

一种航空自组网中带差分服务的跳频 MAC 协议建模*

王叶群, 杨峰, 黄国策, 张衡阳, 郭建新

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

通讯作者: 王叶群, E-mail: wangyequnhao@163.com

摘要: 针对军事航空通信中部分信息传输对时效性和可靠性的严格要求以及传播时延不可忽略的问题, 提出一种基于 Turbo 编码、猝发技术、异步跳频和优先级区分的媒体接入控制协议(PFH_MAC). 通过为高、低两种优先级分组提供不同的排队策略和接入网络权限, 以提供差分服务能力. 运用 Markov 建模、排队理论、组合理论和离散 Laplace 变换得到系统各项性能的数学表达式. 仿真结果验证了理论推导的准确性及差分服务机制的有效性.

关键词: 航空通信; 跳频; 自组织网络; 媒体接入控制协议; 差分服务

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

中文引用格式: 王叶群, 杨峰, 黄国策, 张衡阳, 郭建新. 一种航空自组网中带差分服务的跳频 MAC 协议建模. 软件学报, 2013, 24(9): 2214-2225. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4335.htm>

英文引用格式: Wang YQ, Yang F, Huang GC, Zhang HY, Guo JX. Media access control protocol with differential service in aeronautical frequency-hopping ad hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(9): 2214-2225 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4335.htm>

Media Access Control Protocol with Differential Service in Aeronautical Frequency-Hopping Ad Hoc Networks

WANG Ye-Qun, YANG Feng, HUANG Guo-Ce, ZHANG Heng-Yang, GUO Jian-Xin

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Corresponding author: WANG Ye-Qun, E-mail: wangyequnhao@163.com

Abstract: According to the strict demands of timeliness and reliability during military aeronautical communications, and the question of whether propagation delay could not be ignored, a media access control protocol based on Turbo coding, burst technology, asynchronous frequency hopping and priority differentiation (PFH MAC) is proposed. It realizes differential service by providing different queuing strategies and accessing network authority for the high and low priority packets. All of the protocol performance expressions are deduced by Markov model, queuing theory, combination theory and discrete Laplace transformation. The simulation results verify that this theoretical analysis is accurate and the differential service is effective.

Key words: aeronautical communication; frequency-hopping; ad hoc network; media access control protocol; differential service

自组织网络以其部署简单、组网灵活、易于扩展、鲁棒性强等优点, 在公共交通^[1]、无线局域网^[2]、传感器网络^[3,4]、水声通信^[5]等领域得到广泛应用.

把自组织网络引入航空通信, 有助于建立一个快速、高效、抗毁性强的空中信息平台^[6-11]. 如美国海军研究办公室委托美国加州大学洛杉矶分校进行的 Minuteman 项目开发^[6]、美国国防部高级研究计划局和空军研究实验室委托 Rockwell Collins 公司开发的战术网络瞄准技术(TTNT)^[7]等.

军事航空通信中, 传输的信息粗略可分为两种: 一是对时延要求为 ms 级的作战指令、武器控制信息, 这类信息数量少, 但时效性和可靠性要求非常高; 二是对时延要求为 10ms 级甚至 100ms 级的态势信息, 与第 1 类信息

* 基金项目: 国家自然科学基金(61202490); 国防科技重点实验室基金(9140C020102110C0207)

收稿时间: 2012-06-15; 定稿时间: 2012-10-24

相比,数量非常大,对吞吐量的要求比对可靠性的要求还要高。

航空自组网属于无线自组网的一种特殊应用,具有自身的独特性^[12]:大尺度的分布场景、高动态的三维拓扑结构、不稳定的信道质量、稀疏的节点分布等。这些独特性导致地面自组网中各种成熟的技术无法直接应用到航空通信中,现有文献针对其独特性进行的研究主要集中在网络的连通性分析^[13]和路由协议^[14]方面,但媒体接入控制(media access control,简称 MAC)协议才是影响信息时延的最重要因素^[15,16]。

现有航空通信中的 MAC 协议可分为 3 类:

(1) 以 TDMA(time division multiple address)及其改进型^[15]为代表的时隙分配协议,系统吞吐量,但时隙大小的设置需要考虑最大传播时延和时延抖动的影响,仅适合于时延要求 $\geq 10\text{ms}$ 级信息的传输。

(2) 以 IEEE 802.11 分布式协调功能(distributed coordination function,简称 DCF)^[17]及其改进型为代表的时隙预约协议,节点在发送分组之前,需要通过 RTS/CTS(ready-to-send/clear-to-send)控制帧的交互来预约时隙,以避免不同节点间分组的碰撞,但控制帧来回交互引入的传播时延严重影响信息时效性,也不适合于航空通信^[18]。

(3) TTNT 网络采用以 CSMA 和异步跳频机制为基础的 SPMA(statistical priority based media access)协议^[7],不需要为节点预先分配时隙或预约时隙,只需根据网络忙闲程度决定分组是否接入网络,可将 500km 范围内 400bits 分组的端到端时延控制在 2ms 内。与其他带控制信道的多信道 MAC 协议^[19]相比,SPMA 由于不需要预约信道和时隙,时效性得到保证。

在采用 SPMA 协议的航空通信系统中,随着业务量的增加,不同节点的突发发生碰撞的概率随之加大,从而影响系统的吞吐量、分组成功传输概率等性能,但文献[7]在分析协议性能时没有考虑这个因素;另外,文献[7]提出通过为不同的业务设置不同的接入网络权限来实现差分服务的功能,但没有给出权限阈值的设置方法。

本文借鉴 SPMA 协议通过跳频通信实现多用户同时通信的思想,运用 Markov 理论^[20-22]、排队理论^[14]、组合理论和离散 Laplace 变换方法,构建模型研究 PFH_MAC 协议的各项性能。

1 协议描述

1.1 假设条件

- 1) 所有节点(包括空中和地面节点)在 $L \times L \times H$ 范围内随机分布,且构成一个全连通的自组织网络;
- 2) 每个节点有 1 个发射通道和与频点数相等的接收通道,发送分组时接收通道不阻塞;
- 3) 各节点地位对等,源端产生高、低两种优先级分组,所有分组具有相同的长度和传输速率;
- 4) 高优先级分组到达率远小于低优先级分组到达率;
- 5) 高优先级分组有严格的时效性和可靠性要求;
- 6) 到达缓冲区的分组按照高低优先级顺序排队,同一优先级分组按照 FIFO 顺序排队;
- 7) 分组接入网络时,先拆分为若干个突发,并为每个突发随机选择频点。

