

# 编队协同中的 Ad Hoc 网络 MAC 协议

吕娜<sup>1,2</sup>, 徐德民<sup>1</sup>, 王文艺<sup>2</sup>, 张岳彤<sup>2</sup>, 邹向毅<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 3. 西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:**大量研究分析表明,退避机制和竞争窗口的优化设计能够改善 IEEE 802.11 DCF MAC 协议的性能。结合无人机编队和卫星编队自组织分布协同应用场景,给出了基于 IEEE 802.11 DCF MAC 协议的优化改进机制:DCF/CCW。该机制改变 IEEE 802.11 DCF MAC 协议中根据 MAC 帧的多次碰撞以确定竞争窗口值的方法,通过监控信道获得系统中竞争节点数目,使用最优常数竞争窗口,从而减少碰撞机率,获得网络性能的提高。该机制具有一定的拓扑适应性,当网络结构发生变化时,监控信道获得的系统竞争节点数随之变化,从而可动态调整最优常数竞争窗口。对该机制下的系统吞吐量和接入时延的分析结果显示:网络规模一定时,系统吞吐量受竞争窗口大小的影响较大,而系统平均接入时延的影响较小。该机制对提高和完善编队协同网络的通信性能具有一定的意义。

**关键词:**编队; Ad Hoc 网络; IEEE 802.11; MAC; 竞争窗口

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3516(2009)01-0056-04

编队协同作战强调各参战节点作用与功能的等同性,网络拓扑多采用分布式结构。Link-16 的 TDMA 分布式网络已广泛应用于数字化战场。但它适用于拓扑固定的网络,对于编队近距交战中网络拓扑的快速变化适应性较差。而无线 Ad Hoc 网络不依赖于基础设施,组网灵活、对网络拓扑变化鲁棒性强等自组织、自适应特点,是编队协同分布式网络结构一种较好的选择。无人机编队及卫星编队采用 Ad Hoc 形式实现分布式协同<sup>[1-3]</sup>,通信协议针对动态网络拓扑设计,编队成员自动组成通信网络体系,自动检测成员的加入和离开。相关文献对基于无线局域网(WLAN) IEEE802.11x 的编队通信性能进行了分析对比<sup>[2,4-5]</sup>。

IEEE802.11<sup>[6]</sup>协议中,MAC 层的 DCF 访问控制机制基于 CSMA/CA,采用竞争机制和回退机制。大量 DCF 性能的优化策略集中在 DCF 退避窗口的选择上,如提出在增加竞争窗口时,不要每次翻倍,而是采用一个较小的参数,即所谓的“慢增”<sup>[7]</sup>;提出只有在连续检测到  $c$  次传输成功时,才将竞争窗口减半<sup>[8]</sup>。可见,竞争窗口的设计对网络性能的提高具有一定作用。本文提出 DCF/CCW(DCF with Constant Contention Window)机制,根据竞争节点数目<sup>[9-10]</sup>来使用常数竞争窗口,以提高基于 Ad Hoc 的协同网络的通信性能,并对其进行分析和仿真。

## 1 DCF/CCW 机制

与 IEEE802.11DCF 不同,DCF/CCW 的主要思想是去除传统 DCF 中的 BEB,同时直接给定节点一个常数竞争窗口值 CCW 用以进行退避时隙数的选择。当一个 MAC 帧到达时,节点从  $(0, CWW - 1)$  中直接选取一个随机数作为退避时隙数,然后开始进入退避规程。退避规程与 IEEE802.11DCF 中相同,在信道忙的情况下,退避暂停;信道空闲时,退避继续。如果发生碰撞,终端节点只需从  $(0, CWW - 1)$  中重新选取一个随机数作为退避时隙数,而不需要对 CCW 做任何改变。这一节中,将分析在不同网络规模下,DCF/CCW 中不

\* 收稿日期:2008-07-03

作者简介:吕娜(1970-),女,陕西西安人,副教授,博士生,主要从事无线数据通信研究;

E-mail: Lvnm2007@163.com

徐德民(1937-),男,陕西三原人,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事精确制导控制与仿真研究。

