

DOI: 10.7652/xjtuxb201510020

一种区分优先级自适应抖动的媒质接入控制协议

肖雷蕾, 张衡阳, 毛玉泉, 程国兵, 朱庆
(空军工程大学信息与导航学院, 710077, 西安)

摘要: 针对军事航空通信系统中随机接入类协议不支持多优先级且在重负载时传输性能急剧恶化问题,提出一种区分优先级自适应抖动的多信道媒质接入控制(MAC)协议 PAJ_MAC。协议基于随机接入机制,采用为各个优先级设置不同最大抖动阶段的方法来区分各优先级业务的 QoS,通过估计信道忙闲程度并根据估计值调节抖动阶段转移概率自适应因子,使协议具备业务负载自适应能力。分别建立了分组等待阶段发送缓冲区的 M/G/1/K 排队模型、信道接入阶段抖动状态的二维马尔科夫链模型和传播阶段的突发包碰撞模型,得到了协议各项性能指标的理论表达式,并通过编程求出了自适应因子在保证最高优先级可靠性需求下随业务负载变化的最优解。仿真表明,该协议支持多优先级业务,并始终保证最高优先级业务的低时延(端到端时延 $<10\text{ ms}$)、高可靠(成功传输概率 $\geq 95\%$)传输以及系统吞吐量的稳定。

关键词: 航空通信;随机接入;媒质接入控制协议;自适应抖动;优先级

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0123-07

An Adaptive Jitter Based Media Access Control Protocol with Priorities

XIAO Leilei, ZHANG Hengyang, MAO Yuquan, CHENG Guobing, ZHU Qing
(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A prioritized adaptive jitter media access control protocol (PAJ_MAC) based on multi-channel random access mechanism is proposed to solve the issues of multi-priority traffic differentiation and poor performance under heavy loads in military aeronautical communication. The protocol bases on the random access mechanism and classifies QoS for multiple priorities by setting different maximum jitter stages. It adaptively implements traffic loads by regulating the jitter stage transition probability based on continuous feedback of channel occupation statistic. All of the protocol performance expressions are deduced through building three models. These models are a queuing process model with M/G/1/K theory, an adaptive jitter mechanism model with 2-D Markov chain and a propagation process model with burst collision. The optimal adaptive factor to guarantee the reliability of the highest priority traffic under different traffic loads is derived through programming. Simulation results show that the protocol provides correct traffic differentiation, guarantees the timeliness and reliability of the highest priority traffic (i. e. the time delay is less than 10 ms and the successful transmission probability is more than 95%), and maintains the stability of the system throughput all the time.

Keywords: aeronautical communication; random access; media access control protocol; adaptive jitter; priority

打击时敏目标的作战任务具有时间约束严格、信息交互质量要求高的特性,因此对作战平台间信息交互共享能力提出了很高的要求。目前的军事航空通信网络大多采用集中式接入控制方式,如美军的 Link11 数据链使用的轮询机制媒质接入控制(MAC)协议、Link-16 数据链使用的 TDMA 协议等,都存在端到端时延大、可扩展性和抗毁性差等缺点。Link22 采用动态 TDMA 机制,具有了一定的灵活性和可扩展性,但信息共享的时延一般在秒级,难以满足时敏性业务的毫秒级传输时延的要求。因此,美军正在发展一种基于自组织网络体系架构的新型高速、宽带、低时延的战术网络瞄准技术(tactical targeting network technology, TTNT)^[1],其 MAC 协议的设计紧紧围绕着打击时敏目标的要求而展开。

航空自组网具有部署灵活、快速自组、分布式、高抗毁性等特点^[2-4]。MAC 协议作为航空自组网的关键技术之一,直接影响着航空自组网的时效性、可靠性及系统吞吐量^[5]。航空自组网具有多种业务类型,如何保证打击时敏目标的紧急业务传输的时效性、可靠性是 MAC 协议亟待解决的问题^[6]。现有航空自组网的典型 MAC 协议主要有以下 3 种:①以 TDMA 及其相关改进的时隙分配类协议^[7-8],具有系统吞吐量大、时隙固定和可动态调整的特点,但这类协议的时隙长度设置需要考虑最大传播时延和时延抖动等因素,仅适合于对时效性要求不高的通信系统;②以 IEEE 802.11 DCF 及相关改进的时隙预约类协议^[9-11],适用于分布式网络,但每个节点需要通过 RTS/CTS 控制帧的交互来竞争预约时隙,在大尺度的航空节点分场景下,这种交互引入的传播时延对信息时效性带来了严重影响,也不能支持面向时敏目标打击的业务信息传输;③以 Aloha 及其相关改进的随机接入类协议^[12-14],大大降低了接入时延。例如:战术网络瞄准技术的基于优先级统计的媒质接入(statistical priority based media access, SPMA)控制协议^[12],采用多信道、信道忙闲统计等技术,可将 100 n mile 内的信息传输时延降低到 2 ms 以内,分组一次接入成功率达到 99%;文献^[13]提出一种 Aloha 改进 MAC 协议(FH_MAC),在 Aloha 随机接入基础上,采用跳频、Turbo 编码、猝发等技术以减小信道碰撞概率并提高数据包的发送成功率,FH_MAC 协议在保持低时延特性的同时大大提高了传输成功率,但在重负载时性能严重恶化,且不支持多优先级业务;文献^[14]提出一种改

