

IEEE 802.11p MAC 协议碰撞概率研究与分析

张旭^{1,2}, 田锦²

(1. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 金陵科技学院 网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 车载网络 MAC 层采用的是 IEEE 802.11p/1609.x 协议, 现有的无线通信 MAC 协议无法满足交通信息化产业的需求。目前针对 IEEE 802.11p MAC 层的研究主要是通过设计马尔可夫模型进行的, 但该模型建模复杂, 计算难度大。文中设计了一个简化直观的数学模型对该协议进行研究与分析, 阐述了 IEEE 802.11p MAC 层中的 EDCA 信道接入规范, 根据 EDCA 的信道接入规范设计一个简化的数学分析模型。在不考虑仲裁帧间隙 (AIFS) 的前提下, 运用该模型对 EDCA 竞争传输机制中四个不同优先级发生第一次传输情况下的碰撞概率进行研究。主要分析了不同优先级的不同竞争窗参数以及节点数目对于系统碰撞概率的影响。根据各个优先级的节点数目情况, 运用该模型合理设计相应竞争窗的取值, 显著提高了系统的性能。分析结果表明: 该模型在研究 IEEE 802.11p MAC 层性能中有较好的表现。

关键词: IEEE 802.11p; EDCA; 优先级; 碰撞概率

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2017)03-0012-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.003

Investigation and Analysis on Collision Probability of IEEE 802.11p MAC

ZHANG Xu^{1,2}, TIAN Jin²

(1. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. School of Networks and Telecommunications Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: The MAC layer of VANET adopts the IEEE 802.11p/1609.x protocol, and the existing MAC protocol of wireless communication cannot meet the demand of the industry of traffic informatization. The study of IEEE 802.11p MAC is mainly through designing Markov chain model, but it is complex and difficult to calculate. Therefore, a intuitional mathematical model has been designed to research and analyze the mechanism. According to mechanisms of EDCA and on the basis of investigation on EDCA standard, a simplified mathematical analysis model has been designed to analyze the competitive transmission mechanism in EDCA. The investigation focuses on the collision probability of four different priorities in EDCA without consideration of the Arbitration Inter Frame Space (AIFS). The analysis on channel access with more nodes with the proposed model have been conducted after setting parameters of the contention windows of different priorities. The collision probabilities can be reduced and thus the quality of system be improved. Simulation results show that this model has better performance in construction research on the MAC Layer of IEEE 802.11p.

Key words: IEEE 802.11p; EDCA; priorities; collision probability

0 引言

交通问题随着交通产业的不断发展日益显现, 交通产业的发展既给人们带来了发展的机遇, 也给人们带来了巨大的灾害。面对所出现的问题, 车联网的建设势在必行。在交通安全得以保障的前提下, 提供优质的交通服务是车联网建设的关键所在。

车载网络通信 MAC 协议是 IEEE 802.11p/1609.

x^[1] 系列标准, 该协议是在 IEEE 802.11^[2] 的基础上进行扩展, 使协议适应车载网络独特的分散的环境以及通信节点数、数据传输类型的影响。IEEE 802.11a^[3] 协议对数据没有进行划分, 所有数据被一视同仁地放在同一个队列中等待传送, 一些实时性的数据就可能无法立即传送, 而非实时性的数据占用了传输信道的传送时间, 降低了信道传输的质量以及效率。IEEE 组

收稿日期: 2016-05-15

修回日期: 2016-09-09

网络出版时间: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61375121); 南京市科技计划 (2012ZD003)

作者简介: 张旭 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线网络 MAC 协议; 田锦, 博士, 通信作者, 研究方向为认知无线电技术、宽带无线接入技术、第四代移动通信泛在异构网络通信理论、智能交通系统与理论。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1634.082.html>

织针对不同业务设置了不同大小的竞争窗(Contention Windows, CW), 在 EDCA^[4] (Enhanced Distributed Channel Access) 中规定了四种不同大小的优先级。IEEE 802. 11p MAC 层采用 EDCA 接入机制, 研究表明, CW 值与节点数目设置对 EDCA 的协议性能影响很大。张俊健等^[5]提出了一种新的 EDCA 自适应退避优化算法, 通过 NS2 对改进后的算法以及经典算法进行仿真分析, 发现通过缓慢减少 CW 值, 可以大幅降低信道碰撞率。何晋等^[6]基于 p-persistent 模型提出了 RLSBA 算法, 通过实时侦听信道状态, 在提高系统吞吐量的同时降低节点间的碰撞概率。分析表明节点密度增加时, 冲突概率呈上升的趋势。现今大部分对 EDCA 的研究^[7-9]均采用 Bianchi G^[10] 的马尔可夫模型或者改进的马尔可夫模型进行。

