

## 动态时延的非均匀 Ad Hoc 网络 MAC 设计和分析\*

魏小龙, 李建海, 徐浩军, 杨海东

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

通讯作者: 魏小龙, E-mail: 491769662@qq.com

**摘要:** 针对密度非均匀 Ad Hoc 网络, 提出了一种基于预留的时隙混合类 MAC——RTV 协议. 该协议将业务区分为预留和非预留, 以提供不同质量的接入传输服务. 通过时延调整预留算法来满足多种预留业务的不同时延要求. 同时, 通过预留机制解决了 TDMA 技术不适应于密度非均匀网络的问题. 最后, 通过数学建模分析得到了协议的时隙利用率和系统吞吐量. 仿真实验结果表明: 在密度非均匀的大型 Ad Hoc 网络中, RTV 协议可以为混合业务的传输提供时延保障, 并在时隙利用率和吞吐量方面呈现出较好的性能.

**关键词:** 密度非均匀 ad hoc 网络; 媒体接入控制协议; 实时业务; 预留; 延时调整  
中图分类号: TP393

中文引用格式: 魏小龙, 李建海, 徐浩军, 杨海东. 动态时延的非均匀 ad hoc 网络 MAC 设计和分析. 软件学报, 2014, 25(11): 2666-2674. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4552.htm>

英文引用格式: Wei XL, Li JH, Xu HJ, Yang HD. Design and analysis of kinematic delay MAC for non-uniform ad hoc network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(11): 2666-2674 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4552.htm>

### Design and Analysis of Kinematic Delay MAC for Non-Uniform Ad Hoc Network

WEI Xiao-Long, LI Jian-Hai, XU Hao-Jun, YANG Hai-Dong

(Institute of Aerospace Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Corresponding author: WEI Xiao-Long, E-mail: 491769662@qq.com

**Abstract:** A hybrid slot MAC protocol based on reservation mechanism for multi-density ad hoc network, short for RTV, is presented in this paper. The service is distinguished into the reservation and the contention-free in RTV for providing different qualities of access transportation service. The variable delay reservation algorithm is adapted to support different time-delay services, which solves the problem that TDMA isn't applicable to the multi-density network. The throughputs and slot-utilization rate of the RTV are obtained. The simulation results indicate that the RTV presents good performance on throughputs and slot-utilization rate in large multi-density network.

**Key words:** non-uniform ad hoc network; MAC protocol; real-time service; reservation; variable delay

随着 Ad Hoc 组网技术应用范围的不断扩大, 大型密度不均匀的网络<sup>[1]</sup>(如智能交通网、战术 Ad Hoc 网络等)在混合业务环境下, 为语音、图像等实时业务提供高效信道接入和可靠的传输保障的技术, 成为近年来的研究热点<sup>[2]</sup>. 当前广泛应用的单信道的随机竞争媒体接入控制(MAC)协议(如 802.11DCF 协议簇<sup>[3]</sup>)的接入时延不稳定, 不能长时间为实时业务提供传输保障. 已有学者针对大型自组网中的实时业务保障问题提出了改进的 ADAPT 协议<sup>[4]</sup>作为解决方案. 该协议通过 TDMA 方式保障时延, 同时探测网络的局部拓扑信息提高退避算法的效率, 以提高原 ADAPT 协议的时隙利用率. 也有学者提出了针对较高密度 Ad Hoc 网络的动态时隙分配 MAC-QR 协议<sup>[5]</sup>. 该协议使用多重伯努利握手过程分散接入冲突.

但基于 TDMA 方式的动态时隙分配和时隙混合类 MAC 并不能适应密度不均匀的多跳 Ad Hoc 网络(简化模型如图 1 所示). 原因如下: 第一, 固定 TDMA 时隙策略<sup>[6]</sup>不适应于分布式网络; 第二, 对于节点密集的分布式子

\* 基金项目: 陕西省自然科学基金(2009JM8001-4); 陕西省电子信息系统集成重点实验室重点基金(2011.ZD01)

收稿时间: 2013-07-04; 修改时间: 2013-09-24; 定稿时间: 2013-12-09

网,如 D2 子网,动态 TDMA 需要频繁更新时隙安排以满足无碰撞的传输要求,此时控制成本会严重挤占带宽资源<sup>[7]</sup>,进而牺牲了协议的吞吐量;第三,TDMA 的帧结构具有统一性,对于密度相差巨大的子网来说,如 D2 和 D5 子网,要保障 D2 等高密度子网的传输就会拖累 D5 等低密度的子网付出相同的控制成本和延时成本,进而严重降低整个网络的性能。