1.2 基本思想

差分服务机制需要满足 3 点要求:

- 1) 通过抢占式排队机制和 ALOHA 接入方式保证高优先级分组的时效性;
- 2) 通过限制低优先级分组接入网络的数量,使网络处于轻负载状态,以保证高优先级分组的可靠性;
- 3) 确保要求 1)、要求 2)满足的情况下,最大化系统吞吐量。

1.3 基本原则

- 1) 发送缓冲区内的分组按照抢占式规则排队;
- 2) 高优先级分组到达发送缓冲区时,如果队列已满且队尾是高优先级分组,则丢弃新到达分组;如果队列已满且队尾是低优先级分组,则丢弃队尾分组后插入新到达分组;
- 3) 低优先级分组到达发送缓冲区时,如果队列已满则丢弃新到达分组;否则,置于队列尾部;
- 4) 网络忙闲程度统计方法:设当前时刻为 t_0 ,定义时间 $(t_0-1, t_0]$ 内网络中的分组数量为网络忙闲程度值;

- 5) 高优先级分组到达发送缓冲区队首时,立即接入网络;
- 6) 低优先级分组到达发送缓冲区队首时,检测当前网络忙闲程度值,如果该值低于网络忙闲程度阈值,则立即接入网络;如果该值高于等于阈值,则退避一段时间后再次检测网络忙闲程度值,直到该值低于阈值时接入网络,单次退避时长等于一个分组的传输时间.

1.4 状态转移过程

PFH_MAC 协议状态转移如图 1 所示.

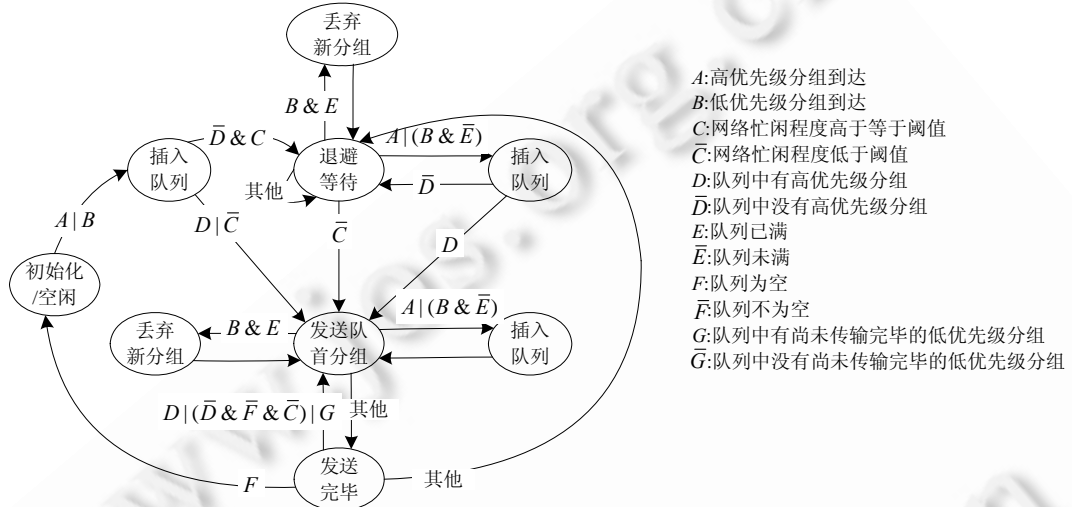


Fig.1 State transition diagram of PFH_MAC

图 1 PFH_MAC 协议状态转移图

网络中所有节点均按照如图 1 所示的状态转移策略工作.

从初始化/空闲状态开始,若收到来自上层的分组,按照排队规则插入发送缓冲区队列,如果队首为高优先级分组,或者队首为低优先级分组且网络忙闲程度低于阈值,则立即进入发送队首分组状态;如果队首为低优先级分组且网络忙闲程度高于等于阈值,则进入退避等待状态.

节点在退避等待过程中,如果收到来自上层的分组,按照排队规则插入发送缓冲区队列,当队首为高优先级分组时,立即进入发送队首分组状态;否则继续退避等待,直到网络忙闲程度低于阈值时进入发送队首分组状态.

在发送队首分组过程中,如果正在传输的是低优先级分组,且此时有新的高优先级分组到达,则暂停正在传输的低优先级分组,改为传输新到达的高优先级分组.

队首分组发送完毕后进入发送完毕状态,如果队列为空,进入初始化/空闲状态.如果队首是高优先级分组,或者队首为尚未传输完毕的低优先级分组,或者队首是低优先级分组且网络忙闲程度低于阈值时,立即进入发送队首分组状态;如果队首是低优先级分组且网络忙闲程度高于等于阈值,进入退避等待状态.

2 建模分析

2.1 相关参数

λ_1 :单个节点高优先级分组到达率,单位 packets/s;

λ_2 :单个节点低优先级分组到达率,单位 packets/s;

n :节点数量; K :发送缓冲区大小; L_{packet} :分组长度,单位 bits;

$V_{channel}$:信道传输速率,即分组经过信道编码后,在信道中传输的速率,单位 bits/s;

$N_{frequency}$:跳频点数; η_{turbo} :采用 Turbo 信道编码,效率为 η_{turbo} ;
 T_{packet} :分组传输时延,取值 $T_{packet}=L_{packet}/\eta_{turbo}/V_{channel}$;
 N_{burst} :每个分组拆分成 N_{burst} 个突发后发送; c :光速,取值 $c=3\times 10^8$,单位 m/s;
 M_{burst} :对于拆分为 N_{burst} 个突发的分组,若收端成功接收 M_{burst} 及以上个突发,可解析出完整分组;
 P_{Right1} :高优先级分组成功传输概率的最低要求; λ'_{valve} :网络忙闲程度阈值,单位 packets/s.