同窗口值对网络系统性能的影响。在不致混淆的情况下,为方便起见,用  $W$  来代替 CCW。

## 2 DCF/CCW 性能分析

### 2.1 DCF/CCW 中 MAC 帧发送概率分析

假定网络中节点数目为  $n$ ,各节点工作在饱和状态下。每一个 MAC 帧在发送前都要经历一段退避时间,退避时间的长度由随机取自  $(0, W-1)$  中的退避时隙数决定。令随机过程  $b(t)$  为某一节点的退避时隙计数器, $t$  和  $t+1$  分别为相邻 2 个时隙的开始时刻, $b(t)$  在每一个时隙的开始时刻减 1。需要注意,这里的一个时隙与 IEEE802.11DCF 中规定的时隙长度  $\sigma$  是不同的。因为当信道忙时,各节点的退避规程是暂停的,在连续 2 个空闲退避时隙之间,往往包含有 MAC 帧的发送过程,因而,这个时隙长度大于  $\sigma$ 。由于  $b(t)$  在下一时刻的取值,只受当前退避状态的影响,与此前的退避状态无关。同时 DCF/CCW 中没有退避级数的概念,每次 MAC 帧发送都使用相同的竞争窗口值,所以随机过程  $b(t)$  是一个一维的马尔可夫过程。

在 DCF/CCW 中,不论 MAC 帧是否为新到达,其退避时隙数都是随机取自  $(0, W-1)$ 。即重传限制  $r$  只是决定了什么时候丢弃一个 MAC 帧,而对马尔可夫模型没有任何影响。因此,该模型的一步转移概率为:

$$\begin{cases} P\{b(t+1) = k | b(t) = k+1\} = 1 & k \in (0, W-2) \\ P\{b(t+1) = k | b(t) = 0\} = 1/W & k \in (0, W-1) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中第 1 个等式说明在任意时隙的开始时刻,退避时隙数减 1;第 2 个等式说明不论 MAC 帧是否为新到达,其退避时隙数都是随机取自  $(0, W-1)$ 。令:  $b_k = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{b(t) = k\}$ ,  $k \in (0, W-1)$ , 为该马尔可夫链的静态分布概率。可以得到:  $b_k = \frac{W-k}{W} b_0$ ,  $k \in (0, W-1)$ 。由此,不难得到:  $1 = \sum_{k=0}^{W-1} b_k = \sum_{k=0}^{W-1} b_0 \frac{W-k}{W} =$

$b_0 \sum_{k=0}^{W-1} (1 - \frac{k}{W}) = b_0 \frac{W+1}{2}$ 。当  $b(t)$  减为 0 的时候,MAC 帧可以发送。因此任意时隙 MAC 帧发送概率为:

$$\tau = b_0 = \frac{2}{W+1} \quad (2)$$

### 2.2 DCF/CCW 吞吐量分析

考虑到  $n$  个节点竞争信道,每一个节点都以概率  $\tau$  发送数据,则任意时隙信道空闲的概率  $P_i = (1-\tau)^n$ ,取  $P_i$  为在该时隙中至少有一个节点要发送 MAC 帧的概率,因此,  $P_i = 1 - P_i = 1 - (1-\tau)^n$ 。

只有当该时隙中有且只有一个节点发送 MAC 帧时,该 MAC 帧才可以发送成功(这里暂时不考虑信道物理特性造成的 MAC 帧丢失问题)。因此,在该时隙中,MAC 帧成功发送的概率为:

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_i} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (3)$$

相应的,该时隙中 MAC 帧发送失败(碰撞)的概率为:

$$P_c = 1 - P_s = \frac{1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n} \quad (4)$$

定义规一化吞吐量  $S$  为一段时间内信道被占用,且用于成功传送 MAC 帧的时间所占总时间的比例。根据以上分析, $S$  可表示为:

$$S = \frac{T_p P_s P_i}{T_s P_s P_i + T_c P_c P_i + \sigma P_i} \quad (5)$$

式中,  $T_s$  为成功发送 MAC 帧时,信道为忙的平均时间;  $T_c$  为 MAC 帧发送失败(碰撞)时,信道为忙的平均时间;  $T_p$  为 MAC 帧成功发送时,用于发送 MAC 帧的平均时间;  $\sigma$  为空闲时隙的长度。

在基本接入模式下,作如下定义:  $T_{\text{PHY}}$  为 PHY 头传输时间与传播时延  $\delta$  的总和;  $T_{\text{ACK}}$  为传输 ACK 帧所用的时间。此时,  $T_s$  和  $T_c$  可以表示为:

$$\begin{cases} T_s = T_{\text{PHY}} + T_p + \text{SIFS} + T_{\text{PHY}} + T_{\text{ACK}} + \text{DIFS} \\ T_c = T_{\text{PHY}} + T_p + \text{DIFS} \end{cases} \quad (6)$$