进的 MAC 协议(AFH_MAC),针对 FH_MAC 协议中吞吐量-业务负载呈抛物线关系提出了一种自适应机制,主要是通过设置突发包接入信道的权限来控制网络负载数量,协议能有效维持重负载时系统吞吐量的稳定,但是未考虑航空通信网络中多优先级业务的情况。

本文在文献^[13-14]的研究基础上,提出了区分优先级的自适应抖动媒质接入控制(prioritized adaptive jitter based media access control, PAJ_MAC)协议,旨在提供区分优先级服务且为最高优先级业务提供严格的时效性和可靠性保障,同时解决随机接入类 MAC 协议重负载时性能恶化的问题。

1 协议描述

1.1 协议框架

本文提出的 PAJ_MAC 协议框架如图 1 所示。其中:分组发送时,上层产生的业务分组经过 FIFO 排队、突发包产生和自适应抖动模块后接入网络,完成发送过程;分组接收时,接收到的数据通过分组重组模块进行译码重组,恢复出完整的分组后,完成接收过程。

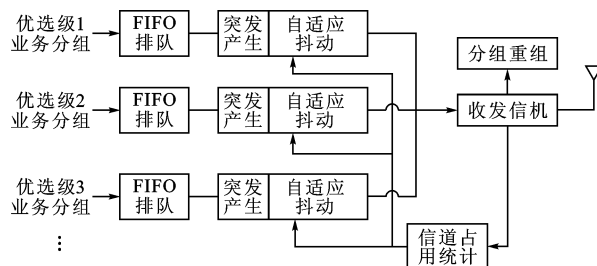


图1 PAJ_MAC 协议框架

图1中各模块功能具体介绍如下。

(1)排队过程:分组到达后按照各自优先级排队,排队规则为FIFO,队列饱和时分组自动丢弃。

(2)突发包产生模块:对分组进行1/3效率Turbo编码,然后等长拆分为若干个突发包,在每个突发包中加入相应身份信息(包括分组序号和突发包序号)。

(3)分组重组模块:根据接收到的突发包身份信息对其进行译码重组,根据Turbo编码原理,只需成功接收一半以上突发包就能成功恢复分组。

(4)信道占用统计模块:统计一段时间内各个信道上的突发包数量,对信道忙闲程度进行量化表示,将该值反馈给自适应抖动机制并作为其抖动阶段转移概率设置依据。

(5)自适应抖动机制:每个突发包在发送前先进

行自适应抖动,然后在频率库中随机选择一个频点完成发送过程。该机制可以实现为不同优先级业务提供不同的 QoS。

1.2 自适应抖动算法

在自适应抖动算法中,网络节点为每个优先级业务维持着一张抖动阶段转移图。图 2 为优先级 n ($n=1,2,3,\dots$) 的抖动阶段转移图,共包含 $m+1$ 个抖动阶段,不同优先级的最大抖动阶段 m 取值不同。每个抖动阶段都对应一个抖动窗口, W_i 表示抖动阶段 i 对应的抖动窗口, W_0 为最小抖动窗口,各优先级具有相同的最小抖动窗口,且大小为 $W_0 = 10\delta$ (δ 为抖动时隙)。抖动窗口随抖动阶段线性增加,后一个抖动阶段的抖动窗口比前一个增加 W_0 , $W_i = (i+1)W_0, 0 \leq i \leq m$ 。

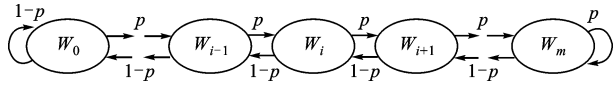


图 2 自适应抖动算法抖动阶段转移图

不同优先级突发包的自适应抖动机制同时独立运行,当突发包到达时,算法开始启动。以优先级 n 做具体说明:如突发包到达时的当前抖动阶段为 i ($0 < i < m$),突发包不在该阶段进行抖动,而是以 p 为概率后退一个抖动阶段,或者以 $1-p$ 为概率前进一个抖动阶段,两者为对立事件,如果是在后一个抖动阶段($i+1$ 抖动阶段)抖动,则将当前抖动阶段 i 更新为 $i+1$,然后在区间 $[1, W_{i+1}/\delta]$ 随机生成一个整数并赋值给计数器,计数器每经过一段时间 δ 后减 1,当计数器为 0 时该突发包完成抖动,然后从频点库中随机选择一个频点接入网络;如突发包到达时的当前抖动阶段 $i=0$ 或 $i=m$,表明该抖动阶段相邻的前或后一个抖动阶段就是其自身。当前突发包发送后,后续突发包按照上述过程重复。