2.2 分组交叠碰撞模型

假设 1. 接入网络后的分组在时间间隔上服从负指数分布,参数为 λ' .

取网络中任意分组为当前分组,该分组可能与之前和之后若干分组在时间上交叠,从而受到干扰,分组交叠示意如图 2 所示.

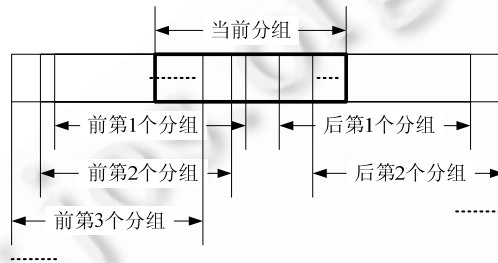


Fig.2 Schematic diagram of packets collision

图 2 分组交叠示意图

将当前分组之后(或之前)的第 i 个分组记为 $B_i, i=1,2,3,\dots$,相邻两分组时间间隔的概率密度用矢量

$$\varphi = [\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \dots \varphi_{N_{burst}} \varphi_\infty]$$

表示,其中, $\varphi_i, i \in [1, N_{burst}]$ 表示两相邻分组间隔时间为 $((i-1) \cdot T_{burst}, i \cdot T_{burst})$ 的概率, φ_∞ 表示两相邻分组间隔时间为 (T_{packet}, ∞) 的概率,有

$$\varphi_i = \begin{cases} e^{-\lambda' \cdot (i-1) \cdot T_{burst}} - e^{-\lambda' \cdot i \cdot T_{burst}}, & i \in [1, N_{burst}] \\ e^{-\lambda' \cdot T_{packet}}, & i = \infty \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

定义 $g(i, k), i \in [0, N_{burst}], k \in [0, N_{burst}]$, 表示当前分组有 i 个突发与其他分组交叠在一起,由于受其他分组的影响,当前分组有 k 个突发出错的概率.

定义 $I_i(k), k \in [0, N_{burst}], i=1,2,3,\dots$, 表示当前分组由于受 B_i 分组的影响,有 k 个突发受到干扰的概率.

步骤 1. B_1 对当前分组的影响.

定义 $I_{1,i}(k), i \in [1, \infty]$, 表示两分组间隔时间为 $((i-1) \cdot T_{burst}, i \cdot T_{burst})$ 时,当前分组由于受 B_1 分组的影响,有 k 个突发出错的概率,简写为 $I_{1,i}$, 易得表达式:

$$I_{1,i} = \begin{cases} g(N_{burst} - i + 1, k), & i \in [1, N_{burst}] \\ g(0, k), & i \in [N_{burst} + 1, \infty] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

由于受 B_1 分组的影响,当前分组被干扰突发数量的概率密度函数为

$$I_1 = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_{N_{burst}} \varphi_\infty] \cdot [I_{1,1} I_{1,2} \dots I_{1,N_{burst}} I_{1,\infty}]^T \quad (3)$$

步骤 2. 假设由于受 B_j 分组的影响,当前分组被干扰突发数量的概率密度函数为 I_j , 求取 B_{j+1} 分组对当前分组影响.

B_{j+1} 分组对当前分组的干扰,受到 B_j, B_{j+1} 两分组时间间隔的影响,两分组相距越近, B_{j+1} 分组对当前分组的干扰越强.

定义 $I_{j+1,i}(k), i \in [1, \infty]$, 表示 B_j, B_{j+1} 两分组间隔时间为 $((i-1) \cdot T_{burst} + i \cdot T_{burst})$ 时, 当前分组由于受 B_{j+1} 分组的影响, 有 k 个突发出错的概率, 简称为 $I_{2,i}$, 易得表达式:

$$I_{j+1,i} = \begin{cases} \left[\sum_{q=0}^{q=i} I_j(q) I_j(1+i) \dots I_j(N_{burst}) 0 \dots 0 \right], & i \in [1, N_{burst} - j] \\ g(0, k), & i \in [N_{burst} - j + 1, \infty] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

由于受 B_{j+1} 分组的影响, 当前分组被干扰突发数量的概率密度函数为

$$I_{j+1} = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_{N_{burst}} \varphi_{\infty}] \cdot [I_{j,1} I_{j,2} \dots I_{j,N_{burst}} I_{j,\infty}]^T \quad (5)$$

步骤 3. $g(N_{burst}-i, k)$ 的求解.

$g(N_{burst}-i, k)$ 表示当前分组有 $N_{burst}-i$ 个突发与其他分组相交叠, 其中有 k 个受到干扰的概率.

当前分组与其他分组突发交叠示意如图 3 所示.



Fig.3 Schematic diagram of bursts collision

图 3 突发交叠示意图

从图 3 可以看出, 当前分组有 $N_{burst}-1$ 个突发与其他分组交叠时, 这些突发中受到其他分组 1 个突发干扰的本分组突发为 1 个, 如编号为 $N_{burst}-1$ 的突发, 该突发受干扰的概率为

$$\varphi_1 = 1/N_{frequency} \quad (6)$$

受到其他分组 2 个突发干扰的本分组突发为 $N_{burst}-i-1$ 个, 该突发受干扰的概率为

$$\varphi_2 = 2/N_{frequency} - (1/N_{frequency})^2 \quad (7)$$

则有

$$g(N_{burst} - i, k) = C_{N_{burst}-i-1}^k (1-\varphi_1) \cdot \varphi_2^k \cdot (1-\varphi_2)^{N_{burst}-i-1-k} + C_{N_{burst}-i-1}^{k-1} \varphi_1 \cdot \varphi_2^{k-1} \cdot (1-\varphi_2)^{N_{burst}-i-k}, i, k \in [0, N_{burst}] \quad (8)$$

2.3 组合理论

利用组合理论计算当前分组之后和之前共 $2j_{max}$ 个分组对当前分组的影响.