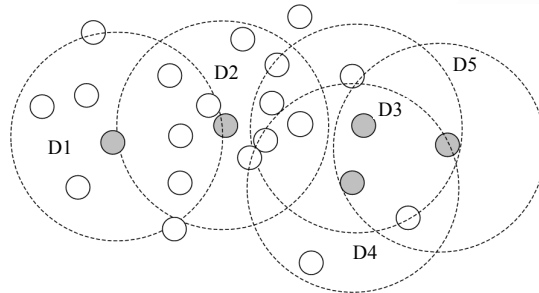


Fig.1 Simplified model of multi-density multi-hop ad hoc networks

图 1 节点密度非均匀的多跳 Ad Hoc 网络简化模型

基于上述分析和问题,本文设计了一种全新的采用预留机制和时延调整算法的 MAC 协议——RTV 协议.协议通过时隙预留取代 TDMA 时隙分配以适应密度非均匀的多跳分布式网络,并提出时延调整算法以满足不同实时业务的时延要求。

### 1 RTV 协议

RTV 协议运行需要满足以下条件:网络全局同步;节点具有冲突检测能力;具有唯一的 MAC 地址;有一定的内存来保存时隙状态表。

#### 1.1 帧结构

协议的时隙结构如图 2 所示,分为预留时隙和非预留时隙。

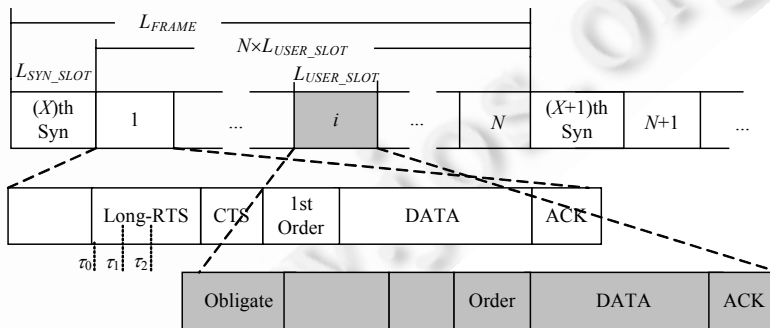


Fig.2 Frame of protocol

图 2 协议帧结构

如图 2 所示,RTV 协议帧由 1 个同步时隙(Syn\_Slot)和  $N$  个用户时隙(User\_Slot)组成,同步时隙在每帧的开始, $N$  由网络一次全网同步的有效期决定:

$$L_{FRAME} = L_{MAX\_VALID\_SYNCHRONIZATION} = N \times L_{USER\_SLOT} + L_{SYN\_SLOT} \tag{1}$$

其中, $L_{USER\_SLOT}$  是用户时隙长度, $L_{SYN\_SLOT}$  是同步时隙长度, $L_{FRAME}$  是帧长度, $L_{MAX\_VALID\_SYNCHRONIZATION}$  是一次全网同步的最大时间间隔.这种划分帧结构的方式能够最大程度地提高同步效率.RTV 用时隙状态表<sup>[8]</sup>作为时隙调度的基本工具,因此,每个用户时隙按顺序进行不重复编号。

- 预留时隙用于保障实时业务对信道的持续预留,由目标节点预留标志(obligation)、源节点预约标志(order)、数据(DATA)、应答(ACK)这 4 个分组周期组成.
- 非预留时隙用于新业务接入信道和部分数据业务的传输,由不对称虚拟载波监听(Long-RTS,CTS)、源节点预约初始标志(1st order)、数据、应答这 5 个分组周期组成.

### 1.2 RTV协议描述

协议的用户时隙划分为预留时段、竞争时段、数据时段这 3 个工作时段,如图 3 所示为 RTV 中第  $x$  时隙的竞争接入和数据传输的过程.