2 协议建模

2.1 二维马尔科夫链模型

接下来采用二维马尔科夫链对自适应抖动算法进行建模。以数组 (i, j) 表示节点的抖动状态,其中, i 为抖动阶段, $i \in [0, m]$, j 为抖动计数器的计数值, $j \in [0, W_i - 1]$,那么节点的抖动状态空间为 $\Omega = \{(i, j) | i \in [0, m], j \in [0, W_i - 1]\}$ 。图 3 为算法的二维马尔科夫链状态转移图。设 $(s(t), b(t))$ 表示在 t 时刻节点所处的抖动状态,那么二维随机过程 $(s(t), b(t))$ 是状态空间为 Ω 的离散二维马尔科夫链。

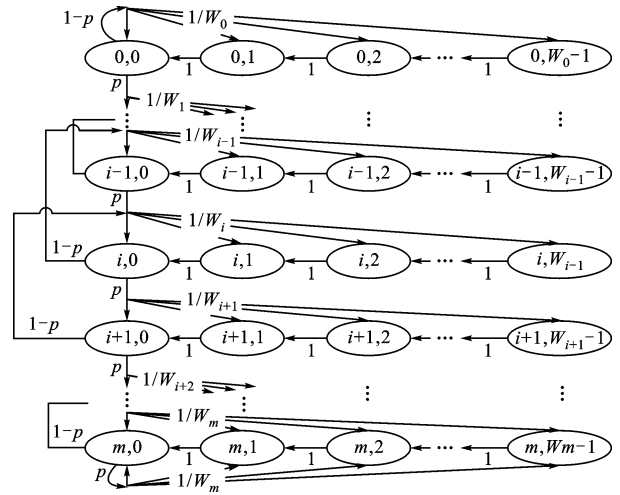


图 3 自适应抖动算法的二维马尔科夫链状态转移图

以 $b_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(t) = i, b(t) = j\}$ 表示马尔科夫链中各个状态的稳态概率,由图 3 可得

$$(1-p)b_{1,0} = pb_{0,0} \rightarrow b_{1,0} = \frac{pb_{0,0}}{(1-p)} \quad (1)$$

$$b_{i+1,0} - b_{i,0} = \frac{p}{1-p}(b_{i,0} - b_{i-1,0}), 1 \leq i \leq m-1 \quad (2)$$

$$(1-p)b_{m,0} = pb_{m-1,0} \rightarrow b_{m,0} = \frac{pb_{m-1,0}}{1-p} \quad (3)$$

$$b_{i,j} = \begin{cases} \frac{W_i - j}{W_i}(1-p)(b_{0,0} + b_{1,0}), & i=0, 0 \leq j \leq W_0 - 1 \\ \frac{W_i - j}{W_i}[pb_{i+1,0} + (1-p)b_{i-1,0}], & 1 \leq i \leq m-1, \\ & 0 \leq j \leq W_i - 1 \\ \frac{W_i - j}{W_i}p(b_{m-1,0} + b_{m,0}), & i=m, 0 \leq j \leq W_m - 1 \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可得

$$b_{i,j} = \frac{W_i - j}{W_i}b_{i,0}, 0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq W_i - 1 \quad (5)$$

根据二维马尔科夫链的归一化条件可得

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{W_i-1} b_{i,j} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \sum_{j=0}^{W_i-1} \frac{W_i - j}{W_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^m b_{i,0} (1 + W_i) \quad (6)$$

为表达方便,令 $H = p/(1-p)$,进而求出

$$b_{0,0} = 2(1-H)^2 / [(W_0 m + W_0 + 1)H^{m+2} - (2W_0 + W_0 m + 1)H^{m+1} - H + W_0 + 1] \quad (7)$$

将所得 $b_{0,0}$ 代入式(1)~式(3),即可求得二维马尔科夫链的所有稳定状态概率值。

定义分组的服务时间为该分组所属突发包的抖

动时间之和,用 $\text{bur}(i, j)$ 对突发包进行标识,表示突发包在第 i 抖动阶段抖动 j 个时隙后接入信道。根据二维马尔科夫链模型,突发包在抖动阶段 i 接受