定理 1. 对于由 N_{burst} 个突发组成的分组, 由于受两种因素的影响, 被干扰突发数量的概率密度函数分别为 $I_1(k), I_2(k)$, 可得分组受两种因素影响的并集:

$$I'(k) = \sum_{i=[k/2]+1}^k \sum_{j=k-i}^{i-1} P\{I_1(k) = i\} P\{I_2(k) = j\} \frac{C_i^{i+j-k} C_{N_{burst}-i}^{k-i}}{C_{N_{burst}}^j} + \sum_{i=[k/2]+1}^k \sum_{j=k-i}^{i-1} P\{I_2(k) = i\} P\{I_1(k) = j\} \frac{C_i^{i+j-k} C_{N_{burst}-i}^{k-i}}{C_{N_{burst}}^j} + \sum_{i=[k/2]}^k P\{I_1(k) = i\} P\{I_2(k) = i\} \frac{C_i^{2i-k} C_{N_{burst}-i}^{k-i}}{C_{N_{burst}}^i}, k \in [0, N_{burst}] \quad (9)$$

根据定理 1, 可计算当前分组受干扰突发数量的概率密度函数:

$$I(\lambda', k) = f(I_1, I_2, \dots, I_{j_{max}}), k \in [0, N_{burst}] \quad (10)$$

其中, j_{max} 为满足公式 $f(I_1, I_2, \dots, I_j) = f(I_1, I_2, \dots, I_{j+1})$ 时 j 的最小值. 接入网络的任意分组由于受其他分组的影响, 被干扰突发数量的概率密度函数均可以通过公式(10)表示.

2.4 高优先级分组排队模型

由于采用抢占式排队机制, 所以高优先级分组排队等待和传输过程不受低优先级分组的影响, 可以用 M/G/1/K 排队模型进行分析. 由于高优先级分组数量较少, 可不考虑因缓冲区溢出而丢弃的分组, 则单位时间内

接入网络的高优先级分组数量期望值为 $\lambda'_1 = \lambda_1$.

2.5 网络忙闲程度阈值

网络忙闲程度阈值的设置,目的是通过限制低优先级分组的接入,使得网络处于轻负载工作状态,来达到维持高优先级分组高可靠性的要求.

定义 P_{right_in} 为接入网络分组的成功传输概率,表示成功传输的分组数量占接入网络分组数量的比例,不考虑因缓冲区溢出而丢弃的分组.

定义 P_{right1} 为高优先级分组的成功传输概率,根据第 2.4 节的分析,其值等于 P_{right_in} ,满足表达式:

$$P_{right1} = P_{right_in} = \sum_{k=0}^{N_{burst} - M_{burst}} I(\lambda', k) \tag{11}$$

当分组长度 L_{packet} 、信道速率 $V_{channel}$ 、频点数量 $N_{frequency}$ 、分组拆分突发个数 N_{burst} 、Turbo 编码效率 η_{turbo} 确定的情况下, P_{right1} 与 λ' 呈递减关系,则存在使得高优先级分组成功传输概率满足要求的 λ' 最大值,即为网络忙闲程度阈值 V'_{valve} .

例如,当信道速率 $V_{channel}=3e6(\text{bps})$,分组拆分突发个数 $N_{burst}=25$, $\eta_{turbo}=1/3$ 时,不同分组长度、不同频点数量时, P_{right1} 与 λ' 的关系曲线如图 4 所示.

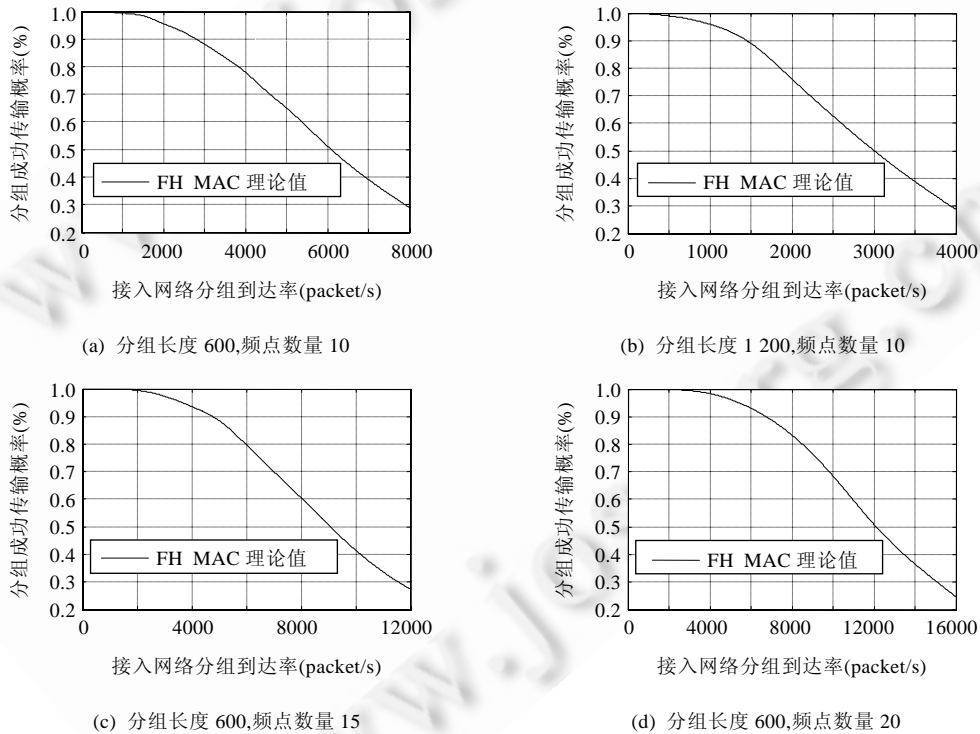


Fig.4 Relationship between successful transmission probability of higher priority packets and packet arrival rate
图 4 高优先级分组成功传输概率与接入网络分组到达率的关系图

从图 4 可以看出,假设高优先级分组成功传输概率要求为 95%,则接入网络分组到达率的界限取值如图 5 所示.