假设 MAC 数据帧为固定帧长,根据式(2),取表 1 中的数据,可以得到 DCF/CCW 中系统规一化吞吐量  $S$  和竞争窗口 CCW 之间的对应关系,如图 1 所示。

表1 性能分析所用参数

Tab. 1 Parameters of performance analysis

信道速率	1 Mbps
时隙长度	20 $\mu$ s
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	50 $\mu$ s
传播时延	1 $\mu$ s
$T_{PHY}$	192 $\mu$ s + 1 $\mu$ s
MAC 帧长	1 024 Byte
ACK 帧长	14 Byte
重传极限	7

从图1可以看到,当网络规模不变时,伴随  $W$  值从1增加到1 000,系统归一化吞吐量  $S$  先是迅速增加,然后逐渐减少;网络规模较小时系统吞吐量在达到峰值后下降得更快;同时,较大规模网络的吞吐量在到达峰值之前增加较慢。值得注意的是,不同网络规模下最大系统吞吐量却几乎相同,如表2所示。因此,各节点根据网络规模选择适合的竞争窗口,就可以最大化系统吞吐量。

### 2.3 DCF/CCW 时延分析

定义接入时延(Access Delay, AD)是节点为发送一个 MAC 帧而竞争信道的整个时间过程,即从开始进行信道竞争到竞争成功所经历的时间的总和。

要计算 AD,先要得到平均时隙长度: $d = P_t(T_s P_s + T_c P_c) + P_t \sigma$  当节点有 MAC 帧要发送时,即在  $(0, W - 1)$  中随机选取一个整数作为退避时隙数,并开始退避规程。当退避时隙数减为零时,MAC 帧被发送出去。如果该 MAC 帧在第1次发送时就成功,此时的平均信道接入时延为:

$$D_1 = E[\text{backof\_fslots}]d = \frac{W-1}{2} [P_t(T_s P_s + T_c P_c) + P_t \sigma] \quad (7)$$

在 DCF/CCW 中,竞争窗口的大小是固定的,故每一次发送所需要的平均 AD 值都是相同的。如果一个 MAC 帧经过  $i$  次发送才成功,则其总平均 AD 值为:

$$D_i = iD_1 = \frac{(W-1)i}{2} [P_t(T_s P_s + T_c P_c) + P_t \sigma] \quad (8)$$

考虑重传限制  $r$ ,则 MAC 帧的系统平均 AD 值为:

$$D = E[D_i] = \sum_{i=1}^r D_i P_c^{i-1} (1 - P_c) = D_1 (1 - P_c) \sum_{i=1}^r i P_c^{i-1} \quad (9)$$

利用表1中的数据,可以得到系统平均 AD 与竞争窗口值之间的关系,如图2所示。

图2中,对应不同规模的网络,其系统平均 AD 值差异很大。但是对给定的网络规模,当竞争窗口值大于竞争节点数目后,系统平均 AD 值增加非常缓慢。

## 3 结束语

本文采用 IEEE 802.11 DCF 设计基于 Ad Hoc 的编队协同 MAC 协议优化改进机制,并对其进行了分析和仿真。该机制对提高和完善编队协同网络的通信性能具有一定的意义。

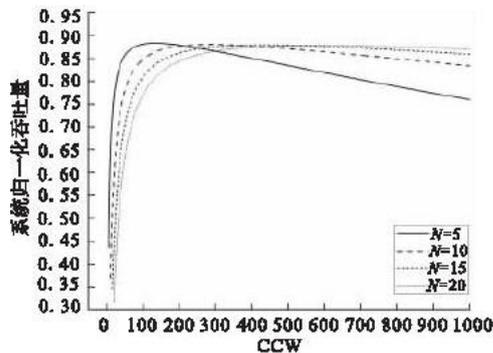


图1 不同网络规模下系统吞吐量与竞争窗口的关系

Fig. 1 Relation between throughput and contention window under different network size

表2 不同规模网络的最大理论吞吐量及对应最优竞争窗口

Tab. 2 The maximum throughput and optimal contention window under different network size

网络规模	最大吞吐量	最优竞争窗口
$n = 5$	0.883 3	133
$n = 10$	0.880 2	282
$n = 15$	0.879 2	420
$n = 20$	0.878 7	579