服务的概率为 $b_{i,0} / \sum_{i=0}^m b_{i,0}$, 由于在该阶段抖动窗口下随机选择抖动时隙数,所以该突发包抖动 j 个时隙的概率为 $1/W_i$ 。那么 $\text{bur}(i, j)$ 关于 $i, j (0 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq W_m)$ 的二维概率密度为

$$P(\text{bur}(i, j)) = \frac{b_{i,0}}{W_i \sum_{i=0}^m b_{i,0}} = \frac{b_{i,0}}{(i+1)W_0 \sum_{i=0}^m b_{i,0}} \quad (8)$$

将式(8)对变量 i 求和,得到 $\text{bur}(i, j)$ 的关于 j 的边缘概率密度函数,表示突发包接入信道前抖动 j 个时隙的概率,如下式

$$P(\text{bur}(j)) = \sum_{i=0}^m P(\text{bur}(i, j)), 1 \leq j \leq W_m \quad (9)$$

假设一个分组被拆分的突发包数量为 N_{bur} 个。定义 $\text{bur}(j_k)$, 表示分组中第 $k (k=1, 2, \dots, N_{\text{bur}})$ 个突发包,抖动时间为 $j_k (1 \leq j_k \leq W_m)$ 个时隙,则 N_{bur} 个突发包关于抖动时间的联合概率密度函数为

$$\begin{aligned} f(\text{bur}(j_1), \text{bur}(j_2), \dots, \text{bur}(j_{N_{\text{bur}}})) &= \\ P(\text{bur}(j_1), \text{bur}(j_2), \dots, \text{bur}(j_{N_{\text{bur}}})) &= \\ \prod_{k=1}^{N_{\text{bur}}} P(\text{bur}(j_k)) &\quad (10) \end{aligned}$$

定义分组的服务时间为 $T_{\text{pac}}(J)$, 那么,其大小是 $J \delta (N_{\text{bur}} \leq J \leq W_m N_{\text{bur}})$ 的概率为

$$P(T_{\text{pac}}(J)) = \sum_{j_1 + \dots + j_{N_{\text{bur}}} = J} \prod_{k=1}^{N_{\text{bur}}} P(\text{bur}(j_k)) \quad (11)$$

则分组的平均服务时间为

$$\bar{T}_{\text{pac}} = \sum_{j=N_{\text{bur}}}^{W_m N_{\text{bur}}} T_{\text{pac}}(J) P(T_{\text{pac}}(J)) \quad (12)$$

2.2 分组排队模型

对于单个节点中的长度为 K 的发送缓冲队列,网络层以泊松过程到达的分组与节点处理这些分组的过程构成 M/G/1/K 排队系统。设分组到达率为 λ (不同优先级取值不同), p_k 为稳态情况下队列中有 k 个分组的概率 ($k=0, 1, 2, \dots, K$), π_k 表示稳态情况下分组接受完服务离开发送缓冲区时缓冲区队列中有 k 个分组的概率,则根据文献[15]有

$$p_k = \begin{cases} \frac{\pi_k}{\pi_0 + \rho}, & k \in [0, K-1] \\ 1 - \frac{1}{\pi_0 + \rho}, & k = K \end{cases} \quad (13)$$

式中: ρ 为业务强度,可表示为

$$\rho = \lambda \bar{T}_{\text{pac}} \quad (14)$$

设向量 $\pi = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_k, \dots, \pi_{K-1}]$, 则 π_k 可以通过下式表示的线性方程组求得

$$\pi(M - E) = 0 \quad (15)$$

$$M = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{K-2} & 1 - \sum_{k=0}^{K-2} a_k \\ a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{K-2} & 1 - \sum_{k=0}^{K-2} a_k \\ 0 & a_0 & a_1 & \dots & a_{K-3} & 1 - \sum_{k=0}^{K-3} a_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 & 1 - a_0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中: E 为单位矩阵; a_k 为一个分组服务时间 $T_{\text{pac}}(J)$ 内有 k 个分组到达的概率

$$a_k = \sum_{J=N_{\text{bur}}}^{N_{\text{bur}} W_m} \frac{(\lambda T_{\text{pac}}(J))^k \exp(-\lambda T_{\text{pac}}(J))}{k!} P(T_{\text{pac}}(J)) \quad k=0, 1, \dots \quad (17)$$

其中 $P(T_{\text{pac}}(J))$ 已由式(11)求得。

联立式(13)~式(17)可解出所有 p_k 值。定义 $p_{\text{empty}} = p_0$, 表示队列为空,同时自适应抖动算法处于未启动状态;定义 $p_{\text{overflow}} = p_K$, 表示队列饱和,到达分组溢出的概率。

2.3 信道碰撞模型

为便于下文表述,定义 $A^{(n)}$ 表示变量 A 在优先级 $n (n=1, 2, \dots, N)$ 中的取值,定义 $r_{\text{in}}^{(n)}$ 表示单个节点中,优先级为 n 的突发包接入网络的速率。