文中设计了一个简单的数学模型对 EDCA 性能进行分析。在 EDCA 机制中, 主要考虑竞争窗口对协议性能的影响, 不考虑仲裁帧间隙(Arbitration Inter-Frame Spacing, AIFS) 以及重传机制。先对 EDCA 中的竞争窗口 CW 及其相关的退避机制进行简要概述, 然后介绍数学模型, 竞争碰撞概率公式, 以及多个节点情况下对碰撞概率的分析, 最后通过 MATLAB 对公式进行仿真得出相关数据, 分析 EDCA 机制的性能。

1 IEEE 802.11p 协议 EDCA 工作机制

IEEE 802. 11p MAC 协议针对不同的传输类别设置不同的传输参数, 即(AIFS, CW)。AIFS 为节点的额外等待时间, AIFS 的值较小时, 适合于 AC₀ 和 AC₁ 这两个接入类; AIFS 的值较大时, 适合于 AC₂ 和 AC₃ 这两个接入类。CW 为系统进行竞争的等待长度, 等待长度的长短对于一个节点是否能够优先传输具有重要意义, 不同的优先级有着不同的等待长度。如果两个传输级别同时被允许发送, 这就会引起碰撞。EDCA 通过虚拟调度^[11], 可让优先级高的传输级别先通过。

EDCA 中的 4 种访问类型(Access Category, AC) 为 AC_VO(Voice)、AC_VI(Video)、AC_BE(Best effect) 和 AC_BK(Background)^[12]。其中, 传送优先级为 AC_VO>AC_VI>AC_BE>AC_BK。EDCA 的默认参数值^[13]如表 1 所示。

表 1 EDCA 的默认参数设置

接入等级	CW _{min}	CW _{max}	AIFSN
AC_VO(AC ₀)	aCW _{min} +1)/4 - 1	(aCW _{min} +1)/2 - 1	2
AC_VI(AC ₁)	(aCW _{min} +1)/2 - 1	aCW _{min}	2
AC_BE(AC ₂)	aCW _{min}	aCW _{max}	3
AC_BK(AC ₃)	aCW _{min}	aCW _{max}	7

文中设计了一个简单的数学模型对 EDCA 的竞争机制进行分析。基于 EDCA 中的仲裁帧间隙与竞争窗

的窗口大小都是变化的, 这样 4 个不同优先级的状态量就极为庞大。文中只研究不同优先级的竞争窗大小对碰撞概率的影响, 所以将 AIFS 的值设置为 0, 其分析模型如图 1 所示。

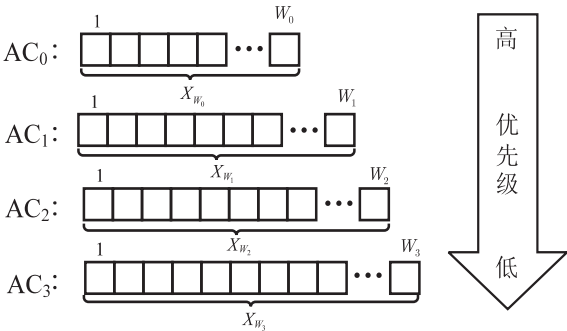


图 1 竞争窗大小不同的模型(AIFS 相同)

2 IEEE 802.11p MAC 协议简单模型和概率分析

2.1 4 节点处于 4 种优先级

图 1 中规定了 4 个优先级(AC₀, AC₁, AC₂ 和 AC₃), 以及 4 个优先级相对竞争窗的长度(W₀, W₁, W₂ 和 W₃)。在 1 和 W 之间的离散型随机变量可以表示为 $X \sim \cup d(\{1, 2, \dots, W\})$, 这些随机参数在统计学上是相对独立的, 可以得出:

$$X_{W_0} \sim \cup d(\{1, 2, \dots, W_0\}) ; CW_{min} [AC_0] = W_0 - 1$$
(1)

$$Y_{W_1} \sim \cup d(\{1, 2, \dots, W_1\}) ; CW_{min} [AC_1] = W_1 - 1$$
(2)

$$Z_{W_2} \sim \cup d(\{1, 2, \dots, W_2\}) ; CW_{min} [AC_2] = W_2 - 1$$
(3)

$$Q_{W_3} \sim \cup d(\{1, 2, \dots, W_3\}) ; CW_{min} [AC_3] = W_3 - 1$$
(4)

