

文章编号: 1004-4353(2015)01-0037-05

# WAVE 网络中基于 DCF 的信道预约方案的时延分析

刘 娇, 朱东弼\*

( 延边大学工学院 计算机科学与技术学科, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 以车载环境下的无线接入(wireless access in vehicular environments, WAVE)网络中基于 DCF 的信道预约方案为基础,通过排队论的分析方法得出了采用该方案时系统中用户预约服务信道所需的平均时延,并研究了系统的主要参数对该平均时延的影响. 研究表明,预约数据包生成的速率和最小竞争窗口对平均时延影响较大,最大退避阶数对平均时延影响较小.

**关键词:** WAVE; DCF 机制; 信道预约; 时延

**中图分类号:** TN915                      **文献标识码:** A

## Delay analysis of channel reservation scheme based on DCF for WAVE network

LIU Jiao, ZHU Dongbi\*

( Department of Computer Science&Technology, College of Engineering,  
Yanbian University, Yanji 133002, China )

**Abstract:** We obtain the delay by queue analysis method based on the channel reservation scheme with DCF in WAVE (wireless access in vehicular environments), the delay is the duration from the arrival epoch at the head of the queue to transmission completion point. We research the influence of the main performance parameters on the average delay. The result shows that the generation rate of reservation packet and the minimum contention window have a great influence on the delay, and the maximum backoff stage almost have no effect on the delay.

**Key words:** WAVE; DCF mechanism; channel reservation; delay

随着通信产业和交通业的迅速发展,智能交通系统(intelligent transport systems, ITS)的应用越发广泛. 其中车载环境下的无线接入(wireless access in vehicular environments, WAVE)是 ITS 的重要组成部分,它主要利用车辆自身的无线设备来实现车辆之间、车辆和路边基础设施之间的无线通信. WAVE 以 IEEE802. 11p 和 IEEE1609. 4 协议作为其行为标准<sup>[1-2]</sup>,在 IEEE1609. 4 协议中将固定长度为 100 ms 的同步时隙分为相同长度的控制信道(control channel, CCH)时隙和服务信道(service channel, SCH)时隙,其中 CCH 是公共信道,主要提供与车载通信网络安全性相关的信息,而 SCH 用于支持非安全性相关信息的传送. 若用户要使用 SCH,必须先通过 CCH 发送请求发送(request for send, RFS)数据包预约 SCH 后才可以使使用 SCH. 但是,在 IEEE1609. 4 协议标准中,固定的时隙长度分配限

收稿日期: 2015 - 01 - 26

\* 通信作者: 朱东弼(1967—),男,教授,研究方向为通信网 MAC 协议、通信网性能分析及排队论模型分析.

制了网络的性能,使得网络无法根据当前的负载状况对信道时隙长度做出自适应调整.近年来,学者们针对如何根据网络状态动态调整信道时隙长度做了一些研究<sup>[3-5]</sup>,这些文献在对动态调整信道时隙长度的信道预约方案进行性能分析时,主要是以吞吐量作为系统的主要性能指标.但是,用户预约 SCH 所需的平均时延对系统的性能同样有着不可忽视的影响,而这些文献中并没有对该性能指标进行分析.鉴于此,本文以基于 DCF 的信道预约方案为基础,探讨了系统中主要参数对用户预约服务信道所需平均时延的影响.

1 系统模型

WAVE 网络中的用户与路边单元(road-side unit, RSU)进行数据的发送/接收时,需要在 CCH 上采用分布式协调功能(distributed coordination function, DCF)机制发送 RFS 数据包预约 SCH. 用户采用文献[6]中的信道预约方案预约,若有空闲的 SCH,则 RSU 给需要的用户分配一个 SCH,并发送一个包含 SCH ID 和传输机会(transmit opportunity, TXOP)的 ACK 作为回应.用户接收到 ACK 后立即切换到分配的 SCH 上,并在 TXOP 时间内进行数据传送.若没有空闲的 SCH,则 RSU 给用户发送 NAK,用户进入退避阶段.其中,用户在发送数据的过程中一直在 SCH 上,只有当数据发送成功后才能再次切换到 CCH 参与下一次竞争.