根据 2.2 节的分析,发送缓冲区队列存在为空的情况,以优先级 n 为例,队列为空的概率为 $p_{\text{empty}}^{(n)}$, 此时相应的突发包时延抖动自适应机制也未启动,则自适应抖动算法平均服务一个分组对应的时间为 $\bar{T}_{\text{pac}}^{(n)} / (1 - p_{\text{empty}}^{(n)})$, 则单节点优先级为 n 的突发包接入网络的速率为

$$r_{\text{in}}^{(n)} = \frac{N_{\text{burst}}}{\bar{T}_{\text{pac}}^{(n)} / (1 - p_{\text{empty}}^{(n)})} \quad (18)$$

定义 R_{in} 为网络中所有节点突发包接入总速率, N_{node} 为网络节点数量,则网络中突发包接入总速率为

$$R_{\text{in}} = N_{\text{node}} \sum_{n=1}^N r_{\text{in}}^{(n)} = N_{\text{node}} \sum_{n=1}^N \frac{N_{\text{burst}}}{\bar{T}_{\text{pac}}^{(n)} / (1 - p_{\text{empty}}^{(n)})} \quad (19)$$

考虑到随机接入网络中的突发包会在时域上、频域上发生碰撞,因此,为使突发包在信道中成功传输,突发包与其相邻的前、后一个突发包的间隔需同时大于一个突发包的发送脉冲宽度 $T_{\text{bur_send}}$ 。假设单个信道中,接入网络中的突发包时间间隔服从参

数为 $\lambda_{\text{per_channel}}$ 的指数分布,突发包发送频点在 N_{channel} 个信道中随机选择,则 $\lambda_{\text{per_channel}} = (N_{\text{channel}}/R_{\text{in}})^{-1}$,由此可知,在任一信道中的突发包时间间隔概率密度函数为

$$f(t) = \frac{R_{\text{in}}}{N_{\text{channel}}} \exp\left(-\frac{R_{\text{in}}}{N_{\text{channel}}}t\right), \quad t \geq 0 \quad (20)$$

定义 $p_{\text{bur_right}}$ 表示在信道传播过程中单个突发包成功接入的概率,则

$$p_{\text{bur_right}} = \exp\left(-2 \frac{R_{\text{in}}}{N_{\text{channel}}} T_{\text{bur_send}}\right) \quad (21)$$

定义 $p_{\text{pac_right}}$,表示在信道传播过程中分组成功接入的概率。根据 Turbo 编码原理,一个分组中只要有 M_{bur} 个突发包能够成功接收,接收机就能够恢复该分组,根据排列组合可得分组成功传播概率为

$$p_{\text{pac_right}} = \sum_{k=M_{\text{bur}}}^{N_{\text{bur}}} C_{N_{\text{bur}}}^k p_{\text{bur_right}}^k (1 - p_{\text{bur_right}})^{N_{\text{bur}}-k} \quad (22)$$

式中: $C_{N_{\text{bur}}}^k$ 为组合计算。

3 性能分析

定义 $\bar{T}_{\text{delay}}^{(n)}$ 表示优先级 n 分组的平均时延,即分组从到达发送缓冲区开始到被接收共消耗的时间,包括分组排队等待时间、在自适应抖动机制中接收服务所用时间、传输时间、传播时间(不考虑在发送缓冲区队列溢出的分组和由于信道碰撞影响而解码失败的分组)。分组的排队等待时间受到队列前面等待服务的分组数量影响。由于接入网络的分组到达缓冲区时前面有 j 个分组的概率是 $p_j^{(n)} / (1 - p_{\text{overflow}}^{(n)})$, $j \in [0, J-1]$,令 $\bar{T}_{\text{wait}}^{(n)}$ 表示优先级为 n 的分组平均排队等待时间,则分组的平均等待时间为

$$\bar{T}_{\text{wait}}^{(n)} = \sum_{j=0}^{J-1} \frac{j p_j^{(n)}}{1 - p_{\text{overflow}}^{(n)}} \bar{T}_{\text{pac}}^{(n)} \quad (23)$$

令 $T_{\text{propagate}}$ 表示分组传播时间,则可得优先级 n 分组的平均时延为

$$\bar{T}_{\text{end_end}}^{(n)} = \bar{T}_{\text{wait}}^{(n)} + \bar{T}_{\text{pac}}^{(n)} + N_{\text{bur}} T_{\text{bur_send}} + T_{\text{propagate}} \quad (24)$$

