护的时隙状态表,如果对簇时隙状态表中当前时隙的状态为 01 或者 10 时,网关在本簇内不能申请当前时隙,如果对簇时隙状态表中当前时隙的状态为 00 或者 11 时,网关在本簇可以申请该时隙.与此类似,网关在对簇申请时隙时同理。

3)时隙确认.在 ACK 帧时,节点收到每个邻居发送的时隙申请请求,会对这些请求进行仲裁,将仲裁的结果在本节点所属的时隙通过 NMOP2 包广播给每个邻居并在其他时隙进行监听处理.图 7 为 NMOP2 包格式。

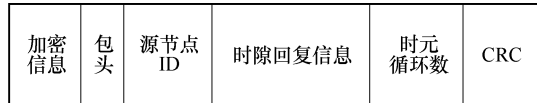


图 7 NMOP2 包格式

Fig. 7 NMOP2 packet format

仲裁策略满足

$$c_j = \sum_{i=0}^{N+M} (L_j(i) + a \cdot O_j(i)) \quad (2)$$

式中: c_j 为占用当前时隙 j 的节点数,如果 $c_j > 1$,则存在冲突需要进行仲裁;如果 $c_j = 1$,不存在冲突; $c_j = 0$,没有节点申请本时隙. M 为分簇个数.其中, $j \in [0, 2N - 1]$,

$$L_j(i) = \begin{cases} 0, s_j(i) = 00 \\ 1, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$O_j(i) = \begin{cases} 0, s_j(i) = 00 \\ 1, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$a_i = \begin{cases} 0, g_i \text{ 为假} \\ 1, g_i \text{ 为真} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_j(i)$ 为本地二维时隙表节点 i 占用当前时隙 j 的标识; $O_j(i)$ 为对簇二维时隙表节点 i 占用当前时隙 j 标识; $S_j(i)$ 为节点 i 占用时隙 j 的状态; g_i 为网关标识.当节点为普通节点,只考虑本地二维时隙表, $a_i = 0$;当节点为网关节点,考虑本地和对簇二维时隙表, $a_i = 1$ 。

如果时隙申请存在冲突,当前时隙是本节点的预留时隙,则将本时隙分配给这个节点;如果已经有节点对该时隙申请成功,则将该时隙分配给这个节

点,否则,分配给最小节点 ID.仲裁成功或者没有冲突,将节点的时隙编号和节点 ID 回复给源节点.

收到邻节点的 NMOP2 包插入本节点 NMOP2 数据包缓存队列中.如果是普通节点或者工作在本簇的网关节点,从本簇邻居节点信息中获取本节点的邻节点数目.如果是工作在对簇的网关节点,从对簇邻居节点信息中获取本节点的邻节点数目.只有本节点收到的 NMOP2 数据包数量等于邻居节点数量的情况下,才能对 NMOP2 包进行处理.若本节点收到所有邻居节点的 ACK,表明此时隙可以使用.

2.3 簇间信令交互

簇间交互帧用于节点的入簇,新节点的入簇流程如图 8 所示.

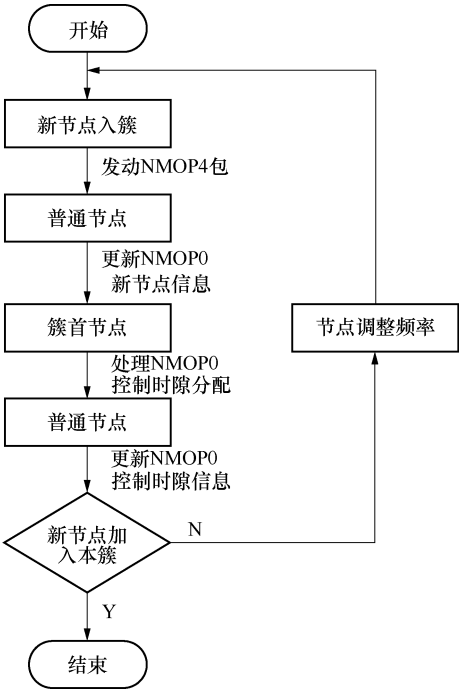


图 8 新节点入簇流程

Fig.8 Flowchart of new nodes into the cluster

网关节点根据时元循环数进行切频,偶数帧工作在本簇,奇数帧工作在对簇.新节点入簇时,考虑网络负载,簇内节点最大数因素,每次最多允许 4 个节点入簇.新节点在簇间控制时隙发送 NMOP4 包,簇首收到 NMOP4 包,根据本簇资源剩余情况和网络负载对申请加入本簇的节点的准入性进行仲裁并分配控制时隙.距离簇首 k 跳的节点收到 NMOP4,更新 NMOP0 包中新节点信息,经过 k 次转发告知簇首,然后簇首处理.距离簇首 k 跳的邻居节点收到 NMOP0 包转发控制时隙分配信息给新节点.图 9 为新节点入簇申请 NMOP4 包格式.