假设有  $K$  个 SCH,  $N$  个用户, SCH 的传输速率为  $R$ , 传送时间为  $L_{\text{DATA}}/R$ , 每个用户以速率  $\lambda$  按泊松过程生成 RFS 数据包,  $q$  为传送时间的几何分布. 每个要发送 RFS 数据包的用户在  $[0, CW_{\min}]$  中随机选择一个值作为退避计数器的初始值, 其中  $CW_{\min}$  是最小竞争窗口, 可以是  $3, 7, 15, \dots$ . 若用户检测到 CCH 处于空闲状态, 则将退避计数器减 1; 若用户检测 CCH 处于忙状态, 则冻结退避计数器, 直到 DCF 帧间间隔(DCF inter frame space, DIFS) 结束后再重新恢复退避计数器. 当退避计数器减到 0 时, 用户开始发送数据包.

若在发送数据过程中有其他用户同时发送数据, 则会发生碰撞. 当发生碰撞时, 用户的竞争窗口扩大一倍, 并在该窗口值范围内重新选择退避计数器的初始值, 再次进入退避过程. 在退避过程中竞争窗口的值不会无限增大, 竞争窗口的最大值为  $CW_{\max} = 2^m(CW_{\min} + 1) - 1$ , 其中  $m$  为最大退避指数. 竞争窗口到达最大值后保持不变, 直到用户成功发送 RFS 数据包, 此时  $CW$  将被重置为  $CW_{\min}$ .

2 时延分析

用户预约 SCH 所需的平均时延与传送 RFS 数据包的概率  $\tau$  和发生碰撞的概率  $P_{\text{coll}}$  有关, 为求出概率  $\tau$ , 通过跟踪观察单个用户的概率特性, 以 Bianchi 模型<sup>[7]</sup> 为基础, 构建基于 DCF 的信道预约方案的马尔科夫分析模型.

令  $b(t)$  表示  $t$  时刻用户退避计数器的值,  $s(t)$  表示用户在  $t$  时刻的退避阶数, 且

$$Z(t) = \begin{cases} 0, & \text{用户在空闲状态;} \\ (s(t), b(t)), & \text{用户在退避状态,} \end{cases} \quad (1)$$

则  $\{Z(t) | t \geq 0\}$  构成二维连续时间马尔科夫过程, 其状态转移图如图 1 所示.

图 1 中  $P_{\text{coll}}$  为用户在传送 RFS 数据包过程中发生碰撞的概率(包括没有空闲 SCH 的情况). 在分析过程中假设不论用户传送 RFS 数据包失败多少次, 该数据包与其他数据包的碰撞概率  $P_{\text{coll}}$  始终保持不变, 即退避计

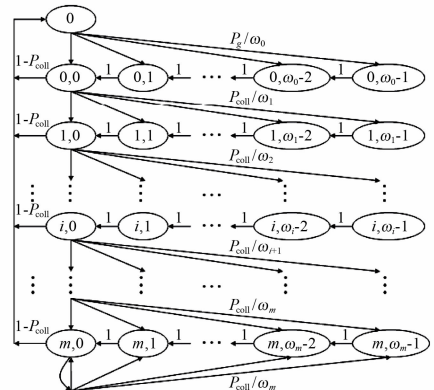


图 1 马尔科夫状态转移图

数器的值与传输历史无关. 所以, 设  $W_i$  为第  $i$  退避阶的竞争窗口值.

在本文建立的模型中, 单步的状态转移概率表达式为:

$$P\{i, k | i, k+1\} = 1, k \in (0, W_i - 2), i \in (0, m);$$

$$P\{i, k | i-1, 0\} = \frac{P_{\text{coll}}}{W_i}, k \in (0, W_i - 1), i \in (1, m);$$

$$P\{m, k | m, 0\} = \frac{P_{\text{coll}}}{W_m}, k \in (0, W_m - 1);$$

$$P\{0 | i, 0\} = 1 - P_{\text{coll}}, i \in (0, m); \quad P\{0, k | 0\} = \frac{P_g}{W_0}, k \in (0, W_0 - 1).$$

设  $b_{i,k}$  为  $Z(t)$  在状态  $(i, k)$  时的稳态概率, 则  $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$ ,  $i \in (0, m)$ . 根据图 1 中马尔科夫链的状态转移特性, 可得:

$$b_{0,0} = b_0 P_g, b_{i,0} = b_{i-1,0} P_{\text{coll}} = P_{\text{coll}}^i b_{0,0}, b_{m,0} = \frac{P_{\text{coll}}}{1 - P_{\text{coll}}} b_{0,0}. \quad (2)$$