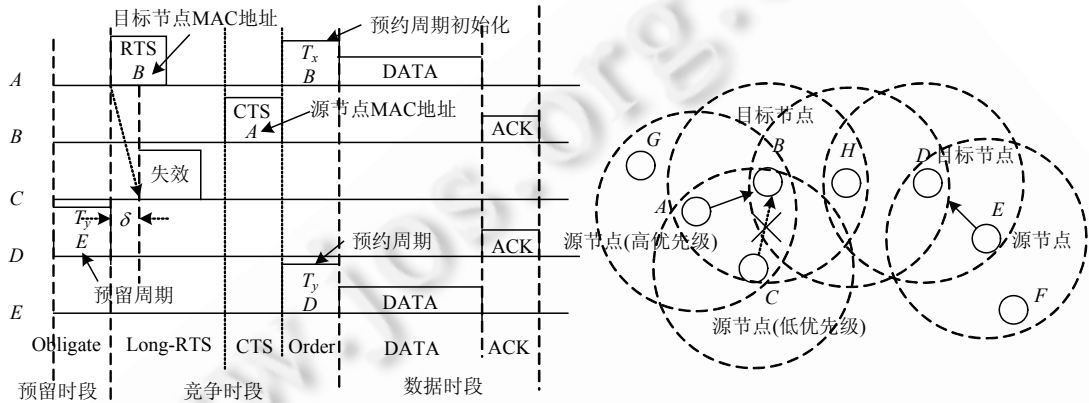


Fig.3 Running processes of protocol

图 3 协议运行过程

#### (1) 非预留时隙工作过程

- 假设节点(A,B,C)所处的子网内第  $x$  时隙非预留,新增业务节点(A,B,C)竞争接入信道,此时,RTV 为源驱动协议.
- 在预留时段内,如果源节点(A,C)没有监听到任何 Obligate 标志,即认为该用户时隙非预留,参与竞争.
- 在竞争时段内,源节点(A,C)根据优先级发送 RTS 分组竞争接入信道,正确接收目标节点(B)的 CTS 分组后,节点(A,B)完成虚拟载波监听过程,一跳范围内邻节点(C,G,H)不再使用此用户时隙.源节点(C)竞争失败后进入二进制指数退避状态<sup>[9]</sup>.源节点(A)接入成功后,根据是否需要预留选择广播 1st Order 分组,分组中包括预约周期  $T$ ,  $T$  根据实时业务时延调整策略选取,一跳邻节点(C,G,H)收到该预留分组后,在时隙状态表中将第  $X+T$  时隙的状态更新为预留.
- 在数据时段,源节点(A)发送数据分组,目标节点(B)成功接收后回发应答分组.

#### (2) 预留时隙工作过程

- 假设节点(D,E)所处的子网内第  $x$  时隙已被节点(D,E)预留,此时,协议转为目标驱动,此设计节省一个控制分组周期.
- 在时隙状态表已处于预留状态的目标节点(D)在预留时段广播 Obligate 标志,分组包括预留周期  $T$ ,源节点(E)在竞争时段广播 Order 标志,也包含预留周期  $T$ .一跳范围内邻节点(F,H)不再使用此用户时隙,同时,在时隙状态表中将第  $X+T$  时隙的状态更新为预留.
- 数据时段和上文相同.

### 1.3 优先级实现

RTV 协议优先级分为 3 级,用 RTS 分组的发送延时  $\tau$  作为业务优先级的实现方式,规定优先级越高的业务发送延时越少,3 个发送时延  $\tau_0$ (无延时),  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  之间的关系为

$$\delta = \tau_1 - \tau_0 = \tau_2 - \tau_1 \tag{2}$$

其中,  $\delta$  的长度大于最大信道传播时延与处理时延之和, 如图 3 所示. 分级 RTS 分组起到了忙音的作用<sup>[10]</sup>, 提供干扰信号阻止一跳内低优先级节点的竞争.

### 1.4 多种实时业务延时调整策略

RTV 协议中的预留周期为时隙长度的整数倍. 设实时业务  $A$  在第  $i$  个时隙接入信道, 预留周期是  $T_1$ , 在业务  $A$  的第  $i+dT_1$  时隙之后, 实时业务  $B$  在第  $j$  个时隙接入信道, 预留周期是  $T_2$ , 此时,  $i+dT_1 < j < i+(d+1)T_1$ . 那么在时隙状态表中, 业务  $A, B$  的预留时隙集合分别为

$$\begin{aligned} Slot_A &= \{i, i+T_1, i+2T_1, \dots, i+nT_1\}, \\ Slot_B &= \{j, j+T_2, j+2T_2, \dots, j+mT_2\}, \end{aligned}$$

其中,  $n, m \in \mathbf{N}^+$ . 要求两项业务不产生预留碰撞, 须满足条件  $Slot_A \cap Slot_B = \emptyset$ , 即

$$i+xT_1 \neq j+yT_2 \tag{3}$$

其中,  $x \in n, y \in m$ .

方程式(3)成立, 是发生碰撞的充分条件. 根据协议可知, 业务  $B$  可以通过收听报文得到  $(i+xT_1)$  和当前时隙差  $\Delta_1 = (j+yT_2) - (i+xT_1)$ ,  $i+xT_1 < j+yT_2 < i+(x+1)T_1$ , 并根据方程式(3)避免与业务  $A$  的发送发生碰撞(如图 4 所示).

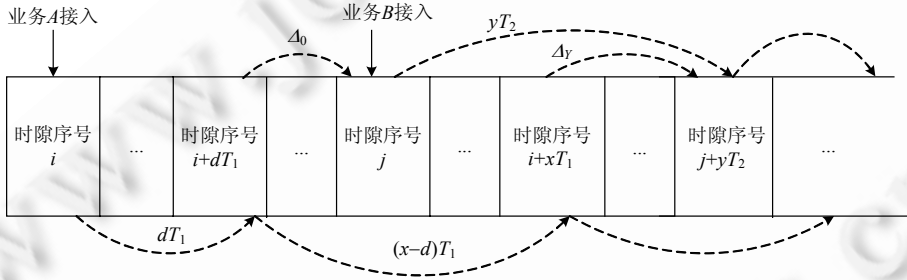


Fig. 4 Reservation model of real-time services

图 4 实时业务预约模型

**结论 1.** 在 RTV 协议中, 当  $A, B$  业务时延要求接近  $T_1 \approx T_2$ , 选择  $T_1 = T_2$  时, 两项业务不会产生预留冲突.

证明: 假设当  $T_1 = T_2$  成立时, 可以找到一组  $(x, y)$  使方程式(3)相等.

