

一种基于突发技术的多信道 MAC 协议

刘鹏¹, 董淑福¹, 张衡阳¹, 温东², 张艳³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266071;

3. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

摘要: 针对军事航空自组网中实时通信对时延、传输可靠性的要求, 提出了一种基于突发技术的多信道 MAC 协议——BT-MAC。采用多信道、突发技术和异步跳频机制, 有效减少了分组端到端时延, 同时使系统具有一定的抗干扰能力。仿真结果表明, 理论分析与仿真值基本一致, 与 TDMA 协议相比较, 时延性能明显更优。

关键词: 航空自组网; 时延; 突发技术; 异步跳频

中图分类号: V243.1; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0064-04

A Multi-Channel MAC Protocol Based on Burst Technology

LIU Peng¹, DONG Shu-fu¹, ZHANG Heng-yang¹, WEN Dong², ZHANG Yan³

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China; 3. Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: A multi-channel MAC protocol based on burst technology (BT-MAC) was proposed according to the requirement of military aeronautical Ad Hoc network to the time delay and transmission reliability in real-time communication. By using the mechanism of multi-channel, burst technology and asynchronous frequency hopping, the time delay of packets was decreased effectively, and the system was provided with the capability of anti-jamming. Simulation shows that the theoretic analysis result is basically the same with the simulation result, and the time delay performance of BT-MAC is obviously better than that of TDMA.

Key words: aeronautical Ad Hoc network; time delay; burst technology; asynchronous frequency hopping

0 引言

近年来,随着对移动自组网研究的不断深入和拓展,其在航空通信中的应用得到越来越多的关注,并产生了一个全新的研究领域——航空自组网^[1](Aeronautical Ad Hoc Network, AANET)。航空自组网的基本思想是:一定范围内的航空飞行器之间相互转发控制指令信息,交换各自的飞行状态、感知信息等数据,并自动连接,建立起一个移动自组网^[2]。军事 AANET 能够大幅提高军事航空通信的抗毁能力以及远程作战保障能力,对其研究具有重要的理论研究和实际应用价值。

作为在无线通信网络协议栈中重要基础架构的 MAC 协议,决定着无线信道的使用方式,负责为用户

分配有限的无线通信资源,直接影响网络整体性能^[3],现有的航空通信网络中采用的主要有轮询多址和时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)两种方式。轮询系统^[4]是多个独立的信源共享一个传输信道的系统,系统由一个网控站和 N 个从属站构成,网控站负责按照顺序对每一个从属站进行询问,两站点间询问占用一定的呼叫应答时间,被询问的站点获得占用信道的机会。TDMA 的主要思想是:把时间划分成周期性的帧,每一帧再划分为若干个时隙,每个用户根据一定的规则只能在指定的时隙内发送。用户可以在每一帧占用一个时隙,若是在这个时隙上用户没有发送数据,这段时间就被浪费^[5]。可见,无论是轮询机制还是 TDMA 机制都需要较多的时间等待本节点的发送时隙,不能达到军事上的毫秒级的时延要求^[6]。

基于此,本文提出一种新的 MAC 协议——BT-MAC,为保证系统的可靠性和低时延,协议采用多信道机制^[7],可以同时为多个用户服务,减少了分组碰撞的概率。相比于单信道 MAC 协议,多信道 MAC 协议在增加网络吞吐量和减少时延等方面的性能均有较大提高。

收稿日期:2013-06-14

修回日期:2013-08-05

基金项目:国家自然科学基金(61202490);陕西省自然科学基金(2010JQ8010);国防预研基金(9140A06050610JBXX);航空科学基金(20095596016)

作者简介:刘鹏(1990—),男,安徽合肥人,硕士生,研究方向为航空自组网。

引入 Turbo^[8] 码技术,发送前对分组进行编码,增加一定的冗余,发送中即使丢失一部分数据包,在收端仍可以还原出整个分组,提高了系统的可靠性。采用突发^[9] 技术,将分组拆分成更小的单元,发送时利用时间上的随机跳变,增强了抗干扰的能力。引入异步跳频^[10] 机制,不需要节点之间的严格同步,分组到达即可接入网络,减少了时延,也进一步减少了被干扰的概率。