利用对每个优先级第一次发生碰撞的概率, 推出系统碰撞发生的概率, 也可以先求出 4 个优先级竞争成功的概率, 然后求出相应的碰撞概率。例如, 当优先级 AC₀ 竞争成功时, 其竞争成功的概率可以表示为: $P_{win} = P[X_{W_0} < (Y_{W_1}, Z_{W_2}, Q_{W_3})]$ 。再求出其他 3 个优先级相应的传输成功的概率。可以运用 4 个优先级竞争成功的概率之和求出第一次发生碰撞的概率。

2.2 推导过程与结果

取优先级 AC₀>AC₁>AC₂>AC₃ 的例子进行推导, 当 AC₀>AC₁>AC₂>AC₃ 时可以得到 $W_0 < W_1 < W_2 < W_3$ 。

使用上述设计的模型设置相关的值, 以及在该模型下的碰撞概率 P_{coll}, 则先求出 4 个优先级竞争成功的概率: P_{win0}, P_{win1}, P_{win2} 和 P_{win3}。在这种情况下, 可以通过计算得出以下结果:

AC₀ 竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{win0}} &= P[X_{W_0} < (Y_{W_1}, Z_{W_2}, Q_{W_3})] = \\ P[X < (Y, Z, Q)] &= \\ P[(X = 1 \wedge Y \geq 2 \wedge Z \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\ (X = W_0 \wedge Y \geq W_0 + 1 \wedge Z \geq W_0 + 1 \wedge Q \geq \\ W_0 + 1)] &= \frac{1}{W_0} \frac{W_1 - 1}{W_1} \frac{W_2 - 1}{W_2} \frac{W_3 - 1}{W_3} + \\ \frac{1}{W_0} \frac{W_1 - 2}{W_1} \frac{W_2 - 2}{W_2} \frac{W_3 - 2}{W_3} + \cdots + \\ \frac{1}{W_0} \frac{W_1 - W_0}{W_1} \frac{W_2 - W_0}{W_2} \frac{W_3 - W_0}{W_3} &= \\ \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_1 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + \\ (W_1 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + \\ (W_1 - W_0)(W_2 - W_0)(W_3 - W_0)] \end{aligned} \quad (5)$$

AC₁竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{win1}} &= P[Y_{W_1} < (X_{W_0}, Z_{W_2}, Q_{W_3})] = \\ P[Y < (X, Z, Q)] &= \\ P[(Y = 1 \wedge X \geq 2 \wedge Z \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\ (Y = W_0 - 1 \wedge X = W_0 \wedge Z \geq W_0 \wedge Q \geq W_0)] &= \\ \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_1 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + \\ (W_1 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + \\ (W_2 - W_0 + 1)(W_3 - W_0 + 1)] \end{aligned} \quad (6)$$

AC₂竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{win2}} &= P[Z_{W_2} < (X_{W_0}, Y_{W_1}, Q_{W_3})] = \\ P[Z < (X, Y, Q)] &= \\ P[(Z = 1 \wedge X \geq 2 \wedge Y \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\ (Z = W_0 - 1 \wedge X = W_0 \wedge Y \geq W_0 \wedge Q \geq W_0)] &= \\ \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_3 - 1) + \\ (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + \\ (W_1 - W_0 + 1)(W_3 - W_0 + 1)] \end{aligned} \quad (7)$$

AC₃竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{win3}} &= P[Q_{W_3} < (X_{W_0}, Y_{W_1}, Z_{W_2})] = \\ P[Q < (X, Y, Z)] &= \\ P[(Q = 1 \wedge X \geq 2 \wedge Y \geq 2 \wedge Z \geq 2) \vee \cdots \vee \\ (Q = W_0 - 1 \wedge X = W_0 \wedge Y \geq W_0 \wedge Z \geq W_0)] &= \\ \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_2 - 1) + \\ (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_2 - 2) + \cdots + \\ (W_1 - W_0 + 1)(W_2 - W_0 + 1)] \end{aligned} \quad (8)$$

P_{coll} 为:

$$P_{\text{coll}} = 1 - (P_{\text{win0}} + P_{\text{win1}} + P_{\text{win2}} + P_{\text{win3}}) \quad (9)$$