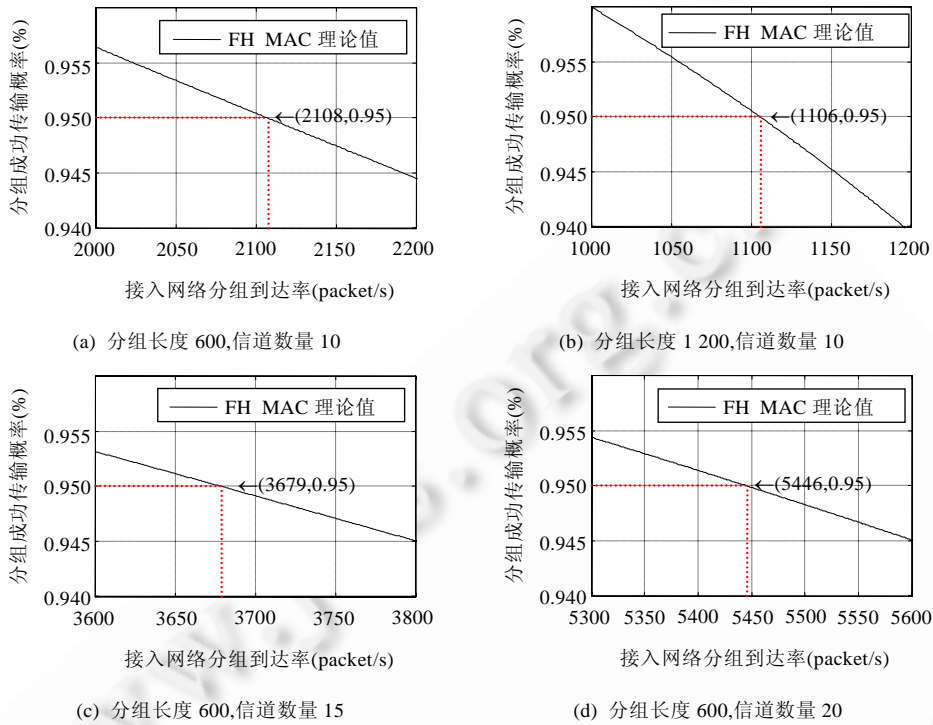


Fig.5 Threshold of network busy degree
图 5 网络忙闲程度阈值

从图 5(a)可以看出,当接入网络分组到达率 $\leq 2108(\text{packets/s})$ 时,高优先级分组成功传输概率能达到 $\geq 95\%$ 的要求,即网络忙闲程度阈值 $\lambda'_{valve} = 2108$.

同理,从图 5(b)~图 5(d)可以看出,当接入网络分组到达率 $\leq 1106, 3679, 5446(\text{packets/s})$ 时,高优先级分组成功传输概率能达到 $\geq 95\%$ 的要求,即网络忙闲程度阈值 λ'_{valve} 分别为 1 106, 3 679, 5 446.

2.6 低优先级分组排队模型

对于单个节点,如果将从上层到达节点的分组看作系统的顾客,节点处理低优先级数据分组看作排队系统的服务台为顾客提供服务,那么该过程就是一个典型的排队系统;由于分组到达服从泊松分布,分组服务时间服从常数分布,服务台数量为 1,发送缓冲区大小为 K ,可用 $M/G/1/K$ 排队模型进行求解.

定义 $p_k, k \in [0, K]$ 为稳态情况下发送缓冲区有 k 个低优先级分组(包括排队等待的分组和正在接受服务的分组)的概率, η_k 为稳态情况下有一个低优先级分组离开发送缓冲区时缓冲区中有 k 个低优先级分组的概率, X_k 为第 k 个低优先级分组离开缓冲区时系统中的低优先级分组个数, $b_{i,j}, i \in [0, K-1], j \in [0, K-1]$ 为一个低优先级分组离开发送缓冲区时缓冲区中低优先级分组个数由 i 个转为 j 个的概率,则随机过程 X_k 构成一个离散时间马尔可夫链,状态转移过程如图 6 所示.

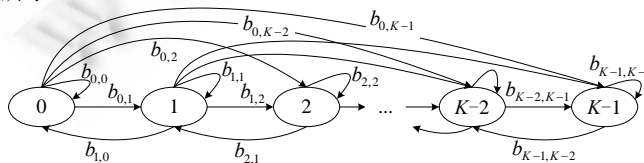


Fig.6 State transition diagram of X_k

图 6 马尔可夫过程 X_k 的状态转移图

定义 a_k 为在一个低优先级分组的服务过程中从上层到达 k 个高优先级分组的概率, b_k 为在一个低优先级分组的服务过程中从上层到达 k 个低优先级分组的概率, 由于高优先级分组数量较少, 可以忽略一个低优先级分组服务过程中到达两个及以上个高优先级分组的情况, X_k 的状态转移矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & b_2 & \cdots & b_{K-3} & b_{K-2} & 1 - \sum_{j=0}^{K-2} b_j \\ b_0 & b_1 & b_2 & \cdots & b_{K-3} & a_0 \cdot b_{K-2} + a_1 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^{K-3} b_j\right) & a_0 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^{K-2} b_j\right) \\ 0 & b_0 & b_1 & \cdots & b_{K-4} & a_0 \cdot b_{K-3} + a_1 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^{K-4} b_j\right) & a_0 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^{K-3} b_j\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & b_0 & a_0 \cdot b_1 + a_1 \cdot (1 - b_0) & a_0 \cdot \left(1 - \sum_{j=0}^1 b_j\right) \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_0 \cdot b_0 + a_1 & a_0 \cdot (1 - b_0) \end{bmatrix} \quad (12)$$

设 T_{server} 为单个低优先级分组服务时间的期望值, 即一个低优先级分组从到达发送缓冲区队首开始到发送完毕为止所消耗的时间, $E[T_{server}]$ 为 T_{server} 的期望值, 则 a_k 和 b_k 可表示为

$$\begin{cases} a_k = (\lambda_1 \cdot E[T_{server}])^k \cdot e^{-\lambda_1 \cdot E[T_{server}]} / k!, & k = 0, 1 \\ b_k = (\lambda_2 \cdot E[T_{server}])^k \cdot e^{-\lambda_2 \cdot E[T_{server}]} / k!, & k \in [0, \infty) \end{cases} \quad (13)$$