加密信息	包头	源节点ID	所属簇ID	时元循环数	CRC
------	----	-------	-------	-------	-----

图 9 NMOP4 包格式

Fig. 9 NMOP4 packet format

2.4 网关选取

不同簇之间通过网关进行通信^[14].C-USAP 协议中节点通过远程终端把获取到的簇检测信息上传给网络层.网络层根据簇检测信息构建网关申请消息,发送单播包给簇首,簇首收到节点的网关申请消息,将信息存入网关候选表,根据网关选取策略选出网关构建网关表,在本簇内广播网关通告信息.每个簇需要向对簇各推荐一个且仅有一个网关,网关选取流程图如图 10 所示.

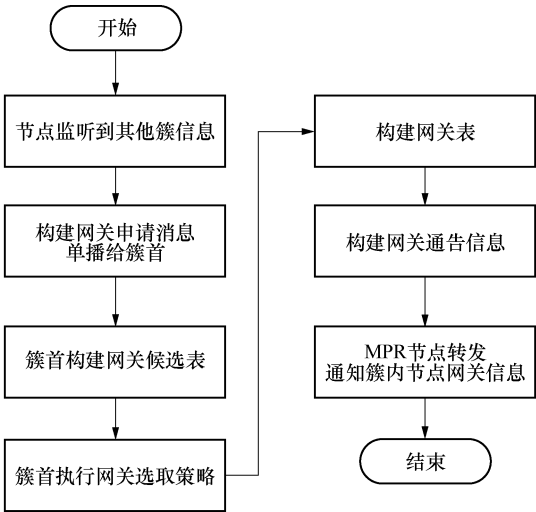


图 10 网关选取

Fig.10 Gateway selection

候选网关 i 权重 w_i 选取为

$$w_i = \alpha / \sqrt{(n_j - \frac{\sum_{j=0}^l n_j}{l})^2} + \beta \cdot \overline{RSSI_i} \quad (6)$$

式中: l 为本簇与对簇候选网关节点数, n_j 为第 j 个候选网关监听到对簇节点的个数, $\overline{RSSI_i}$ 为候选网关 i 监听到对簇节点的平均信号强度; α 和 β 为权重因子,满足 $\alpha + \beta = 1$,由系统进行配置.

根据式(6)计算 w_i , 选取权值最大的节点为本簇与对簇网关.

3 仿真结果及分析

3.1 实验平台及仿真参数

OPNET Modeler 是当前业界领先的网络技术开发环境,用于设计和研究通信网络、设备、协议和应用,为开发人员提供建模、仿真及分析的集成环境,减轻编程及数据分析的工作量.

本文基于 OPNET 进行仿真,修改 M-USAP 协议的帧结构、包格式并创建新的帧结构、包格式.同时,利用 OPNET 图形化方式实现对 C-USAP 网络拓扑、节点属性和仿真参数配置等,测试不同网络规模场景下 M-USAP、C-USAP 性能.实验仿真参数设置见表 1.

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters configuration

参数	数值
节点数	50~200 个
区域大小	100 km×100 km
仿真时间	600 s
通信范围	15~20 km
网络层协议	Modified-OLSR
链路层协议	USAP Cluster
测试流量	100 kbits/s
发包数	100 个
带宽	速率自适应
	256 kbits/s~5 Mbits/s

3.2 性能分析

本节在不同节点场景下测试 C-USAP,并与 M-USAP 进行业务接收量、时延抖动、端到端时延和时

隙复用率对比分析.

各场景加载两条业务流,业务流为 100 kbits/s,包大小为 1 kbits/s,每秒发送 100 个包.

时隙复用率计算公式为

$$C = \frac{\sum_{i=0}^{G-1} D_i}{T}$$
 (7)

式中: G 为全网中节点数,即 $G = \sum_{j=0}^M n_a$, n_a 为子网 a 中节点数量, D_i 表示第 i 个节点占用的数据时隙数量; T 为子网中一个时元的数据时隙数量.