1 协议描述

运用排队论的知识,以任意一个节点为例,可将从应用层到达节点的分组视为顾客,将节点视为服务员,节点处理分组即服务员为顾客服务。分组的到达近似为无记忆的 Poisson 过程,服务规则是单服务员,分组长度相同,服务时间确定,系统的缓冲容量为 K ,那么节点和分组就构成了一个排队系统,可以对应 $M/D/1/K$ 的排队模型进行求解。设 a_i 为单个分组传输时间内到达 i 个分组的概率; π_i 为系统到达稳态时,任一个分组服务完后系统中的分组数为 i 的概率; p_i 为稳态时,任一时刻系统中分组数为 i 的概率; p_l 为稳态时,分组的丢失概率,其中, $0 \leq i \leq K-1$ 。

该模型对应 Markov 链的一步转移概率矩阵 M 为

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & \cdots & K-2 & K-1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ K-2 \\ K-1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & & & 1-\Sigma \\ a_0 & a_1 & a_2 & & & 1-\Sigma \\ 0 & a_0 & a_1 & & & 1-\Sigma \\ \vdots & & & & & \\ a_0 & a_1 & & & & 1-\Sigma \\ a_0 & & & & & 1-a_0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中, Σ 为该行其他元素之和。设 $\pi = [\pi_0 \ \pi_1 \ \cdots \ \pi_{K-1}]$,则在稳态下,可得

$$\begin{cases} \pi \cdot M = \pi \\ \sum_{i=0}^{K-1} \pi_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

根据 Poisson 分布可得

$$a_i = \frac{e^{-\rho} \cdot \rho^i}{i!}, \quad i=0,1,\dots \quad (3)$$

式中: ρ 为业务强度, $\rho = \lambda/\mu$, λ 为单个节点分组到达率, $1/\mu$ 为分组服务时间,由于分组到达缓冲区队首就立即发送,故分组服务时间与分组传输时间相等,即

$$1/\mu = T_p \quad (4)$$

根据排队理论可得

$$\begin{cases} \pi_i = \frac{p_i}{1-p_l} \\ p_l = \frac{\rho + \pi_0 - 1}{\rho} \end{cases} \Rightarrow p_l = \frac{\rho + \pi_0 - 1}{\rho + \pi_0} = 1 - \frac{1}{\rho + \pi_0} \quad (5)$$

在发送之前,首先对分组进行一定效率的 Turbo 编码,来提高系统传输可靠性;然后利用突发技术拆分分组,得到若干个等长的突发,使其在时间轴上一定幅度内随机地进行跳变发送;再利用异步跳频技术,在频点库确定的情况下,每个突发从频点库随机得到一个频点,并发送出去,期望与其他节点碰撞后仍可以恢复出丢失的突发。在发送的过程中,若是收到新的分组,则根据缓冲区状态决定是丢掉分组还是排队至队尾。

关于突发的频点选择和碰撞情况示意如图 1 所示,其中, f 表示频率。各突发等概率选择频点库里的任一频点,所以同一个分组的突发也可选择相同的频点。在时间轴上,若频点相同的突发出现交叠,即视为发生了碰撞。根据 Turbo 编码的原理,当编码效率为 $1/3$ 时,只要收端能够正确接收原数量 $1/2$ 以上的突发即可还原出完整的分组。