根据协议可知, 业务  $B$  在业务  $A$  的第  $i+xT_1$  之后接入,  $(j+yT_2) - (i+xT_1) = \Delta_1 < T_1$ , 那么必有:

$$yT_2 = j - (i+xT_1) = \Delta_0 < T_1.$$

因为  $T_1 = T_2$  成立, 即  $0 < y = \Delta_0 / T_1 < 1$ , 这与假设条件  $y \in \mathbf{N}^+$  矛盾, 故结论 1 成立. □

**结论 2.** 在 RTV 协议中, 当业务  $B$  延时要求低于业务  $A$ , 选择  $T_2 = M \times T_1$  时, 两项业务不会产生预留冲突.

证明同上类似, 略. □

**结论 3.** 在 RTV 协议中, 当实时业务  $B$  延时要求高于业务  $A$  时, 取  $T_1 > T_2$ , 且  $T_1$  与  $T_2$  互质时, 在  $T_2 \times T_1$  个时隙内, 两项业务最多有 1 次碰撞.

证明: 假设在结论 3 成立时, 方程式(3)有两组不同解  $(x, y)$ , 设为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ , 那么化简得到:

$$T_1 / T_2 = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2).$$

因为  $T_1$  与  $T_2$  不可约, 而在  $T_2 \times T_1$  个时隙内,  $x_1 - x_2$  必小于  $T_2, y_1 - y_2$  必小于  $T_1$ , 这两者之间矛盾, 故结论 3 成立. □

考虑到实际中实时业务的传输, MAC 中流媒体业务平均分组延时要求为 30 ms~50 ms, 语音业务为 150 ms~200 ms<sup>[11]</sup>. RTV 协议时隙长度的设计值约为 300  $\mu$ s, 那么流媒体业务周期  $T_{streaming}$  取值在 100~160, 语音业务周期  $T_{voice}$  取值在 500~650. 根据结论 3,  $T$  应取质数,  $T_{streaming} = \{97, 101, 103, 107, 113, \dots\}, T_{voice} = \{499, 503, 509, 521, 523, \dots\}, T_{voice} \approx 5 \times T_{streaming}$ . 实时业务延时调整策略如图 5 所示.