这种情况只是 EDCA 竞争窗可能性的一种,接下来将竞争窗所能出现的所有情况全部考虑在内,得出的 24 种可能性如图 2 所示。

	$W_0 < W_1 < W_2 < W_3$	$W_0 < W_1 < W_2 < W_0$	$W_0 < W_1 < W_2 < W_3$	$W_0 < W_1 < W_2 < W_0$	$W_0 < W_2 < W_1 < W_3$	$W_0 < W_2 < W_1 < W_0$
AC0 竞争成功	$P_{\text{win0}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_1 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_1 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_1 - W_0)(W_2 - W_0)(W_3 - W_0)]$					
AC1 竞争成功	$P_{\text{win1}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_1 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_1 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_2 - W_0 + 1)(W_3 - W_0 + 1)]$					
AC2 竞争成功	$P_{\text{win2}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_1 - W_0 + 1)(W_3 - W_0 + 1)]$					
AC3 竞争成功	$P_{\text{win3}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_2 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_2 - 2) + \cdots + (W_1 - W_0 + 1)(W_2 - W_0 + 1)]$					
发生碰撞的概率	$P_{\text{coll}} = 1 - (P_{\text{win0}} + P_{\text{win1}} + P_{\text{win2}} + P_{\text{win3}})$					

	$W_1 < W_0 < W_2 < W_3$	$W_1 < W_0 < W_2 < W_0$	$W_1 < W_2 < W_0 < W_3$	$W_1 < W_2 < W_0 < W_0$	$W_1 < W_2 < W_3 < W_0$	$W_1 < W_2 < W_3 < W_3$
AC0 竞争成功	$P_{\text{win0}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_2 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC1 竞争成功	$P_{\text{win1}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_2 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC2 竞争成功	$P_{\text{win2}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_1 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC3 竞争成功	$P_{\text{win3}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_2 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_2 - 2) + \cdots + (W_1 - W_1 + 1)(W_2 - W_1 + 1)]$					
发生碰撞的概率	$P_{\text{coll}} = 1 - (P_{\text{win0}} + P_{\text{win1}} + P_{\text{win2}} + P_{\text{win3}})$					

	$W_2 < W_0 < W_1 < W_3$	$W_2 < W_1 < W_0 < W_3$	$W_2 < W_1 < W_0 < W_0$	$W_2 < W_2 < W_0 < W_3$	$W_2 < W_2 < W_0 < W_0$	$W_2 < W_3 < W_1 < W_0$
AC0 竞争成功	$P_{\text{win0}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_2 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC1 竞争成功	$P_{\text{win1}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_2 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_2 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_2 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC2 竞争成功	$P_{\text{win2}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_3 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_3 - 2) + \cdots + (W_1 - W_1 + 1)(W_3 - W_1 + 1)]$					
AC3 竞争成功	$P_{\text{win3}} = \frac{1}{W_0 W_1 W_2 W_3} [(W_0 - 1)(W_1 - 1)(W_2 - 1) + (W_0 - 2)(W_1 - 2)(W_2 - 2) + \cdots + (W_1 - W_1 + 1)(W_2 - W_1 + 1)]$					
发生碰撞的概率	$P_{\text{coll}} = 1 - (P_{\text{win0}} + P_{\text{win1}} + P_{\text{win2}} + P_{\text{win3}})$					

图 2 所有优先级取值可能性的结果

2.3 多节点处于不同优先级

由于优先级的可能性有多种,全部考虑的情形的数据量巨大,因此文中取优先级 $AC_0 > AC_1 > AC_2 > AC_3$ 的例子进行推导。当 $AC_0 > AC_1 > AC_2 > AC_3$ 时,可以得到 $W_0 < W_1$ 为数据 W_3 。其中, AC_0, AC_1, AC_2 和 AC_3 对应