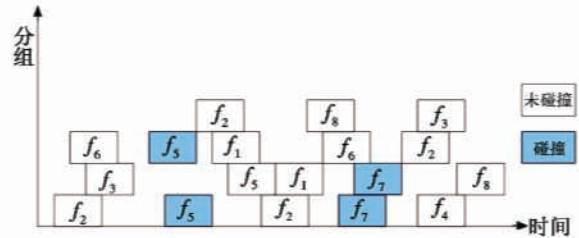


图1 频点选择及突发碰撞图

Fig.1 The graph of frequency point choosing and burst colliding

2 条件假设

- 1) 在 $X \times X \times Z$ (km^3) 范围内的所有节点采用随机分布,并构成一个单跳自组织网络;
- 2) 源端产生的分组具有相同的优先级和到达率,分组到达服从 Poisson 分布;
- 3) 分组到达后按照先入先出 (First In First Out, FIFO) 的排队规则进行排队,一旦缓冲容量已满,则丢弃新到达的分组;
- 4) 每个节点的收发信机都有一个发送通道以及与信道数目相同的接收通道,在发送分组时不影响接收;
- 5) 恒参信道,并且可能受到信道误码以及瞄准式干扰的影响;
- 6) 采用多信道机制,突发接入网络时随机选择频点。

3 具体分析

由上文可知,分组发送之前,首先进行效率为 $1/3$ 的 Turbo 编码,增加了冗余信息,则分组长度由 L_p 变成 $3L_p$;然后采用突发通信机制,将分组等长拆分成 N_b 个突发,则每个突发的长度为 $L_b = \frac{3L_p}{N_b}$,每个突发的传输

时间为 $T_b = \frac{3L_p}{N_b \cdot V_c}$, V_c 为信道传输速率。

对于 n 个节点, 信道数量为 N_f , 则单位时间内到达网络的突发数量的期望值为 $n \cdot \lambda \cdot (1 - p_l) \cdot N_b$, 单位时间内到达任一条信道上的突发数量的期望值为 $\frac{n \cdot \lambda \cdot (1 - p_l) \cdot N_b}{N_f}$ 。假设单个信道中, 突发在时间间隔上服从负指数分布, 则参数为

$$\lambda' = \frac{n \cdot \lambda \cdot (1 - p_l) \cdot N_b}{N_f} \quad (6)$$

突发间隔时间的概率密度函数为

$$f(t) = \lambda' e^{-\lambda' t}, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

突发的交叠情况如图2所示。

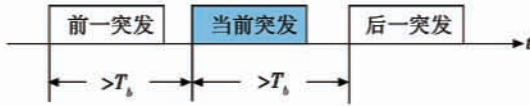


图2 突发的交叠示意图

Fig. 2 The schematic graph of burst overlapping

取任一信道中的任一突发为当前突发, 成功传输的条件是该突发与前一个突发的时间间隔不小于 T_b 且与后一个突发的时间间隔也不小于 T_b , 大小等于接入网络突发成功传输概率

$$p_{in} = e^{-\lambda' \cdot T_b} \cdot e^{-\lambda' \cdot T_b} = e^{-2\lambda' \cdot T_b} \quad (8)$$

信道误码干扰: 由于受到信道误码的影响, 分组误比特率为 p_b , 则长度为 L_b (bits) 的任一突发的出错率等于突发中有大于等于 1 个比特遭到干扰的概率为

$$p_c = 1 - (1 - p_b)^{L_b} \quad (9)$$

瞄准式干扰: 瞄准式干扰的影响直接表现在利用该信道传输的突发全部受到干扰, 假设受到干扰的信道数目为 M_f , 则由于瞄准式干扰导致突发出错的概率为

$$p_s = \frac{M_f}{N_f} \quad (10)$$

对于 MAC 协议性能的评价, 本文主要以系统吞吐量和分组端到端时延作为衡量标准。利用以上的具体分析结果, 可以求得主要性能指标的表达式。

1) 系统吞吐量。

多信道 MAC 协议的目标就是增加网络的吞吐量, 该指标可以直接反映协议是否达到目的。其定义为: 单位时间内网络正确传输的分组比特数, 记为 S 。

对于一个突发而言, 成功传输的概率为

$$p_r' = p_{in} \cdot (1 - p_c) \cdot (1 - p_s) \quad (11)$$

根据 Turbo 编码原理, 只要收端正确接收 M_b 及以上个突发, 就可以完全恢复出整个分组, 由此可得分组传输成功概率为

$$p_r = \sum_{i=M_b}^{N_b} [C_{N_b}^i \cdot (p_r')^i \cdot (1 - p_r')^{N_b-i}] \cdot (1 - p_l) \quad (12)$$