用户在退避计数器的值减为 0 时开始传送数据, 用户在任意时隙传送 RFS 数据包的概率为  $\tau$ , 则

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_0}{1 - P_{\text{coll}}} = \frac{2(1 - 2P_{\text{coll}})}{P_g [(1 - 2P_{\text{coll}})(W + 1) + P_{\text{coll}} W (1 - (2P_{\text{coll}})^m)]}, \quad (3)$$

其中  $W = CW_{\min}$ ,  $P_g$  为生成 RFS 数据包的概率, 即

$$P_g = P_{\text{idle}} e^{-\lambda\sigma} + P_{\text{succ}} e^{-\lambda T_{\text{succ}}} + P_{\text{coll}} e^{-\lambda T_{\text{coll}}}, \quad (4)$$

其中  $\sigma$  为空闲时隙的时间,  $T_{\text{succ}}$  为成功时隙的时间,  $T_{\text{coll}}$  为碰撞时隙的时间. (3) 式表示用户传送 RFS 数据包的概率  $\tau$  与发生碰撞的概率  $P_{\text{coll}}$  的关系. 为进一步求出用户传送 RFS 数据包发生碰撞的概率  $P_{\text{coll}}$ , 需构建新的马尔科夫链模型. 令  $X(t)$  为  $t$  时刻忙的 SCH 数量,  $Y(t)$  为  $t$  时刻 CCH 的状态, 即:  $Y(t) = 0$  表示在  $t$  时刻 CCH 处于空闲状态;  $Y(t) = 1$  表示在  $t$  时刻只有一个用户进行数据传送的状态;  $Y(t) = 2$  表示在  $t$  时刻有一个以上的用户同时进行数据传送而发生碰撞的状态. 则  $\{(X(t), Y(t)) | t \geq 0\}$  构成二维连续时间马尔科夫过程, 通过  $\{(X(t), Y(t)) | t \geq 0\}$  的单步转移概率矩阵  $\mathbf{P}$ , 并利用平衡方程  $\mathbf{\Pi P} = \mathbf{\Pi}$  和  $\sum \mathbf{\Pi} = 1$  的解, 可以得出稳态概率  $\pi_{i,j}$ .

在多信道的情况下, 用户传送 RFS 数据包发生碰撞的概率  $P_{\text{coll}}$  包含两种情况: 一是当用户传送 RFS 数据包时有其他用户同时传送 RFS 数据包, 导致碰撞的发生; 二是用户在 CCH 上虽然成功地传送了 RFS 数据包给 RSU, 但是没有空闲的 SCH 分配给用户. 因此, 用户传送 RFS 数据包的碰撞概率  $P_{\text{coll}}$  可表示为

$$P_{\text{coll}} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{K-1} \pi_{i,1} + \pi_{K,1} (1 - ((1-q)^{T_{\text{succ}}})^K)}{\sum_{i=0}^K (\pi_{i,1} + \pi_{i,2})}. \quad (5)$$

令  $P_{\text{idle}}, P_{\text{succ}}, P_{\text{coll}}$  分别表示 CCH 上的一般时隙为空闲时隙、成功时隙和碰撞时隙的概率, 则有:

$$P_{\text{idle}} = (1 - \rho\tau)^N, P_{\text{succ}} = N\rho\tau (1 - \rho\tau)^{N-1}, P_{\text{coll}} = 1 - P_{\text{idle}} - P_{\text{succ}}, \quad (6)$$

其中  $\rho$  为用户的利用率. 由于用户的平均服务时间为在 CCH 上预约 SCH 所需的平均时延与在 SCH 上传送数据所需时间之和, 所以有

$$\rho = \lambda \left( E(D) + \frac{E[L_{\text{DATA}}]}{R} \right), \quad (7)$$

其中  $\lambda$  为 RFS 数据包的生成速率. 用户预约 SCH 所需的平均时延定义为: 用户在 CCH 到达队列头开始发送 RFS 数据包到成功预约 SCH 所需的全部时间. 令  $E[D_n]$  表示用户在第  $n$  退避阶的平均传输时延, 则  $E[D_n]$  可表示为

$$E[D_n] = \frac{W_n - 1}{2} [P_{\text{idle}} \sigma + P_{\text{succ}} T_{\text{succ}} + P_{\text{coll}} T_{\text{coll}}], \tag{8}$$