的节点数分别为 n_0, n_1, n_2 和 n_3 , 可以得出相关的概率公式。

AC₀竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{win0}} &= P[X_{W_0} < (Y_{W_1}, Z_{W_2}, Q_{W_3})] = \\ P[X < (Y, Z, Q)] &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &P[(X=1 \wedge Y \geq 2 \wedge Z \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\
 &(X=W_0 \wedge Y \geq W_0+1 \wedge Z \geq W_0+ \\
 &1 \wedge Q \geq W_0+1)] = \\
 &C_{n_0}^1 \frac{1}{W_0} \frac{(W_0-1)^{n_0-1}}{W_0^{n_0-1}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \\
 &\frac{(W_2-1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \frac{(W_3-1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} + C_{n_0}^1 \frac{1}{W_0} \\
 &\frac{(W_0-2)^{n_0-1}}{W_0^{n_0-1}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-2)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-2)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \\
 &\frac{(W_3-2)^{n_3}}{W_3^{n_3}} + \cdots + C_{n_0}^1 \frac{1}{W_0} \frac{1}{W_0^{n_0-1}} C_{n_1}^{n_1} \\
 &\frac{(W_1-W_0+1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-W_0+1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \\
 &\frac{(W_3-W_0+1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

AC₁竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned}
 &P_{win1} = P[Y_{W_1} < (X_{W_0}, Z_{W_2}, Q_{W_3})] = \\
 &P[Y < (X, Z, Q)] = \\
 &P[(Y=1 \wedge X \geq 2 \wedge Z \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\
 &(Y=W_0-1 \wedge X=W_0 \wedge Z \geq W_0 \wedge Q \geq W_0)] = \\
 &C_{n_1}^1 \frac{1}{W_1} \frac{(W_1-1)^{n_1-1}}{W_1^{n_1-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-1)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_2}^{n_2} \\
 &\frac{(W_2-1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \frac{(W_3-1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} + C_{n_1}^1 \frac{1}{W_1} \\
 &\frac{(W_1-2)^{n_1-1}}{W_1^{n_1-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-2)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-2)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \\
 &\frac{(W_3-2)^{n_3}}{W_3^{n_3}} + \cdots + C_{n_1}^1 \frac{1}{W_1} \frac{(W_1-W_0+1)^{n_1-1}}{W_1^{n_1-1}} C_{n_0}^{n_0} \\
 &\frac{1}{W_0^{n_0}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-W_0+1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} C_{n_3}^{n_3} \frac{(W_3-W_0+1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} \quad (11)
 \end{aligned}$$

AC₂竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned}
 &P_{win2} = P[Z_{W_2} < (X_{W_0}, Y_{W_1}, Q_{W_3})] = \\
 &P[Z < (X, Y, Q)] = \\
 &P[(Z=1 \wedge X \geq 2 \wedge Y \geq 2 \wedge Q \geq 2) \vee \cdots \vee \\
 &(Z=W_0-1 \wedge X=W_0 \wedge Y \geq W_0 \wedge Q \geq W_0)] = \\
 &C_{n_2}^1 \frac{1}{W_2} \frac{(W_2-1)^{n_2-1}}{W_2^{n_2-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-1)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \\
 &\frac{(W_1-1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_3}^{n_3} \frac{(W_3-1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} + C_{n_2}^1 \frac{1}{W_2} \\
 &\frac{(W_2-2)^{n_2-1}}{W_2^{n_2-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-2)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-2)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_3}^{n_3} \\
 &\frac{(W_3-2)^{n_3}}{W_3^{n_3}} \cdots + C_{n_2}^1 \frac{1}{W_2} \frac{(W_2-W_0+1)^{n_2-1}}{W_2^{n_2-1}} C_{n_0}^{n_0}
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-W_0+1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_3}^{n_3} \frac{(W_3-W_0+1)^{n_3}}{W_3^{n_3}} \quad (12)$$

AC₃竞争成功的概率为:

$$\begin{aligned}
 &P_{win3} = P[Q_{W_3} < (X_{W_0}, Y_{W_1}, Z_{W_2})] = \\
 &P[Q < (X, Y, Z)] = \\
 &P[(Q=1 \wedge X \geq 2 \wedge Y \geq 2 \wedge Z \geq 2) \vee \cdots \vee \\
 &(Q=W_0-1 \wedge X=W_0 \wedge Y \geq W_0 \wedge Z \geq W_0)] = \\
 &C_{n_3}^1 \frac{1}{W_3} \frac{(W_3-1)^{n_3-1}}{W_3^{n_3-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-1)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \\
 &\frac{(W_1-1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} + C_{n_3}^1 \frac{1}{W_3} \\
 &\frac{(W_3-2)^{n_3-1}}{W_3^{n_3-1}} C_{n_0}^{n_0} \frac{(W_0-2)^{n_0}}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-2)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \\
 &\frac{(W_2-2)^{n_2}}{W_2^{n_2}} + \cdots + C_{n_3}^1 \frac{1}{W_3} \frac{(W_3-W_0+1)^{n_3-1}}{W_3^{n_3-1}} C_{n_0}^{n_0} \\
 &\frac{1}{W_0^{n_0}} C_{n_1}^{n_1} \frac{(W_1-W_0+1)^{n_1}}{W_1^{n_1}} C_{n_2}^{n_2} \frac{(W_2-W_0+1)^{n_2}}{W_2^{n_2}} \quad (13)
 \end{aligned}$$