系统吞吐量的表达式为

$$S = n \cdot \lambda \cdot L_p \cdot p_r = n \cdot \lambda \cdot L_p \cdot \sum_{i=M_b}^{N_b} [C_{N_b}^i \cdot (p_r')^i \cdot (1 - p_r')^{N_b-i}] \cdot (1 - p_l) \quad (13)$$

2) 分组端到端时延。

分组端到端时延对那些语音、视频等时间敏感性业务尤为重要, 它也是衡量一个 MAC 协议性能优劣的重要指标。其定义为: 从分组到达缓冲区开始, 直到分组被收端正确接收结束, 所消耗的时间之和。

根据排队论的知识可以分析, 当队长为 1 时, 新到的分组需要等候 1 个传输时延; 当队长为 2 时, 新到的分组需要等候 2 个传输时延; 以此类推, $M/D/1/K$ 系统的平均等待时延为

$$W = \frac{1}{\mu} \cdot \sum_{i=1}^{K-1} i \cdot \pi_i \quad (14)$$

由于突发发送时在一定幅度内随机地进行跳变, 假设跳变的幅度为突发长度的 N_t 倍, 则分组的传输时间

扩展为原先的 N_t 倍, 则 $T_p = \frac{3L_p}{V_c} \cdot N_t$ 。分组传输时延为

$$T_t = T_p = \frac{3L_p}{V_c} \cdot N_t \quad (15)$$

各节点在 $X \times X \times Z$ 的范围内采用随机分布, 可求得各节点之间的距离的期望值为 $X/2$, 则平均传播时延为

$$T_d = \frac{X/2}{c} \quad (16)$$

式中, c 为电磁波的传播速度。

综上, 可得分组的端到端时延均值为

$$T = W + T_t + T_d \quad (17)$$

4 仿真实验

采用 OPNET 仿真工具, 对 BT-MAC 和 TDMA 两种协议的性能进行仿真比较。

1) 节点数量不同时的性能比较分析。

设定 BT-MAC 协议和 TDMA 协议的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
信道速率 $V_c / (\text{bit} \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^6	分组长度 L_p / bit	600
信道数量 N_f	10	跳变幅度 N_t	2
缓冲长度 K	5	到达率 $\lambda / (\text{包} \cdot \text{s}^{-1})$	50
节点数量 n	20 ~ 120	长、宽 X / km	250
高 Z / km	10		

其中, TDMA 的时隙长度设定与最大分组传输时间和最远距离传播时延相关, 由于分组 L_p 长度固定,

则其最大分组传播时间为 $T_t = \frac{L_p}{V_c}$; 在空间 $X \times X \times Z$ 的范围内各节点采用随机分布, 则最远距离传播时延为 $T_p = \frac{\sqrt{X^2 + X^2 + Z^2}}{c}$, 忽略处理时延, 由此可得 TDMA 时隙为

$$T_s = T_p + T_t = \frac{\sqrt{X^2 + X^2 + Z^2}}{c} + \frac{L_p}{V_c} \quad (18)$$