系统的业务强度为

$$\rho = \lambda_1 \cdot E[T_{server}] \quad (14)$$

设矢量 $\eta = [\eta_0 \ \eta_1 \ \dots \ \eta_{K-1}]$, 有:

$$\eta \cdot P = \eta \quad (15)$$

$$\sum_{k=0}^{K-1} \eta_k = 1 \quad (16)$$

根据 $M/G/1/K$ 排队理论, 有:

$$p_k = \begin{cases} \eta_k / (\eta_0 + \rho), & k \in [0, K-1] \\ 1 - 1 / (\eta_0 + \rho), & k = K \end{cases} \quad (17)$$

由公式(14)~公式(17)得知, 要获取 $p_k, k \in [0, K]$ 的值, 需先求解 $E[T_{server}]$ 的值. 队列中, 低优先级分组数量不为空的概率为 $1 - p_0$, 此时, 平均 $E[T_{server}]$ 长时间内会有 1 个低优先级分组接入网络, 则单位时间内低优先级分组接入网络数量的期望值为

$$\lambda'_2 = (1 - p_0) / E[T_{server}] \quad (18)$$

接入网络分组到达率应尽量接近网络忙闲程度阈值, 即

$$\min(\lambda'_{valve} - \lambda'_1 - \lambda'_2) \quad (19)$$

在公式(14)~公式(17)式的基础上, 联合公式(18)、公式(19), 可求取 $p_k, k \in [0, K], \lambda'_2, E[T_{server}]$ 的值.

3 性能分析

3.1 分组成功传输概率

根据公式(11), 接入网络分组的成功传输概率为

$$P_{right_in} = \sum_{k=0}^{N_{burst} - M_{burst}} I(\lambda', k) \quad (20)$$

由于高优先级分组数量较少, 可忽略因缓冲区溢出而丢弃的分组, 其成功传输概率为

$$P_{right1} = P_{right_in} = \sum_{k=0}^{N_{burst} - M_{burst}} I(\lambda', k) \quad (21)$$

低优先级分组接入网络的分组数量占源端低优先级总分组数量的比例为 $\lambda'_2 / (n \cdot \lambda_2)$, 其成功传输概率为

$$P_{right2} = \frac{\lambda'_2}{n \cdot \lambda_2} \cdot P_{right_in} = \frac{\lambda'_2}{n \cdot \lambda_2} \cdot \sum_{k=0}^{N_{burst}-M_{burst}} I(\lambda', k) \tag{22}$$

3.2 系统吞吐量

系统吞吐量是单位时间内系统正确传输的高、低优先级分组比特数之和,表达式为

$$S_{total} = (\lambda'_1 + \lambda'_2) \cdot L_{packet} \cdot P_{right_in} = (\lambda'_1 + \lambda'_2) \cdot L_{packet} \cdot \sum_{k=0}^{N_{burst}-M_{burst}} I(\lambda', k) \tag{23}$$

3.3 分组端到端时延均值

定义:从分组到达发送缓冲区开始,到分组被接收方正确接收为止,所消耗时间的总和.不包括因发送缓冲区溢出而丢弃的分组和因交叠碰撞干扰而无法解码的分组.

3.3.1 高优先级分组

对于高优先级分组,由于数量少且采用抢占式接入网络方式,分组端到端时延仅由传输时延和传播时延两部分组成.

设 $g(i)$ 为分组传播时延为 $i \cdot T_{packet}$ 的概率,考虑到节点分布范围的高度 H 远小于长度和宽度 L ,为简化计算复杂度,以 $\sqrt{L^2 + H^2}/2 \times \sqrt{L^2 + H^2}/2$ 平面范围内 40 个节点均匀分布时的分组传播时延作为 $g(i)$ 的时延,则容易得到传播时延的概率生成函数 $G(z)$.

根据留数定理,可得高优先级分组端到端时延均值的期望值为

$$E[W_1] = \sum_{j=0}^{\lceil \sqrt{L^2 + H^2}/2 / c / T_{packet} \rceil} (jT_{packet}) \frac{1}{2\pi i} \oint_c G(z) z^{j-1} dz + T_{packet} \tag{24}$$

3.3.2 低优先级分组

对于低优先级分组,端到端时延由分组服务时间、传播时延和排队等待时延 3 部分组成.

分组服务时间的期望值为 $E[T_{server}]$,传播时延与低优先级分组的传播时延相同.排队等待时延 T_{queue} 受到发送缓冲区中低优先级分组数量的影响,当缓冲区中低优先级分组数量为 i 时,对应的排队等待时延为 $i \cdot T_{server}$.

设 p'_k 为接入网络的低优先级分组中到达发送缓冲区时队列中低优先级分组数量为 k 的概率,有

$$p'_k = p_k / (1 - p_K), k \in [0, K - 1] \tag{25}$$

根据表 1 和公式(25),可得低优先级分组排队等待时延的期望值为

$$E[T_{queue}] = \sum_{k=0}^{K-1} p'_k \cdot k \cdot E[T_{server}] = \sum_{k=0}^{K-1} k \cdot E[T_{server}] \cdot p_k / (1 - p_K) \tag{26}$$

根据留数定理,可得低优先级分组端到端时延均值的期望值为

$$E[W_2] = \sum_{j=0}^{\lceil \sqrt{L^2 + H^2}/2 / c / T_{packet} \rceil} (jT_{packet}) \frac{1}{2\pi i} \oint_c G(z) z^{j-1} dz + E[T_{server}] + E[T_{queue}] \tag{27}$$

Table 1 Simulation parameters

表 1 仿真参数

参数	数值
分组长度(L_{packet})	600bits
单个节点高优先级分组到达率(λ_1)	5packets/s
节点分布范围的最大长度和宽度(L)	250km
节点分组范围的最大高度(H)	10km
信道传输速率($V_{channel}$)	3e6bps
节点数量(n)	50
发送缓冲区大小(K)	5
跳频点数($N_{frequency}$)	10
Turbo 编码效率(η_{turbo})	1/3
单个分组拆分后的突发个数(N_{burst})	25
能解码出完整分组的最少突发个数(M_{burst})	13
高优先级分组成功传输概率要求(P_{Right})	≥ 0.95

4 仿真分析

采用 OPNET 网络仿真工具,仿真条件:所有节点在 $\sqrt{L^2 + H^2}/2 \times \sqrt{L^2 + H^2}/2$ 的单跳通信范围内呈随机分布,且每个节点随机选择目的节点进行通信,其中, L 取值 250km, H 取值 10km;信道理想无误码;各节点均按照泊松分布接收来自上层的高、低两种优先级分组,高优先级分组到达率 λ_1 固定为 5packets/s,低优先级分组到达率 λ_2 从 0~4000packets/s 不断增加;发送缓冲区只能容纳 5 个分组,所有分组遵循高低优先级顺序和“抢占式”规则排队;分组接入信道前,先拆分为等长的 25 个突发,每个突发从 10 个频点库中随机选择频率.以 FH_MAC 表示不支持差分服务能力的跳频媒体接入控制协议,FH_MAC 和 PFH_MAC 的仿真参数取值见表 1.