所以,用户的平均传输时延  $E[D]$  为

$$E[D] = \sum_{i=0}^m P_{\text{coll}}^i (1 - P_{\text{coll}}) (\sum_{n=0}^i E[D_n] + i \cdot T_{\text{coll}} + T_{\text{succ}}) + \sum_{i=m+1}^{\infty} P_{\text{coll}}^i (1 - P_{\text{coll}}) (\sum_{n=0}^m E[D_n] + (i - N) \cdot E[D_m] + i \cdot T_{\text{coll}} + T_{\text{succ}}). \tag{9}$$

### 3 性能比较

为考察系统的性能参数(数据包的生成速率、最大退避阶数和最小竞争窗口)对用户预约 SCH 所需平均时延的影响,假设系统中有 6 个服务信道,即  $K=6$ ,用户传送数据的长度设为  $L_{\text{DATA}}=500$  KB,传输速率设为  $R=6$  Mbps. 当系统的性能参数中有一个发生变化而其余参数固定时,平均时延的变化情况如图 2、图 3 和图 4 所示.

图 2 显示了 RFS 数据包的生成速率对用户预约 SCH 所需平均时延的影响,其中 RFS 数据包的生成速率取了 3 个不同的值 ( $\lambda = 0.01, 0.015, 0.02$ ),  $m = 5$ ,  $CW_{\min} = 3$ . 由图 2 可知:① 当系统中用户逐渐增多时,平均时延也增大,当用户数大于 60 后,平均时延的增长幅度变大. 这是因为系统中用户越多,用户预约 SCH 的竞争越大,发生碰撞的概率越大,相应地用户预约 SCH 的平均时延也越大. ② 随着 RFS 数据包生成速率的增加,用户预约 SCH 所需的平均时延也随之增加. 这是因为 RFS 数据包生成的速率增加,系统中等待传送的 RFS 数据包增多,增加了传送过程中发生碰撞的概率,因此所需的平均时延随之增加.

图 3 显示了最大退避阶数取值不同时,用户预约 SCH 所需平均时延的变化过程,其中最大退避阶数取了 3 个不同的值 ( $m = 3, 4, 5$ ),  $\lambda = 0.02$ ,  $CW_{\min} = 3$ . 由图 3 可以看出,当用户数低于 100 时,最大退避阶数取不同数值时平均时延几乎相等,即用户数较少时最大退避阶数对用户预约 SCH 所需的平均时延几乎无影响. 但是当用户数增加到一定程度时,最大退避阶数对用户预约 SCH 的平均时延产生影响,并且最大退避阶数越大,平均时延越小. 这是因为最大退避阶数越大,用户处于退避状态的时间越长,与其他用户发生碰撞的概率越小,所以预约 SCH 所需的平均时延就越小.

图 4 显示了最小竞争窗口取值不同时,用户预约 SCH 所需平均时延的变化过程,其中最小竞争窗口取 3 个不同的值 ( $CW_{\min} = 3, 7, 15$ ),  $m = 5$ ,  $\lambda = 0.02$ . 从图 4 可以看出,当用户数低于 60 时,最小竞争窗口越小平均时延越小;而当用户数大于 60 时,最小竞争窗口越小平