根据发送与接收包的仿真时间获取端到端时延.

1)业务收发情况及延时抖动.图 11 为 64 节点、128 节点、192 节点网络场景分别加载 100 kbits/s 业务流时,M-USAP 协议与 C-USAP 协议业务接收量统计对比.

图 12 为图 11 业务接收量对应的 M-USAP 与 C-USAP 的时延抖动.图 13 为节点不断变化情况下,M-USAP 与 C-USAP 协议的时延抖动对比.

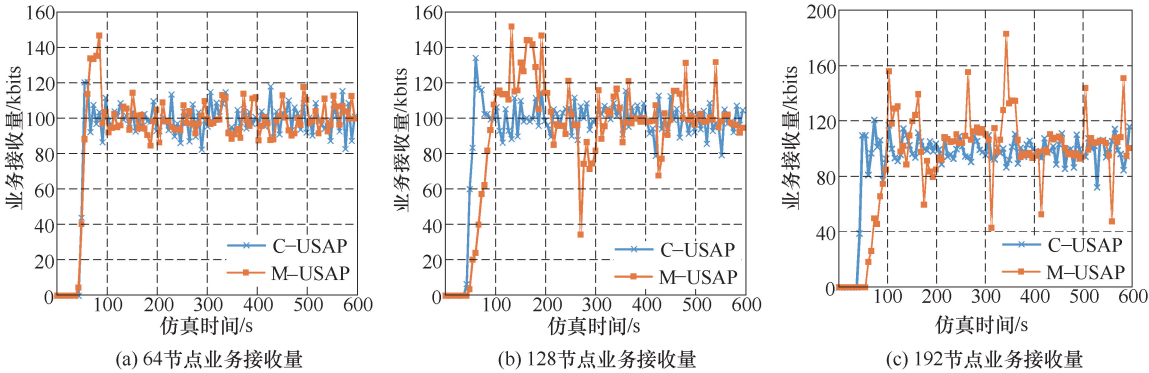


图 11 节点业务接收量

Fig.11 Traffic receive of nodes

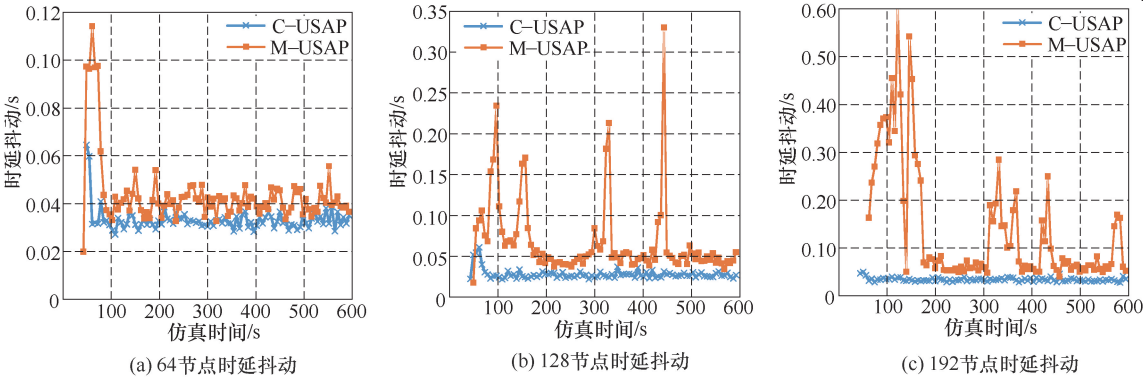


图 12 节点时延抖动

Fig.12 Packet jitter of nodes

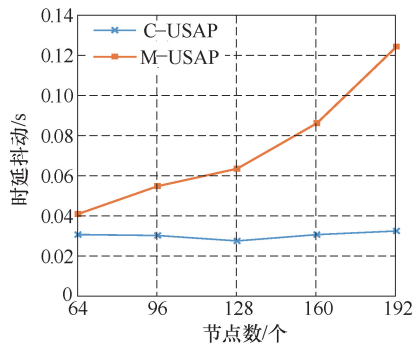


图 13 M-USAP、C-USAP 时延抖动

Fig.13 Packet jitter of M-USAP and C-USAP

图 11 中在网络规模为 64 节点时,M-USAP 与 C-USAP 协议业务接收量平稳.在网络规模为 128、192 节点时,M-USAP 协议出现大量抖动,C-USAP 接收量保持平稳.图 12 中在同等规模下,M-USAP

时延抖动大于 C-USAP.且随着网络规模的增大,M-USAP 业务接收量不稳定,出现大幅度抖动.