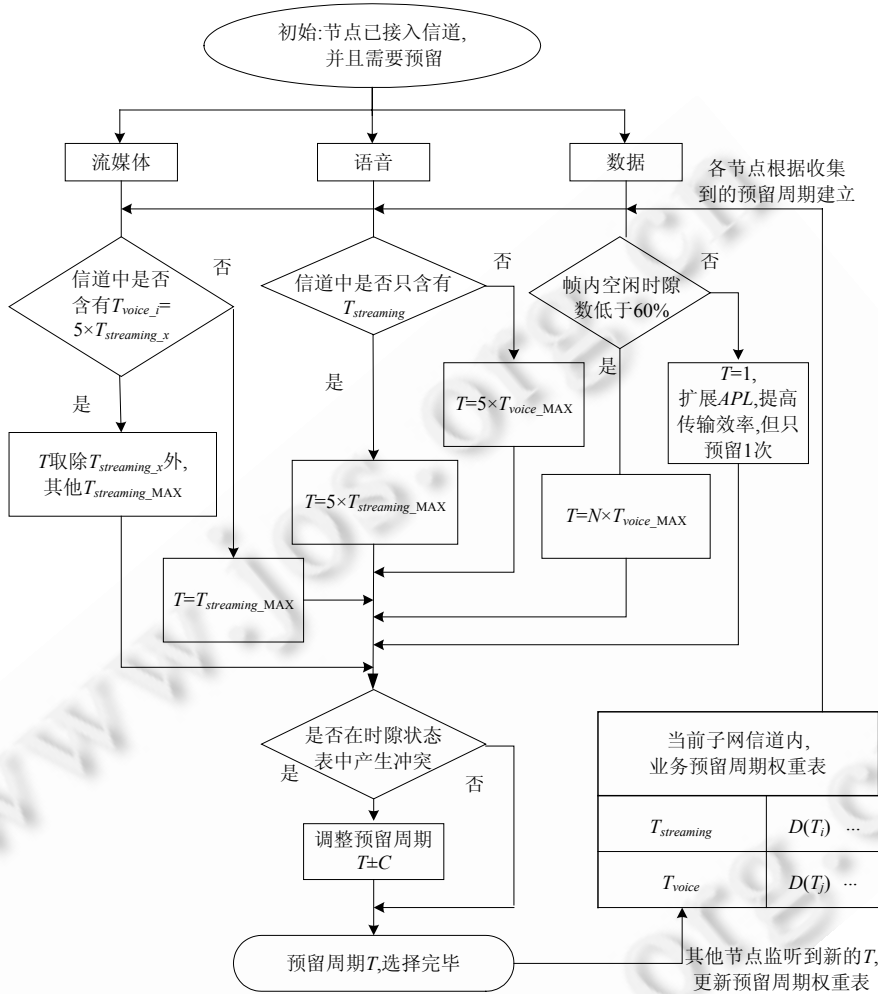


Fig.5 Block diagram of variable delay strategy

图5 实时业务时延调整策略框图

- (1) 节点监听信道内其他业务的 Obligate 和 Order 报文,建立当前信道内预留周期集合  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$  的权重表,  $T_x$  权重表示为  $D(T_x)$ ;若有业务使用  $T_x$  一次,则  $D(T_x)+1$ ;当有业务  $T_x$  发送完成后,  $D(T_x)-1$ ;  $T_{streaming/voice\_D(MAX)}$  表示流媒体/语音预留周期集合中权重最高的预留周期.
- (2) 语音业务  $i$  选择预留周期:当  $T$  中只含有若干  $T_{streaming}$  时,  $i$  的发送周期  $T_{voice\_i} = 5 \times T_{streaming\_D(MAX)}$ , 根据结论 2,  $T_{streaming\_D(MAX)}$  和  $T_{voice\_i}$  不发生碰撞;否则,选择  $T_{voice\_i} = T_{voice\_D(MAX)}$ .
- (3) 流媒体业务  $j$  选择预留周期:当  $T$  中含有  $T_{voice}$ , 且周期为  $5 \times T_{streaming\_x}$  时,  $T_{streaming\_j} = T_{streaming\_D(MAX)}$  (exclude  $T_{streaming\_x}$ ), 根据结论 3, 两项不同业务在约 50 000 个时隙里最多发生一次碰撞;否则,  $T_{streaming\_j} = T_{streaming\_D(MAX)}$ , 根据结论 1,  $T_{streaming\_D(MAX)}$  和  $T_{streaming\_j}$  不发生碰撞.
- (4) 数据业务根据信道环境选择预留周期.在组网的初始有  $D(T_x) = D(T_y)$ , 选择小的  $T_{MIN}$ , 在之后的选择中呈现收敛性, 即  $D(T_{MIN}) \gg D(T_{other})$ , 显著降低了碰撞几率.通过方程式(3)可以计算出一次碰撞的具体时隙, 可以通过临时调整预留周期  $T \pm C$  ( $C$  为最短调整数), 进行主动避让.

## 1.5 对密度非均匀 Ad Hoc 网络的适应性

密度非均匀 Ad Hoc 网络各子网的传输需求差别巨大,RTV 特殊的帧结构和媒体接入控制设计可以同时适应高密度和低密度的传输需求:

- 1) 高密度子网在业务传输中的主要问题是:由于信道环境拥挤、节点快速移动和信源随机变化导致的大量冲突节点、分组碰撞、频繁竞争接入问题.对此,必须降低节点的竞争接入次数,并对节点新的接入需求做出快速响应,同时保护已经接入信道的业务.与竞争类协议不同,在 RTV 中,节点接入信道后可通过预留完成对信道的持续使用,显著地降低了竞争次数,并通过不对称握手对接入竞争进行分流;与时隙分配类协议不同,在 RTV 协议中,协议对节点的竞争接入需求响应不再以帧为单位,而是以时隙为单位,这在响应速度上提高了两个量级;同时,通过预留广播对已经接入信道的业务形成保护.
- 2) 低密度子网在业务传输中的主要问题是:如何提高空闲时隙的利用率.在 RTV 中,不分配时隙,节点可以根据业务量和时隙状态表的情况自由竞争每一个时隙,因此每一个空闲时隙都得到了充分的利用.
- 3) 在基于帧结构的 MAC 中,分组时延和非均匀节点密度的矛盾尤为突出:1 帧内时隙数过少将不能为高密度子网提供基本的传输保障;而时隙数过多时,TDMA 帧较长不能满足实时业务的延时要求. RTV 通过全网统一的时隙状态表取代 TDMA 时隙分配机制,时隙不再需要分配给每个节点,从根本上避免了节点密度对帧长度的约束,并通过预留保证了时延.