根据网络忙闲程度阈值的计算方法,得 $\lambda'_{valve}=2108\text{packets/s}$.

定义业务负载为源端产生的高、低优先级分组到达率之和.

在业务负载不同的情况下,FH_MAC 仿真值、PFH_MAC 仿真值和理论值的性能曲线如图 7 所示.

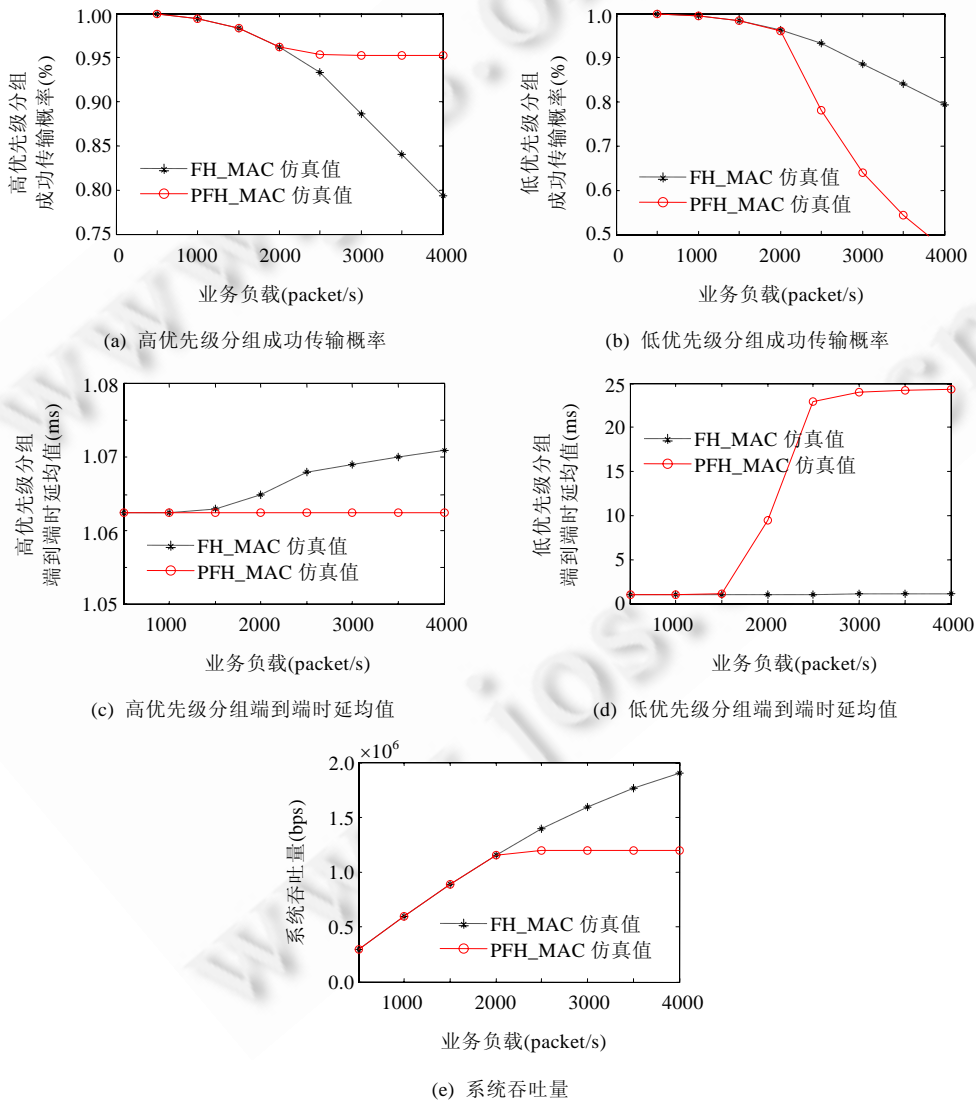


Fig.7 Performance graph of PFH_MAC protocol

图 7 PFH_MAC 协议性能曲线图

从图 7 可以看出,PFH_MAC 的系统吞吐量、高/低优先级分组成功传输概率、高/低优先级分组端到端时延均值的理论计算结果与仿真结果一致,验证了建模分析的正确性.从图 7(a)中 PFH_MAC 仿真值曲线可以看出:当业务负载低于 2108packets/s 时,高优先级分组成功传输概率>95%;当业务负载大于等于 2108packets/s 时,高优先级分组成功传输概率 \approx 95%.从图 7(a)、图 7(b)可以看出:当业务负载小于 2108packets/s 时,PFH_MAC 的高、低优先级分组成功传输概率与 FH_MAC 一致;当业务负载大于等于 2108packets/s 时,PFH_MAC 高优先级分组成功传输概率优于 FH_MAC,PFH_MAC 低优先级分组成功传输概率低于 FH_MAC.从图 7(e)可以看出:当业务负载小于 2108packets/s 时,PFH_MAC 的系统吞吐量与 FH_MAC 一致;当业务负载 \geq 2108packets/s 时,PFH_MAC 的系统吞吐量低于 FH_MAC.从图 7(c)、图 7(d)可以看出:PFH_MAC 高优先级分组端到端时延均值略大于 1ms,等于分组传输时延和传播时延之和;当业务负载接近 2108packets/s 时,PFH_MAC 低优先级分组端到端时延均值急剧上升到 20ms 以上.

结论:(1) PFH_MAC 的理论计算结果与 OPNET 仿真结果一致,说明了建模分析的正确性;(2) PFH_MAC 通过为低优先级分组设置接入网络权限,以降低低优先级分组成功传输概率、系统吞吐量和时效性为代价,保证了高优先级分组成功传输概率的要求.