定义 $P_{\text{right}}^{(n)}$ 表示优先级 n 分组成功传输概率,其值为被接收机成功接收的分组数量占有应用层产生总分组数量的比例,则有

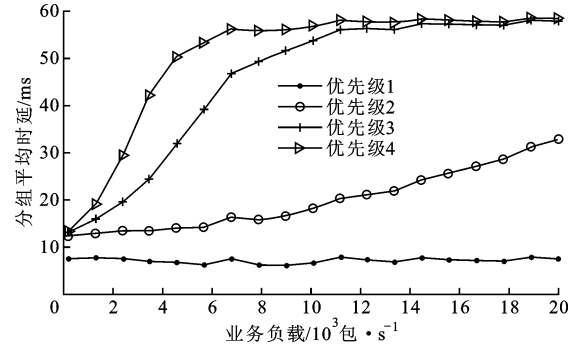
$$P_{\text{right}}^{(n)} = (1 - p_{\text{overflow}}^{(n)}) p_{\text{pac_right}}^{(n)} \quad (25)$$

定义 C 为系统吞吐量,表示单位时间内网络中正确传输的分组比特数,令 L_{pac} 为分组长度(单位 bit),则

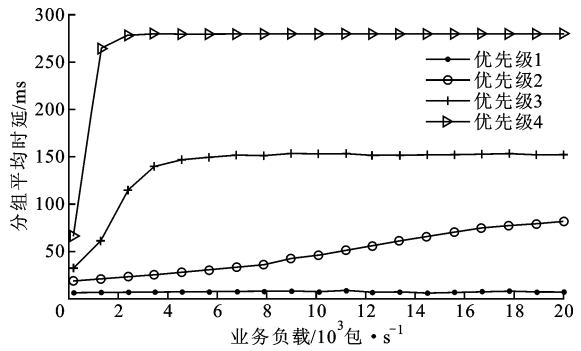
$$C = \frac{L_{\text{pac}} R_{\text{in}} p_{\text{bur_right}}}{N_{\text{bur}}} \quad (26)$$

在表 1 中给定的参数条件下,系统性能还与业

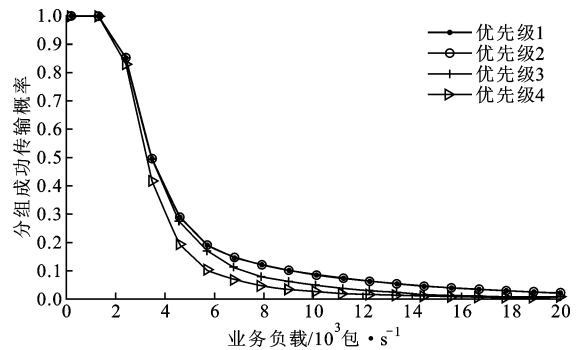
务负载和自适应因子的大小有关。分别作出了不同自适应因子取值下分组成功传输概率和平均时延随业务负载的变化关系,如图 4 所示。对比图 4a、4b



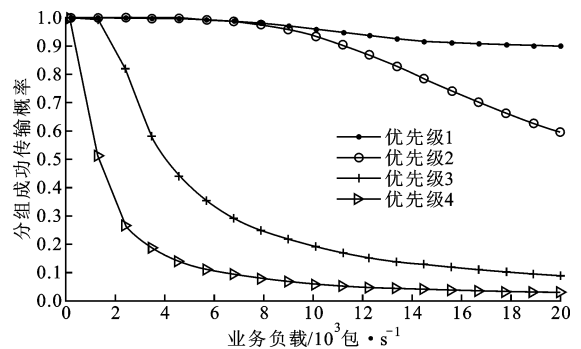
(a) 自适应因子 $p=0.35$



(b) 自适应因子 $p=0.65$



(c) 自适应因子 $p=0.35$



(d) 自适应因子 $p=0.65$

图 4 在不同自适应因子下各优先级平均时延和成功传输概率随负载变化的关系图

可以看出,随着业务负载的增加,各优先级分组平均时延也相应增加,且随着自适应因子的增大,低优先级分组平均时延增长加快。对比图 4c、4d 可以看出,随着业务负载的增加,各优先级分组的成功传输概率迅速降低,而在自适应因子取值较大时,高优先级的成功传输概率有了较大提高。从而可得出:在 p 取值较小时,轻负载时各优先级业务具有较好的可靠性和时效性,但是在业务负载较重时各优先级业务的可靠性极低; p 取值较大时,重负载时高优先级业务可靠性有了较大提高,但是在轻负载时低优先级业务可靠性和时效性过低。

4 自适应因子 p 的最优取值

自适应因子 p 是信道占用统计模块针对信道忙闲程度的量化表示值。通过性能分析可知,在 p 取值较小时,可保证轻负载时各优先级业务具有较好的可靠性和时效性,但在负载较重时各优先级业务可靠性很难保障; p 取值较大时,可提高重负载时高优先级业务可靠性,但在轻负载时低优先级业务可靠性和时效性过低。为保证最高优先级业务低时延和高可靠的同时提高通信的整体效益,自适应因子 p 须根据业务负载自适应调整,以实现 2 个目的:①始终保证最高优先级业务的实时可靠传输;②在轻负载时,提高低优先级业务的通信质量。