P_{coll} 的计算同式(9)。

3 性能结果与分析

通过式(9)可以得出在4种竞争窗的节点数均设置为1时的碰撞概率,这样可以动态地设置不同优先级的竞争窗以降低碰撞概率,从而达到更佳的传输效果。式(14)中,首先设置最大竞争窗的值,再设置节点数目,可以更加直观地观察节点变化情况下的传输效果,碰撞概率越小,传输效果越佳。同样可以固定节点数目,改变最大竞争窗的值,研究该值对系统碰撞概率的影响。

(1)节点数对系统碰撞概率的影响。

依据表2设置最大竞争窗的值的大小^[14]。

表2 典型的优先级的取值范围

接入等级	CW _{min}	CW _{max}
0	3	7
1	7	63
2	15	1 023
3	15	1 023

如前所述,由于分组排列的可能性太多,这里仅选取两个节点变化的情况进行分析,其中4种典型情况如图3所示。横坐标代表任意两个优先级的节点数,纵坐标代表系统的碰撞概率。图3中情况1、3和4的最大竞争窗 $W_0 \sim W_3$ 分别设置为7、15、1 023和1 023;图3中情况2的最大竞争窗 $W_0 \sim W_3$ 分别设置为7、63、1 023和1 023。

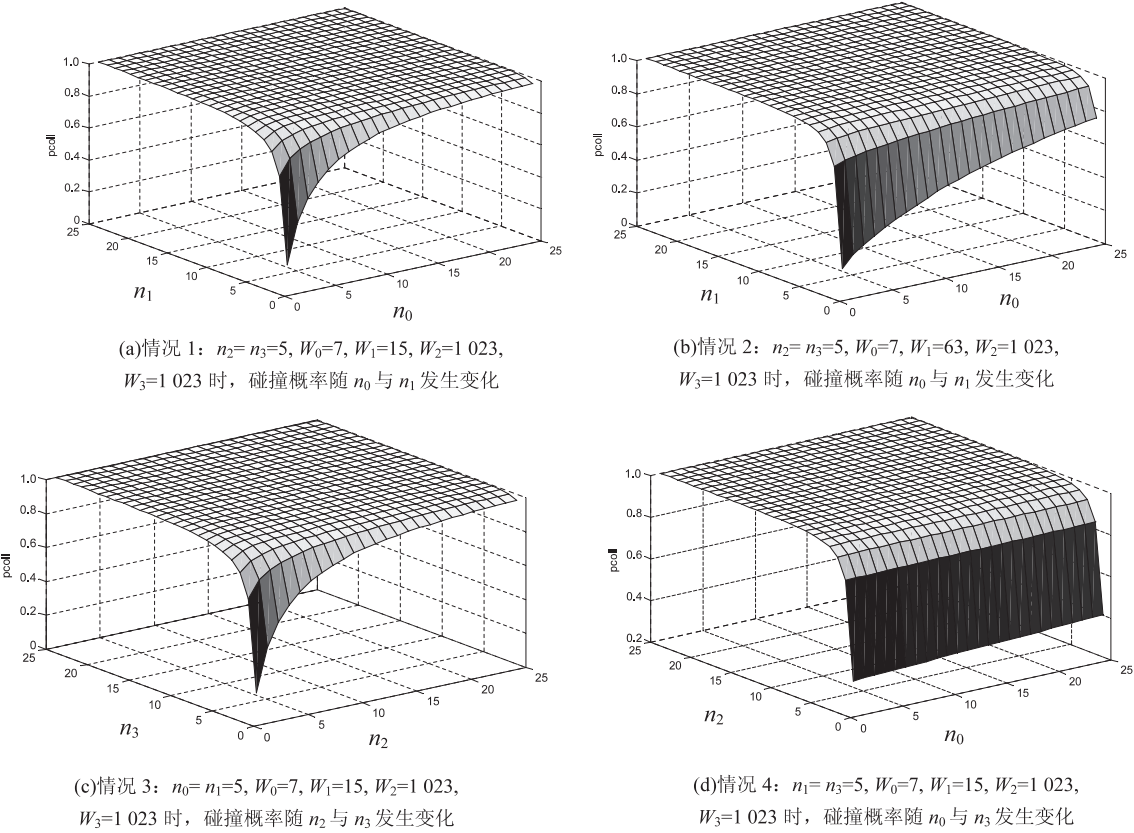


图 3 节点数目变化与碰撞概率的关系

从图 3 中情况 1、3 和 4 可以看出,随着节点数目的增加,系统碰撞概率随之增加。其中,情况 1 和情况 3 分别表示变化节点的最大竞争窗取值相同或者差异较小的情况,对应节点变化时系统碰撞概率增加速度差异较小;而情况 4 表示变化节点的最大竞争窗取值差异较大的情况,可以看出该情况下当节点数目增加的时候,优先级高的节点系统碰撞概率的增加速度明显低于优先级低的节点。情况 1 与情况 2 比较的是变化节点相同而最大竞争窗取值不同的时候系统的碰撞概率,从图中可以看出最大竞争窗的窗口值增加时,优先级较高的系统碰撞概率将降低。