代入数值可解得 $T_s \approx 1.38 \text{ ms}$, 各节点均匀分配所有的时隙。

在信道理想, 即没有误码干扰和瞄准式干扰的条件下, 当节点数目增加时, BT-MAC 协议和 TDMA 协议的相关性能变化比较如图 3 和图 4 所示。

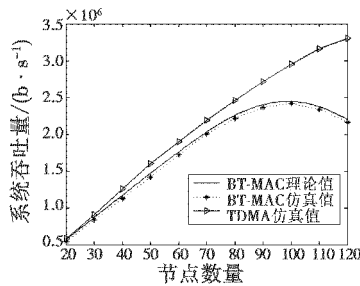


图3 吞吐量比较图

Fig. 3 The graph of throughput comparison

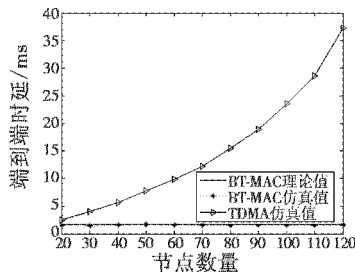


图4 端到端时延比较图

Fig. 4 The graph of end-to-end delay comparison

从图 3 可以看出, BT-MAC 协议吞吐量的理论分析和仿真结果基本上保持一致, 说明了对吞吐量的数学推导的近似准确性, 存在误差的原因是在计算时未考虑到突发之间的组合干扰问题; 同时, 通过比较发现, TDMA 协议的吞吐量性能要一直优于 BT-MAC 协议。从图 4 中可以看出, BT-MAC 协议端到端时延的理论分析和仿真结果基本上保持一致, 存在误差的原因是理论上计算传播时延取了节点距离的期望值, 而实际仿真中采用的是随机分布; 同时, 对比发现, BT-MAC 协议的端到端时延一直稳定在 2 ms 以下, 而 TDMA 协议会达到几十毫秒, 并且随着节点数量的增加一直急剧增加, 不能满足军事航空通信中对时延的要求。

由此可见, 相比于 TDMA 协议, BT-MAC 协议能够保证严格的低时延要求, 虽牺牲了一部分的吞吐量性

能, 但整体上还是保证了较高的吞吐量。

2) 考虑信道误码干扰和瞄准式干扰情况的性能比较分析。

仿真参数同表 1, 在分别只考虑瞄准式干扰 ($M_f = 2, p_b = 0$) 和信道误码干扰 ($M_f = 0, p_b = 0.5 \times 10^{-3}$) 的情况下, 当节点数目增加时, BT-MAC 协议和 TDMA 协议的吞吐量变化比较如图 5 和图 6 所示, 端到端时延不受影响, 与图 4 相同。

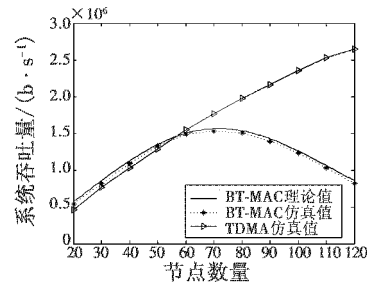


图5 吞吐量比较图

Fig. 5 The graph of throughput comparison

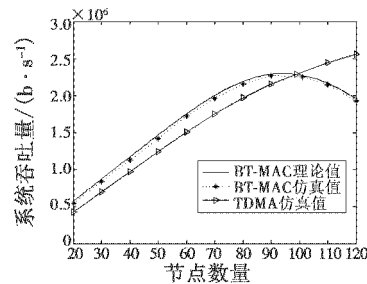


图6 吞吐量比较图

Fig. 6 The graph of throughput comparison

由图 5 和图 3 比较可以看出, 当有瞄准式干扰时, BT-MAC 协议和 TDMA 协议的吞吐量都出现了较大的下降。在节点数量较少时, BT-MAC 协议的吞吐量优于 TDMA 协议, 当节点数量较多时, TDMA 协议的吞吐量更优。由图 6 和图 3 比较可以看出, 当有信道误码干扰时, TDMA 协议的吞吐量发生了大幅的下降, 而 BT-MAC 协议下降幅度较小。随着节点数量增加, 大部分情况下 BT-MAC 协议的吞吐量要高于 TDMA 协议。

综合考虑, 可以发现 BT-MAC 协议不仅具有一定的抗干扰能力, 更重要的是始终保证严格低的分组端到端时延, 能够满足 AANET 中实时通信对时延、传输可靠性的要求。

5 结论

为了满足军事航空通信中对时延、传输可靠性的要求, 提出了一种基于时间抖动和异步调频的多信道 MAC 协议——BT-MAC。采用多信道、突发技术和异步跳频机制, 有效地减少了分组端到端时延, 同时使系

(下转第 75 页)