针对最高优先级业务不同的最低成功传输概率要求,在给定表 1 系统参数的情况下,通过编程得到了最优自适应因子 p 随最高优先级成功传输概率 $P_{\text{right}}^{(1)}$ 的变化关系,如图 5 所示。

表 1 仿真参数	
参数	数值
单个分组拆分的突发包数 N_{bur}	28
各优先级队列长度 K	5
最小抖动窗口 W_0/ms	10
分组长度 L_{pac}/b	3 000
节点数量 N_{node}	20
抖动时隙 $\delta/\mu\text{s}$	30
频点数量 N_f	10
信道传输速率 $V_{\text{channel}}/\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$	2
解码所需最小突发包数 M_{bur}	14
最高优先级成功传输概率 $P_{\text{right}}^{(1)}$	≥ 0.95

从图 5 可知,不同曲线间,对最高优先级业务最低成功传输概率要求越高,自适应因子 p 在相同业务负载下的取值越大;单个曲线中,随着业务量的增

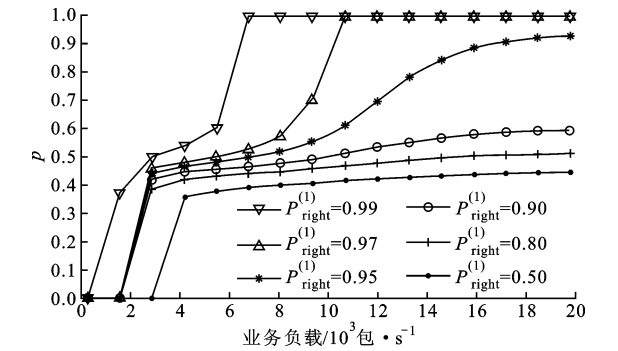


图 5 最优自适应因子与最高优先级成功传输概率的变化关系

加,自适应因子 p 取值越大。

5 仿真分析

设定如图 6 的单机群突击作战仿真场景。场景中打击机群共包含 20 个空中节点,其中 18 个节点从始发地以 278 m/s 的速度径直奔赴 250 km 外的目标区域进行作战,另外 2 个节点部署在距离目标区域 300 km 的椭圆轨道上提供战场信息支援保障。整个作战过程包括 4 种类型业务信息,且各节点都能接收到网络中其他节点发送的信息。根据统计,高优先级分组到达率 $\lambda^{(1)}$ 固定为 10 包/s,其他优先级分组到达率满足关系式 $\lambda^{(2)}:\lambda^{(3)}:\lambda^{(4)}=1:4:7$,在此设定 4 个优先级且各优先级最大抖动阶段 $m^{(1)},m^{(2)},m^{(3)},m^{(4)}$ 分别为 0、5、10、20,自适应因子采用图 5 中 $P_{\text{right}}^{(1)}=0.95$ 曲线的对应值。PAJ_MAC 协议仿真参数如表 1 所示。协议性能仿真曲线如图 7 所示。

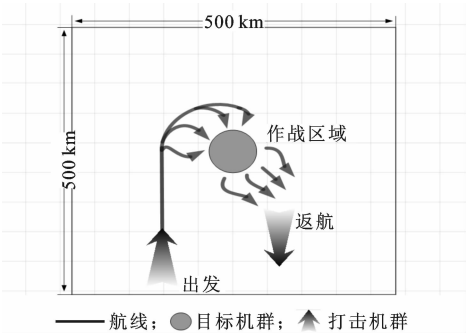


图 6 仿真场景示意图

从图 7a、7b 可知:当系统为轻负载时,各个优先级都具有较高的成功传输概率和较低的平均时延,且差异较小;处于重负载时,最高优先级业务的信息传输质量保持不变,成功传输概率为 0.95,分组平均时延在 7 ms 左右。从图 7c 可知,在轻负载时,各优先级分组丢包率基本为 0;在重负载时,丢包率不