通过上述结果可以得出,当节点数目增加时,系统的碰撞概率随之增加,同时不同优先级节点数目变化时,对系统的碰撞概率的影响程度不同。优先级高的节点数目变化时,对系统的碰撞概率的影响程度较大,优先级低的节点数目变化时,对系统的碰撞概率的影响程度较小。

(2)最大竞争窗对系统碰撞概率的影响。

将 4 种 AC 的节点数目均设置为 15,4 种接入类的最大竞争窗的窗口值设置为数组 $[CW_0, CW_1, CW_2, CW_3]$,通过改变数组中的值探究竞争窗对系统碰撞概率的影响,得出的结果如图 4 所示。

图中,情况 1 将第一优先级的最大竞争窗的值设为 1~7,其余优先级的最大竞争窗的值为默认设定。

当最大竞争窗的值增加时,系统的碰撞概率降低,变化趋势较为缓慢。情况 2 将第二优先级的最大竞争窗的值设为 1~63,其余优先级的最大竞争窗的值为默认设定。当最大竞争窗的值增加时,系统的碰撞概率降低,变化趋势为一开始系统的碰撞概率较快降低,然后保持缓慢变化。情况 3、4 分别将第三、第四优先级的最大竞争窗的值设置为 1~1 023,其余优先级的最大竞争窗的值为默认设定。当最大竞争窗的值增加时,对应的系统碰撞概率的变化情况为,当最大竞争窗的值设置在 100 以内时,系统的碰撞概率快速降低,当大于 100 时对应的系统碰撞概率变化缓慢并趋于平稳。

通过上述结果可以得出,当节点数目保持不变时,不同优先级最大竞争窗的值增加时,系统的碰撞概率会降低。但 4 种情况对系统的碰撞概率影响程度不同,优先级高的最大竞争窗的值变化时,对系统的碰撞概率的影响程度较大,优先级低的最大竞争窗的值变化时,对系统的碰撞概率的影响程度较小。

4 结束语

网络性能分析是评估网络优劣的重要方法之一。文中根据 EDCA 信道接入规范中的指数增加回退机制,在不考虑仲裁帧间隔时,研究协议对于信道接入的影响,提出一种简化的概率分析模型。该模型运用概率计算公式计算出每个优先级节点发送成功的概率,