## 2 RTV 协议性能分析与仿真

### 2.1 时隙利用率

假设信道是理想的无差错对称信道,由于各节点业务的随机性和独立性,可设每个节点的分组到达数  $\xi_1$  服从参数为  $\lambda_1$  的 Poisson 过程.系统状态定义为处于已预留状态的业务数量为  $k(0 \leq k \leq N)$ ,  $G$  为一跳范围节点数,设每项实时业务的分组数量  $\xi_2$  服从参数为  $\lambda_2$  的 Poisson 过程.根据协议的竞争机制,节点  $i$  要成功地竞争一个时隙,须同时满足以下 3 个条件:

1. 节点  $i$  竞争信道,向节点  $j$  传输数据报文的概率  $p$  为公式(4),其中,  $T_f$  为 1 帧的时长:

$$p = P_{\xi_1 \geq 1}(\lambda_1 T_f) = \sum_{\xi_1=1}^{\infty} \frac{(\lambda_1 T_f)^{\xi_1}}{\xi_1!} e^{-\lambda_1 T_f} = 1 - P_{\xi_1=0}(\lambda_1 T_f) = 1 - e^{-\lambda_1 T_f} \quad (4)$$

2. 当前时隙不是已预留时隙的概率  $q$  为公式(5),其中,  $T = \max(T_i, \xi_2)$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ,  $\xi_2 \in \{1, 2, \dots, Z\}$ ,  $T_i$  为  $\xi_2$  对应的预留周期:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{\xi_2=1}^Z \xi_2 \cdot P_{\xi_2}(\lambda_2 T)}{T} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{\xi_2=1}^Z \xi_2 \cdot \frac{(\lambda_2 T)^{\xi_2}}{\xi_2!} e^{-\lambda_2 T}}{T} = 1 - \frac{k}{T} \sum_{\xi_2=1}^Z \xi_2 \cdot \frac{(\lambda_2 T)^{\xi_2}}{\xi_2!} e^{-\lambda_2 T} \quad (5)$$

3. 目标节点  $j$  及其任何  $M$  个邻节点都不竞争当前时隙的概率为

$$P_{receive}(M, p) = (1-p)^{M+1} \quad (6)$$

那么,未预留时隙被  $G$  个一跳内邻节点成功利用的概率为

$$P_{success}(G, M, q, p) = C_G^1 q p (1-p)^{M+1} \quad (7)$$

将典型参数  $\lambda_1 T_f = 0.1$ ,  $\lambda_2 T = 300$ ,  $M = 10$ ,  $G = 5$  代入得:  $P_{success} \approx 0.91$ .

### 2.2 协议吞吐量

已经预留时隙的节点释放时隙的概率为  $Q = 1 - e^{-\lambda_2 T}$ ,由此可得系统状态  $k$  变为状态  $h$  的概率  $P_h$ .系统的吞吐量定义为 1 帧内成功发送数据包的个数,在考虑同步时隙的情况下,系统的归一化吞吐量为

$$S = \frac{NL_T}{L_S + NL_T} \left\{ \sum_{h=0}^N P_h \left[ \sum_{i=N-h}^N NP_{success}(G, M, q, p) + \sum_{i=0}^{N-h} (h+i)P_{success}(G, M, q, p) \right] \right\},$$

其中,  $N$  为每帧内用户时隙的个数,  $i$  为当前帧内的已预留时隙数,  $L_S$  为同步时隙的分组长度,  $L_T$  为用户时隙的分组长度.

### 2.3 实验仿真和分析

本文采用仿真实验的方式评估 RTV 协议性能, 对比协议为 ADAPT, QR. 一般 Ad Hoc 网络的一跳距离的传播时延比分组长度小得多, 故仿真中忽略保护间隔<sup>[12]</sup>. 为了增强仿真结果的对比度和算法的可移植性, RTV 协议时隙结构参数仿照时隙结构相似的 ADAPT, 设定为  $L_{Long-RTS}=28\mu s, L_{CTS-ACK}=16\mu s, APL$  分别为  $100\mu s, 300\mu s, 1000\mu s$ . 数据分组负载参数采用分组间隔服从  $\lambda_1$  的泊松分布, 实时业务采用分组间隔分别为  $\tau_1, \tau_2$  的平均分布, 长度服从  $\lambda_2$  的泊松分布, 按照时隙长度标准化的传输载荷  $G=x \cdot \lambda \cdot APL$  控制  $\tau_1, \tau_2$  和  $\lambda_1, \lambda_2 = a\tau_1 + b\tau_2 + c\lambda_1$ , 其中,  $a, b, c$  为 3 种业务的比例,  $x$  取 5. 仿真网络环境参数如下: 网络规模分别为 24 个、100 个和 200 个节点, 邻节点密度为 5~50, 仿真时间为 500 帧, 每帧 100 个时隙, 同步时隙忽略.

图 6 是在仿真条件下 ( $APL=300\mu s$ , 节点密度 1~10), RTV 和 ADAPT 时隙利用率的对比, 图中 RTV 的时隙利用率明显优于 ADAPT. 这是由于 ADAPT 固定的时隙结构不能较好地适应非均匀密度的多跳网络, 在竞争激烈的条件下, 导致大量时隙被浪费; 而 RTV 协议的时隙利用量会呈现较稳定的趋势, 在  $G=0.6\sim 0.7$  时达到峰值, 在此之后, 因为信道趋于饱和和后竞争会导致.