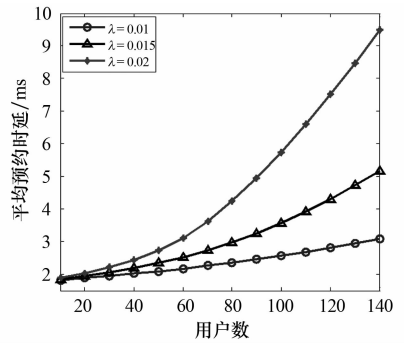


图 2 RFS 数据包的生成速率对平均时延的影响

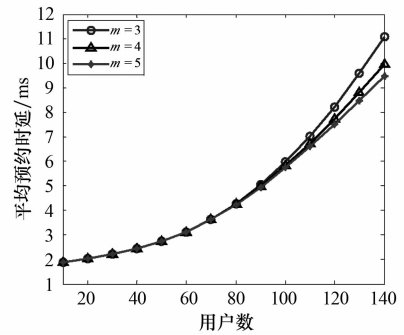


图 3 最大退避阶数对平均时延的影响

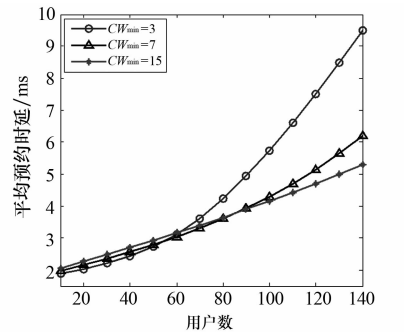


图 4 最小竞争窗口对平均时延的影响

均时延反而越大.这是因为用户数少时,用户在系统中的竞争不激烈,最小竞争窗口小,即处于退避的时间短,可以较快地传送 RFS 数据包,因而时延小;而当用户数明显增多时,用户在系统中的竞争激烈,若用户处于退避阶段的时间减少,则发生碰撞的概率增加,相应地平均时延也增加.

4 结论

本文以 WAVE 网络中基于 DCF 的信道预约方案为基础,通过构建马尔科夫分析模型,并采用排队论的分析方法,得出了系统中用户预约 SCH 所需的平均时延的表达式.通过性能比较得知,RFS 数据包的生成速率和最小竞争窗口对用户预约 SCH 的平均时延有不可忽视的影响,而最大退避阶数只在用户数达到一定数量时才会对平均时延有影响.本文的研究结果有助于提高车载通信网络的性能,但本文研究的信道预约方案在用户处于非饱和状态条件下的性能有待进一步研究.

参考文献:

[1] IEEE 802.11p. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments[S]. IEEE Standard Board, 2010.

[2] IEEE 1609.4. IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) Multi-channel Operation[S]. IEEE Standard Board, 2006.

[3] Wang Q, Su P L, Fu H R, et al. An enhanced multi-channel MAC for the IEEE 1609.4 based vehicular Ad Hoc networks[C]//Curran associates. IEEE INFOCOM 2010 Proceeding. San Diego; IEEE Press,2010:1-2.

[4] Zhu D B, Zhu D D. Performance analysis of a multi-channel MAC with dynamic CCH interval in WAVE system [C]// Lu Q. Systems engineering and modeling. Beijing; Atlantis Press, 2013:1160-1163.

[5] 崔纪平,朱东弼.无线车载网络 MAC 协议算法之性能探究[J].电子测试,2013(13):9-12.

[6] 刘娇,朱东弼.WAVE 网络中多信道 MAC 协议探讨[J].科技创新与应用,2014(27):74.

[7] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2000,3(18):535-547.

=====

(上接第 24 页)

参考文献:

[1] Ferreira R A C. Nontrivial solutions for fractional  $q$ -difference boundary value problems[J]. Theory of Differential Equations, 2010,70:1-10.

[2] Ferreira R A C. Positive solutions for a class of boundary value problems with fractional  $q$ -differences[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2011,61(2):367-373.

[3] Ricardo Almeida, Natália Martins. Existence results for fractional  $q$ -difference equations of order  $\alpha \in ]2, 3[$  with three-point boundary conditions[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014,19(6): 1675-1685.

[4] Zhao Yulin, Chen Haibo, Zhang Qiming. Existence results for fractional  $q$ -difference equations with nonlocal  $q$ -integral boundary conditions[J]. Advances in Difference Equations, 2013,2013:1-15.

[5] Zhao Yulin, Ye Guobing, Chen Haibo. Multiple positive solutions of a singular semipositivone integral boundary value problem for fractional  $q$ -derivatives equation[J]. Abstract and Applied Analysis, 2013,2013:1-12.

[6] 孙明哲,韩筱爽.一类分数阶  $q$ -差分边值问题的正解[J].延边大学学报:自然科学版,2013,39(4):252-255.

[7] Bashir Ahmad, Sotiris K Ntouyas. Fractional  $q$ -difference hybrid equations and inclusions with Dirichlet boundary conditions[J]. Advances in Difference Equations, 2014,2014:1-14.

[8] Sun Shurong, Zhao Yige, Han Zhenlai. The existence of solutions for boundary value problems of fractional hybrid differential equations[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012,17(12):4961-4967.