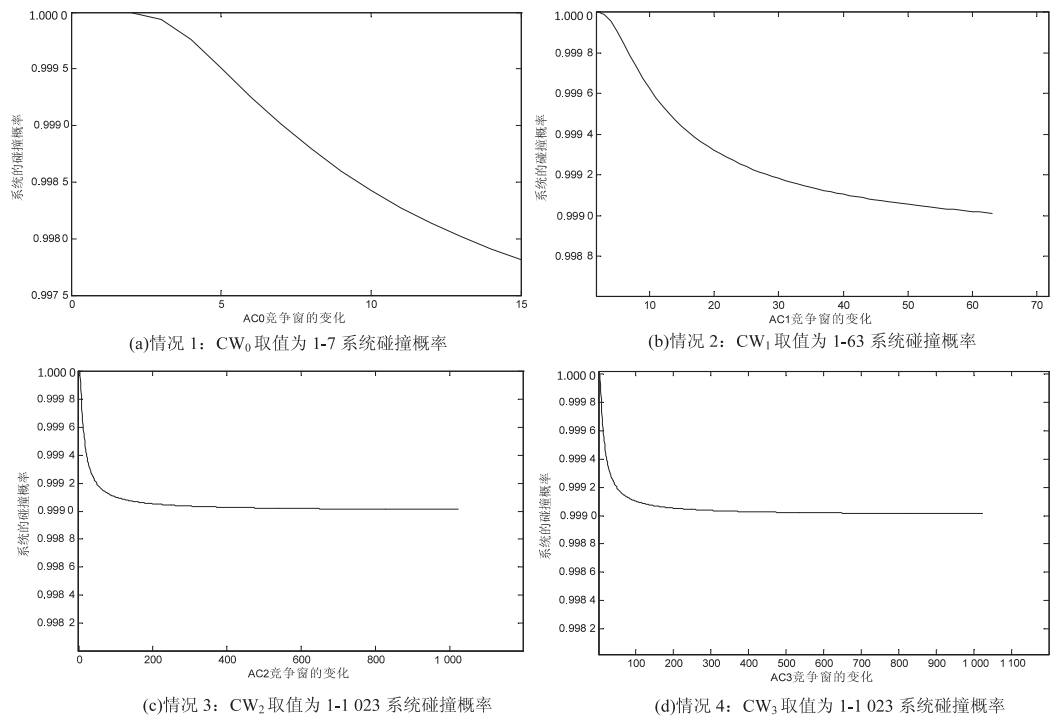


图 4 最大竞争窗与碰撞概率的关系

并推导出系统发生碰撞的概率。通过设计模型中竞争窗的值以及节点数目的值,进一步研究 EDCA 中竞争窗窗口值及节点数目对系统碰撞概率的影响。

在实际应用场景中,根据各个优先级的节点数目情况,合理设计相应竞争窗的取值,可以降低系统的碰撞概率,有利于系统性能的提高。在后续研究中,将考虑如何在该模型的基础上引入重传机制进行理论研究与分析。

参考文献:

[1] IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE) multi-channel operation[S]. [s. l.]:[s. n.],2006.

[2] IEEE Std 802.11-1999(R2003):wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. [s. l.]:[s. n.],2003.

[3] 唐伦,刘益富,刘青海,等.一种改进 IEEE 802.11 DCF 的建模与分析[J].北京邮电大学学报,2014,37(5):96-99.

[4] IEEE Std 802.11e-2005;wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications amendment 8:Medium Access Control (MAC) quality of service enhancements[S]. [s. l.]:[s. n.],2005.

[5] 张俊健,吴悦.IEEE802.11p 车载自组网络协议的 EDCA 自适应退避算法研究[J].计算机工程与科学,2014,36(10):1932-1936.

[6] 何晋,陈思洋,朱西平.基于 IEEE 802.11p 的车载自组网 MAC 层接入算法 RLBSA[J].电子科技大学学报,2015,

44(5):674-679.

[7] Ma Xiaomin,Chen Xianbo,Refai H H. Performance and reliability of DSRC vehicular safety communication;a formal analysis[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and networking,2009(1):1-13.

[8] Gallardo J R,Makrakis D,Mouftah H T. Mathematical analysis of EDCA's performance on the control channel of an IEEE 802.11p WAVE vehicular network[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,1999,5(11):2662-2668.

[9] Nasrallah Y Y,Al-Anbagi I,Mouftah H T. A realistic analytical model of IEEE 802.11p for wireless access in vehicular networks[C]//IEEE international conference on connected vehicles & expo. Vienna, Austria:IEEE,2014:1029-1034.

[10] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2000,18(3):535-547.

[11] 符琦,陈志刚,蒋云霞,等.无线 Mesh 网络中一种基于剩余时延的公平调度策略[J].计算机工程与科学,2013,35(12):58-65.

[12] 王万良,岑跃峰,姚信威.IEEE802.11e EDCA 多优先级混合时隙传输方法[J].计算机科学,2013,40(12):156-159.

[13] Bi Y,Cai L X,Shen X,et al. Efficient and reliable broadcast in intervehicle communication networks;a cross-layer approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2010,59(5):2404-2417.

[14] 王华,白光伟.饱和状态下 IEEE 802.11e EDCA 机制的建模分析[J].计算机工程与应用,2010,46(13):104-107.