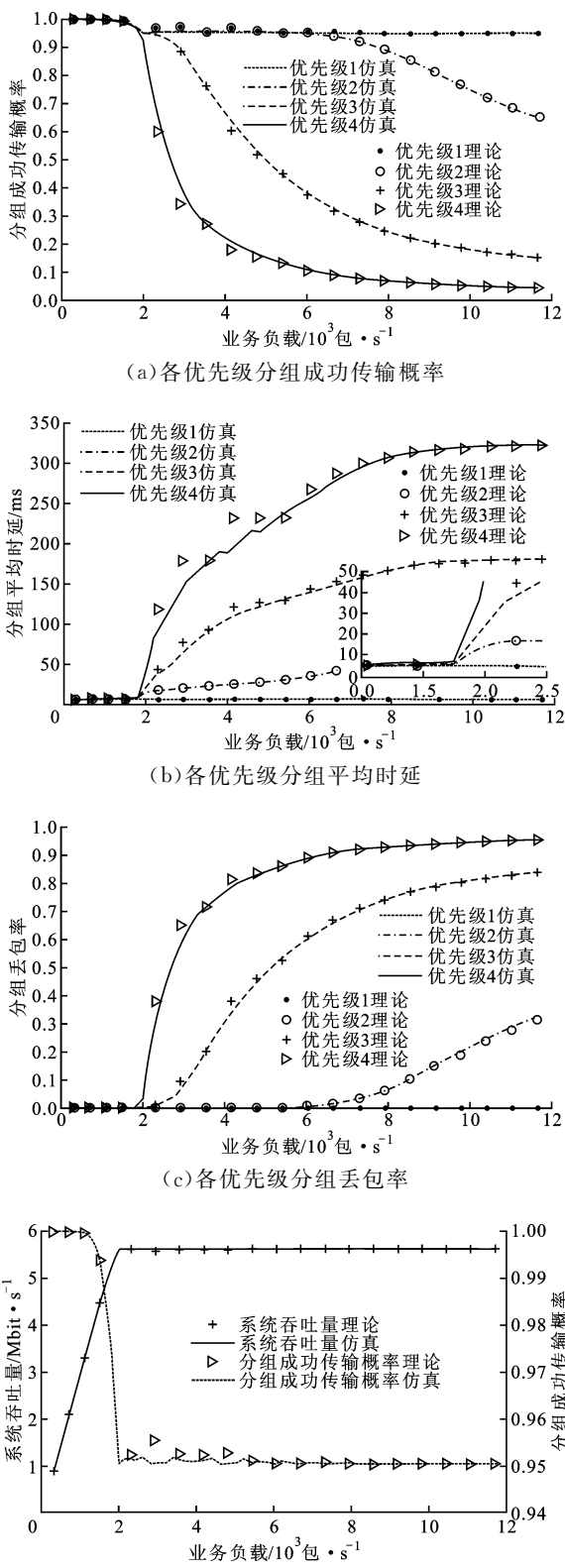


图 7 本文协议性能的理论 and 仿真曲线

断增加,但最高优先级的丢包率始终为 0。从图 7d 可知,分组成功传输概率在轻负载时较大,且随着负载增加最终维持在 0.95,系统吞吐量在重负载时也保持在最大值。

仿真结果分析:①当系统处于轻负载时,自适应因子 p 取值较小,自适应抖动机制作用效果弱,从而使各优先级之间的 QoS 差异较小,使得轻负载时低优先级业务也能具有较高的信息传输质量;②当系统处于重负载时,信道质量变差,自适应因子 p 的取值变大,优先级低的分组服务时间变大,分组溢出概率增加,限制了低优先级分组的接入,避免了信道质量的继续恶化;③PAJ_MAC 协议的理论 and 仿真结果一致,始终保证最高优先级业务的实时可靠传输,且提高了轻负载时低优先级业务的通信质量,证明了最优自适应因子理论计算值的正确性以及自适应抖动机制的有效性。

6 结束语

为面向“时敏目标”打击的航空自组网设计了一种基于自适应抖动且支持多优先级业务类型的 MAC 协议,采用无线网络性能分析中成熟和通用的二维马尔科夫链模型,重点研究分析并仿真了自适应抖动机制对 MAC 协议的实时性、可靠性的影响。协议采用自适应抖动机制为各个优先级设置不同最大抖动阶段,以提供不同优先级业务的 QoS 保障,通过信道占用统计模块提供的自适应因子 p 的反馈调节作用,使协议具备业务负载自适应能力,即轻负载时各优先级业务均能高效、可靠地传输,重负载时以牺牲低优先级业务通信质量为代价,保证了高优先级分组的低时延和高可靠性。最后,通过仿真验证了 PAJ_MAC 协议自适应抖动机制的有效性和建模分析的准确性。

参考文献:

[1] COLLINS R. Tactical targeting network technology (TTNT) communicating at the speed of battle [EB/OL]. [2015-03-15]. <http://www.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf.7501.pdf>.
[2] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical mobile Ad Hoc networks [C]// Proceeding of the 14th European Wireless Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2008: 1-6.
[3] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.
[4] FALLAH Y P, HUANG C L, SENGUPTA R, et al. Analysis of information dissemination in vehicular Ad-hoc networks with application to cooperative vehicle

(下转第 150 页)