图 7 为仿真条件 ( $APL=300\mu s$ , 节点密度 1~10) 下, 不同网络规模下 RTV 和 ADAPT 归一化平均吞吐量的比较情况. 从图 7 中可以看出: 与 RTV 协议相比, ADAPT 协议的固定时隙结构不能适应网络中节点的数量, 在 ADAPT 协议的 1 帧内固定分配时隙数量为 10, 随机竞争时隙为 90, 节点载荷的增加导致竞争碰撞倍增, 由此导致吞吐量快速衰减; 而 RTV 协议不断调整的时隙预留策略具有自适应性, 对网络规模不敏感, 尤其在较重负载的环境里 ( $G>0.5$ ), RTV 吞吐量峰值远高于 ADAPT 协议, 由于在饱和的信道里, RTV 的预留策略并不产生随机竞争, 所以吞吐量趋于稳定.

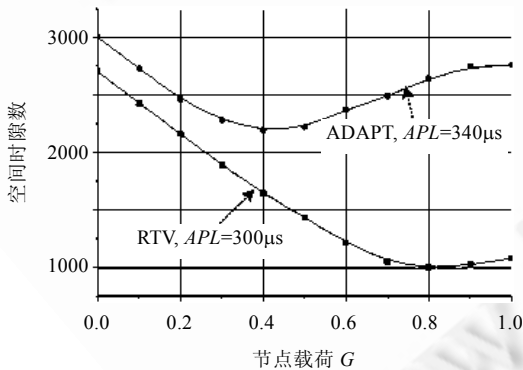


Fig.6 Slot utilization comparison diagram of RTV and ADAPT

图 6 RTV 和 ADAPT 时隙利用率对比图

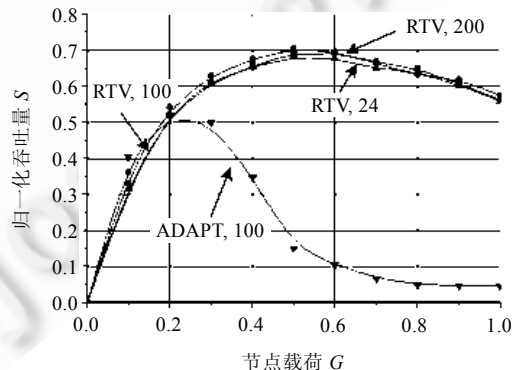


Fig.7 Throughput comparison diagram of RTV and ADAPT in different scale

图 7 RTV 和 ADAPT 不同网络规模吞吐量对比图

图 8 为仿真条件 (网络规模 100,  $APL=300\mu s$ ) 下, RTV 和 ADAPT 在不同节点密度条件下吞吐量的比较情况. 从图 8 可以得到如下的结论: 当节点密度增加时, ADAPT 协议的吞吐量将会得到提升, 因为更多的主时隙可以降低竞争的次数, 这与 TDMA 协议的性能相似; RTV 的吞吐量会随着节点密度增加而减小, 这与典型的竞争协议的性能相似. 值得注意的是, 在信道环境处于重载荷的条件下, RTV 的吞吐量明显优于 ADAPT. 这是因为 RTV 采用的预留机制可以保证业务无冲突地使用多个时隙, 提高了时隙利用率.

图 9 是针对不同业务的平均分组延时的对比结果.由仿真结果可见,RTV 流媒体业务和语音业务的平均分组延时控制在要求以内.这两项业务延时的增加,主要是由于在竞争接入信道失败后,随机选择退避时间造成的.与 QR 延时曲线对比可以证实,RTV 可以为多种实时业务提供不同延时的分级服务.QR 非实时业务的时延优于 RTV,这符合设计延时调整算法的原则.RTV 牺牲了更多的非实时业务的时延来保证实时业务的时延.

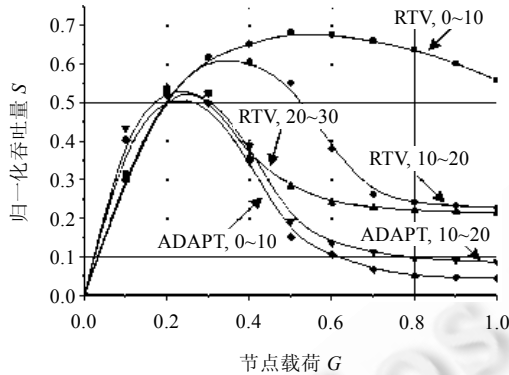


Fig.8 Throughput comparison diagram of RTV and ADAPT in different density of nodes