5 结束语

为航空跳频网络提出一种具有差分服务支持能力的媒体接入控制协议 PFH_MAC,并借鉴 IEEE 802.11 DCF 协议研究过程中的 Markov 模型、排队理论,构建模型分析 PFH_MAC 的系统吞吐量、高/低优先级分组成功传输概率、高/低优先级分组端到端时延均值的性能表达式.通过和 OPNET 仿真结果相比,验证了所提出模型的准确性;同时,仿真结果证实了 PFH_MAC 的差分服务能力.

与 FH_MAC 协议相比,PFH_MAC 协议通过为高、低优先级分组提供差分服务来保证高优先级分组的可靠性.但从图 7(e)的仿真结果看出,当业务负载较高时,PFH_MAC 协议的系统吞吐量低于 FH_MAC 协议且趋于饱和.如何在提供差分服务的同时尽量提高系统的吞吐量,将是下一步研究中需要解决的问题.

References:

- [1] Fallah YP, Huang CL, Sengupta R, Krishnan H. Analysis of information dissemination in vehicular ad-hoc networks with application to cooperative vehicle safety systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011,60(1):233–247.
- [2] Badruddoza A, Namboodiri V, Jaggi N. On the energy efficiency of cognitive radios—A study of the ad hoc wireless LAN scenario. In: *Proc. of the IGCC*. IEEE Press, 2011. 1–8.
- [3] Luo RC, Chen O. Mobile sensor mode deployment and asynchronous power management for wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012,59(5):2377–2385.
- [4] Liu YL, Pu JH, Fang WW, Xiong Z. A MAC layer optimization algorithm in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Computers*, 2012,35(3):529–539 (in Chinese with English abstract).
- [5] Diamant R, Lampe L. Spatial reuse time-division multiple access for broadcast ad hoc underwater acoustic communication networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011,36(2):172–185.
- [6] Gerla M, Xu KX. Minuteman: Forward projection of unmanned agents using the airborne Internet. In: *Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Big Sky*: IEEE Press, 2002. 2715–2725.
- [7] Herder JC, Stevens JA Method and architecture for TTNT symbol rate scaling modes. *Int Cl: H04J3/22 US Pat 7 839 900 B1*. 2010.
- [8] Broyles D, Jabbar A, Sterbenz JPG. Design and analysis of a 3-D Gauss-Markov mobility model for highly dynamic airborne networks. In: *Proc. of the Int'l Telemetering Conf. (ITC 2010)*. San Diego: IEEE Press, 2010. 1–10.
- [9] Karras K, Kyritsis T, Amirfeiz M, Baiotti S. Aeronautical mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 14th European Wireless Conf. Hong Kong*: IEEE Press, 2008. 1–6.
- [10] Sakhaee E, Jamalipour A. The global in-flight Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006,24(9): 1748–1757.
- [11] Schnell M, Scalise S. NEWSKY—Concept for networking the sky for civil aeronautical communications. *IEEE A&E Systems Magazine*, 2007,22(5):25–29.

- [12] Bowers RM, Mccubbin IB, Hallar AG, Fierer N. Seasonal variability in airborne bacterial communities at a high-elevation site. *Atmospheric Environment*, 2012,50:41–49. [doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.005]
- [13] Zheng B, Huang GC, Zhang HY. Link dynamics in three-dimensional mobile ad hoc networks, *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011,33(11):2605–2609 (in Chinese with English abstract).
- [14] Zhou JH, Lei L, Liu WK, Tian JM. A simulation analysis of nodes mobility and traffic load aware routing strategy in aeronautical ad hoc networks. In: *Proc. of the 9th Int'l Bhurban Conf. on Applied Sciences & Technology (IBCAST 2012)*. Islamabad: IEEE Press, 2012. 423–426.
- [15] Jang H, Kim E, Lee JJ, Lim J. Location-Based TDMA MAC for reliable aeronautical communications. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2012,48(2):1848–1854.
- [16] Bobarshad H, van der Schaar M, Aghvami AH, Dilmaghani RS, Shikh-Bahaei MR. Analytical modeling for delay-sensitive video over WLAN. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2012,14(2):401–414.
- [17] IEEE Std 802.11-2011. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2007.
- [18] Bauer C, Zitterbart M. A survey of protocols to support IP mobility in aeronautical communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011,13(4):642–657.
- [19] Zhang DS, Li JB, Guo LJ. Asynchronous multi-channel MAC protocols for WSNs. *Journal of Software*, 2012,23(3):613–628 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3984.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.03984]
- [20] Asha MM, Ambika A, Krishnaveni T. Analysis of PS protocols using Markov and cluster model in 802.11 WLANs. *Engineering Science and Technology*, 2012,2(2):298–305.
- [21] Gao SG. A Markov model for the IEEE 802.11 DCF under limit load. *Applied Mechanics and Materials*, 2011,48-49:29–33.
- [22] Chen HY. Revisit of the Markov model of IEEE 802.11 DCF for an error-prone channel. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12):1278–1280.

附中文参考文献:

- [4] 刘云璐,蒲菊花,方维维,熊璋.一种无线传感器网络 MAC 协议优化算法. *计算机学报*,2012,35(3):529–539.
- [13] 郑博,黄国策,张衡阳.三维移动 ad hoc 网络链路动态性能研究. *电子与信息学报*,2011,33(11):2605–2609.
- [19] 张德升,李金宝,郭龙江.异步多信道无线传感器网络 MAC 协议. *软件学报*,2012,23(3):613–628. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3984.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.03984]



王叶群(1985—),男,安徽安庆人,博士生,主要研究领域为航空自组织网络。
E-mail: wangyequnhao@163.com



张衡阳(1978—),男,博士,讲师,主要研究领域为航空自组织网络。
E-mail: hareed@163.com



杨峰(1975—),男,副教授,主要研究领域为军事通信网。
E-mail: yfhly@163.com



郭建新(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为跳频通信。
E-mail: guojianxin@163.com



黄国策(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为军事通信网。
E-mail: huangguoce@163.com