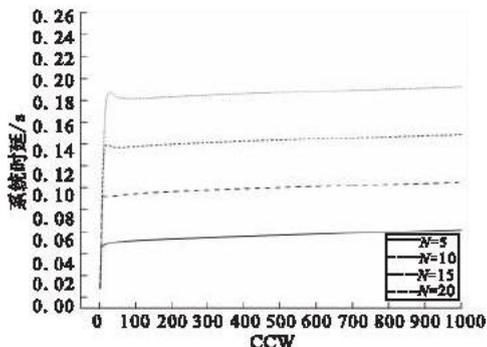


图2 不同网络规模下系统平均接入时延与竞争窗口关系

Fig. 2 Relation between AD and contention window under different network size

## 参考文献:

- [ 1 ] Claus H Christmann, Eric Johnson N. Design and Implementation of A Self – configuring Ad – hoc Network for Unmanned Aerial Systems[ R]. AIAA 2007 – 2779.
- [ 2 ] Bamberger Robert J, Scheidt David H, Hawthorne R Chad, et al. Wireless Network Communications Architecture for Swarms of Small UAVs[ R]. AIAA 2004 – 6594.
- [ 3 ] Kul Bhasin, Hayden Jeffrey L. Inter – spacecraft Communication Architectures and Technologies for Coordinated Spacecraft Missions[ R]. AIAA 2001 – 4709.
- [ 4 ] Knoblock Eric J, Walleth Thomas M, Vijay K Konangi, et al. Network Configuration Analysis for Formation Flying Satellites [ C]//Aerospace Conference. [ S. l. ]:IEEE,2001:991 – 1000.
- [ 5 ] 李 瑛,叶 文,范洪达,等. MANET 中组播协议 MACAM 性能分析[J]. 海军航空工程学院学报,2007,22(1):193 – 195.  
LI Ying, YE Wen, FAN Hongda, et al. Performance Analysis of MACAM Multicast Protocol in MANET[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007, 22(1):193 – 195. (in Chinese)
- [ 6 ] ANSI/IEEE 802. 11 – 1999. Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specification[ S]. 2003.
- [ 7 ] Krishna C R, Chakrartarti Saswat. A Modified Backoff Algorithm for IEEE802. 11 DCF – based MAC Protocol in A Mobile Ad Hoc Network[ C]//The IEEE Region 10 th Conference 2004. Chiang Mai, Thailand;IEEE,2004:664 – 667.
- [ 8 ] WANG Chonggang, LI Bo, LI Lemin. A New Collision Resolution Mechanism to Enhance the Performance of IEEE 802. 11 DCF [ J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2004, 53 (4): 1235 – 1246.
- [ 9 ] ZOU Xiangyi, GAO Jie, ZHAO Liqiang, et al. Adaptive Optimization of IEEE 802. 11 DCF Based on An Accurately Estimated Number[ C]//2007 Future Telecommunication Conference. Beijing:[ s. n. ],2007: 327 – 331.
- [ 10 ] Bianchi G, Tinnirello I. Kalman Filter Estimation of the Number of Competing Terminals in An IEEE 802. 11 Network[ C]//IEEE INFOCOM 2003. San Francisco, CA, USA:IEEE,2003:844 – 852.

(编辑:徐楠楠)

## A MAC Protocol Analysis of Formation Cooperation Based On Wireless Ad Hoc Networks

LÜ Na<sup>1,2</sup>, XU De – min<sup>1</sup>, WANG Wen – Yi<sup>2</sup>, ZHANG Yue – tong<sup>2</sup>, ZOU Xiang – yi<sup>3</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Marine College, Xi'an 710072; 2. The Telecommunication Engineering Institute of the Air Force Engineering University, Xi'an 710077; 3. State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian Univ, Xi'an 710071)

**Abstract:** A lot of research result indicate optimization design of backoff mechanism and contention window can improve performance of IEEE802. 11 DCF MAC. Based on the formation of small UAVs, the information flying satellites and IEEE802. 11, an optimized MAC mechanism was proposed: DCF/CCW. A station estimated the number of competing terminals through monitoring the channel, and used constant contention window. This mechanism is of topology, the system contention code obtained from monitoring channel changes with network configuration. Thereby it can adjust optimal constant contention window dynamically. The analysis results indicate when network scale is defined, system throughput have more effect on contention window, and less effect on system access delay. The optimized mechanism can develop and improve the communication performances of the cooperative network.

**Key words:** formation; Ad Hoc networks; IEEE 802. 11; MAC; contention window