图 8 RTV 和 ADAPT 不同节点密度吞吐量对比图

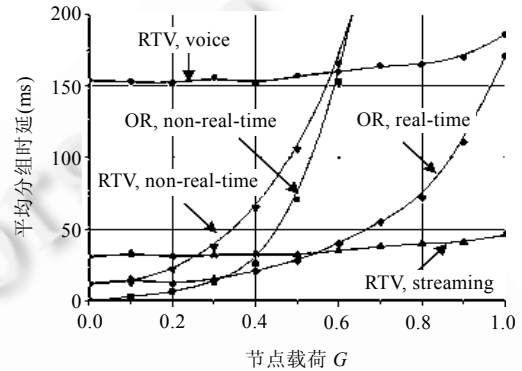


Fig.9 Average packet delay comparison diagram of RTV and QR

图 9 RTV 和 QR 多种业务的平均分组时延对比图

### 3 结束语

随着 Ad Hoc 组网技术应用范围的不断扩大,能否为大型密度不均匀网络提供可靠的传输保障,已成为 Ad Hoc 网络进一步发展的关键.本文针对密度不均匀网络的特点设计了 RTV 协议,仿真验证了 RTV 同时具有竞争和分配类协议的双重优势,符合设计目标.下一步研究的重点将是:如何在 RTV 协议中快速地实现全网同步的技术.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行表示感谢,特别是对空军工程大学大学航空航天工程学院马林华教授、向新副教授的孜孜教诲表示衷心的感谢.

### References:

- [1] Dai H, Yu Q, Wang LF. Research of mobility models in tactical mobile ad hoc network simulation. *Journal of System Simulation*, 2007,19(5):1165-1169 (in Chinese with English abstract).
- [2] Geng R, Li Z, Song L. AQMP: An adaptive QoS MAC protocol based on IEEE 802.11 in ad hoc networks. In: *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. 2009. 245-250. [doi: 10.1109/WICOM.2009.5301799]
- [3] Liu J, Ren FY, Miao LM, Lin C. An adaptive real-time distributed MAC protocol for vehicular ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2011,10(16):576-585. [doi: 10.1109/CHINACOM.2009.5339734]
- [4] Li W, Wei JB, Wang S. An evolutionary-dynamic TDMA slot assignment protocol for ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf*. 2007. 138-142. [doi: 10.1109/WCNC.2007.31]
- [5] Yang HD, Li JH, Deng Y. MAC protocol for MANET with conflict centralized-solving method. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(5):1241-1245 (in Chinese with English abstract).
- [6] Kothapalli K, Bruhadashwar B. A fully dynamic and self-stabilizing TDMA scheme for wireless ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications*. 2010. 511-518. [doi: 10.1109/AINA.2010.97]
- [7] Kim JH, Yoo SJ. TMCMP: TDMA based multi-channel MAC protocol for improving channel efficiency in wireless ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Malaysia Int'l Conf. on Communications*. 2009. 429-434. [doi: 10.1109/MICC.2009.5431545]



- [8] Kant L, Young K, Younis O, Shallcross D, Sinkar K, McAuley A, Manousakis K, Chang K, Graff C. Network science based approaches to design and analyze MANETS for military applications. IEEE Communications Magazine, 2008,46(11):56-61. [doi: 10.1109/MCOM.2008.4689245]
- [9] Jing ZW, Xie Y, Yuan PF, Chen XJ. A cooperative MAC protocol with neighbor nodes information for ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 2012 Int'l Conf. on Machine Learning and Cybernetics. 2012. 578-585. [doi: 10.1109/ICMLC.2012.6358987]
- [10] Vergados DJ, Manolaraki MY, Vergados DD. Evaluation of broadcast scheduling algorithms for ad-hoc TDMA networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems Technology. 2009. 394-400. [doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172480]
- [11] ITU-T Recommendation G.114. One-Way Transmission Time. 2003.
- [12] Wei XL, Li JH, Yang HD. Self adaptive mechanism for distributed operation of the HTDMA. Application of Electronic Technique, 2012,38(8):109-111 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- [1] 戴晖,于全,汪李峰.战术移动术移动 Ad hoc 网络仿真中移动模型研究.系统仿真学报,2007,19(5):1165-1169.
- [5] 杨海东,李建海,邓勇.采用集总式冲突消除算法的 Ad Hoc 网络 MAC 协议.系统工程与电子技术,2009,31(5):1241-1245.
- [12] 魏小龙,李建海,杨海东.HTDMA 协议自协调分布式运行机制研究.电子技术应用,2012,38(8):109-111.



魏小龙(1988-),男,陕西咸阳人,博士生,  
主要研究领域为军事自组织网络技术.  
E-mail: 491769662@qq.com



徐浩军(1965-),男,教授,博士生导师,主  
要研究领域为军事航空通信导航.  
E-mail: electron\_xhgy60@sina.com



李建海(1964-),男,副教授,主要研究领域  
为军事航空通信导航.  
E-mail: electron\_xhgy60@sina.com



杨海东(1974-),男,博士,主要研究领域为  
自组网 MAC,路由技术.  
E-mail: electron\_xhgy60@sina.com