2)端到端时延.图 14 为网络加载 100 kbits/s 业务流时,节点数为 64、128、192 情况下 M-USAP 与 C-USAP 端到端时延对比.图 15 为节点不断变化情况下,M-USAP、C-USAP 协议端到端时延性能对比.网络刚开始进行仿真即初始组网过程,节点未接收业务,时延增大;路由收敛,节点接收业务,时延减小趋于平稳.图 14 中在网络规模为 64 节点时,M-USAP 时延约为 1 s,C-USAP 时延约为 0.4 s.在网络规模为 128 节点时,M-USAP 时延约为 2.5 s,C-USAP 时延约为 1 s.在网络规模为 192 节点时,M-USAP 时延很大,C-USAP 时延约为 1.2 s.M-USAP 时延明显大于 C-USAP.

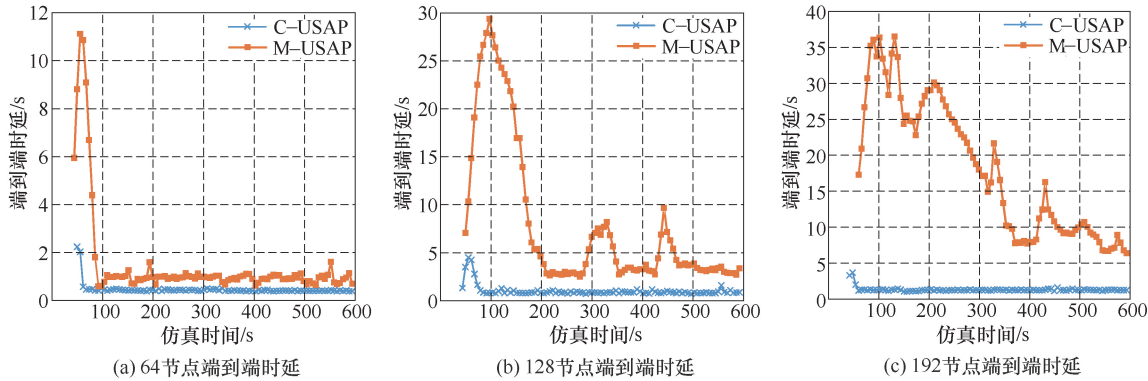


图 14 节点端到端时延

Fig.14 End to end delay of nodes

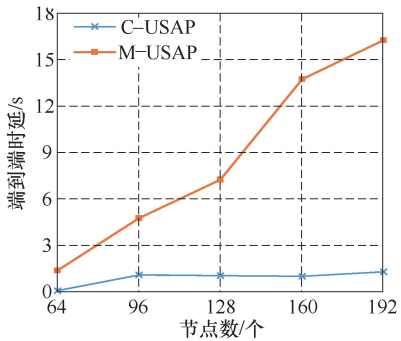


图 15 M-USAP、C-USAP 端到端时延

Fig.15 End to end delay of M-USAP and C-USAP

M-USAP 协议中节点拥有全网的路由信息,C-USAP 协议中普通节点有本簇节点路由信息,网关节点有本簇和对簇节点路由信息.根据图 14 (a)、(b)、(c)仿真开始,节点间存在时延,从坐标横轴可以看出 C-USAP 路由收敛时间约为 42 s,M-USAP 协议在节点规模增大时,路由开销大、收敛慢.C-USAP 协议路由收敛明显优于 M-USAP 协议.

的 IP 业务流、节点数为 64、96、128 时,M-USAP 与 C-USAP 协议时隙复用率对比.C-USAP 协议与 M-USAP 协议申请时隙时遵循两跳之外复用原则.路由收敛,节点根据业务流来计算分配时隙数量.M-USAP 协议中 $T=2S$, S 为网络中所有节点个数, C-USAP 协议 $T=2(N+M)$.根据式(7)计算时隙复用率,C-USAP 协议时隙复用率明显优于 M-USAP 协议.

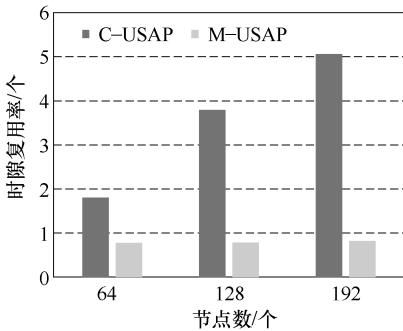


图 16 节点时隙复用率

Fig.16 Slot reuse rate

3)时隙复用率.图 16 为对网络加载 100 kbits/s

从本节仿真结果图中可知,在网络节点增大时,C-USAP 协议在业务收发量、时延抖动、端到端时延、路由收敛和时隙复用率方面明显优于 M-USAP.

4 结论

1) 本文作者采用分簇技术,改进 M-USAP 协议,提出了一种新的适用于大规模无线自组织网络的媒体接入控制协议 C-USAP.该协议中节点发送接收不同的控制信令,在簇间控制帧选取网关,在簇内交互帧申请时隙,在簇间交互帧网关切频、新节点入簇,在数据时隙根据节点频率发送接收广播、单播业务.

2) 仿真结果得知:C-USAP 使得当网络规模增大时,网络业务接收量、路由收敛、时延抖动、端到端时延和时隙复用率方面性能显著提升,实现了降低网络时延、减小路由开销、快速收敛拓扑和提高网络灵活性.

对于本文提出的 M-USAP 协议,还需要进一步优化.网关节点工作在本簇或对簇,造成对簇或本簇控制时隙浪费.本簇为其他所有簇网关分配控制时隙,当本簇与某簇没有直接网关节点交互,造成簇内控制帧对簇网关时隙的浪费.

参考文献(References):

- [1] TORKSTANI J A, MEYBODI M R. LLACA: an adaptive localized clustering algorithm for wireless Ad Hoc networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2011, 37(4): 461—474.
- [2] LEONE P, SCHILLER E M. Self-stabilizing TDMA algorithms for dynamic wireless Ad Hoc networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 9(8): 1—17.
- [3] JIAN N B, TAN R S. Q-CSMA: queue-length-based CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(3): 825—836.
- [4] DANG D N M, HONG C S. A hybrid multi-channel mac protocol for wireless ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Communications, 2012: 6489—6493.
- [5] KIM J H, YOO S J. TMCMP: TDMA based multi-channel MAC protocol for improving channel efficiency in wireless Ad Hoc networks[C]// 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, 2009: 429—434.
- [6] LI G, DONG N, ZHANG X. Research on medium access control of mobile Ad Hoc network based on frequency hopping communication[C]// 6th IEEE International Conference on Software, 2015: 545—548.
- [7] 叶林睿. 基于 TDMA 的 Ad Hoc 网络 MAC 协议研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- YE Linrui. The research of MAC protocol based on TDMA in Ad Hoc networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] JAVAD A T, MOHAMMAD R. An efficient cluster-based CDMA-TDMA scheme for wireless mobile Ad Hoc networks[J]. Journal of Network and Computer Application, 2010, 1: 477—490.
- [9] 马豫青, 李晓宇. Ad Hoc 网络自适应安全加权分簇算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3346—3449.
- MA Yuqing, LI Xiaoyu. Adaptive security weighted clustering algorithm of Ad Hoc network[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(10): 3346—3449. (in Chinese)
- [10] ZHANG L, SOONG B H, XIAO W. An integrated cluster-based multi-channel MAC protocol for mobile Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(11): 3964—3974.
- [11] YOUNG C D. USAP: A unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol[C]// IEEE Military Communications Conference, 1996: 235—239.
- [12] 李广辉. 基于 WNW 战术波形网络的拓扑控制及路由优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- LI Guanghui. Research on topology control and route optimization based on WNW tactical waveform network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [13] 雷洪利, 田雨, 马林华, 等. 减少无线自组网簇间通信冲突的 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2014, 40(3): 158—162.
- LEI Hongli, TIAN Yu, MA Linhua, et al. Mac protocol for reducing inter-cluster communication conflict in wireless Ad Hoc network[J]. Computer Engineering, 2014, 40(3): 158—162. (in Chinese)
- [14] 刘敏, 韩继红, 王亚弟. 战术互联网中基于信任的 k 跳复合度量分簇算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 521—528.
- LIU Min, HAN Jihong, WANG Yadi. k -hop compound metric clustering algorithm based on trust in tactical Internet[J]. Journal of Computer Application, 2010, 30(2): 521—528. (in Chinese)