

面向蜂群无人机自组网接入协议的多优先级动态阈值算法

高茂成¹, 梅少辉¹, 王楠¹, 马明阳²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 710072, 西安; 2. 西安交通大学信息与通信工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对蜂群无人机自组网中存在的数据传输低可靠性以及高时延等问题,提出了面向蜂群无人机自组网接入协议的多优先级动态阈值算法。首先,分析数据帧在无线信道中的传输过程,利用各优先级的数据发送概率求得各优先级的数据传输成功率;其次,提出了一种改进的信道满载阈值计算方法,当信道环境发生变化时能够稳定数据的传输并降低时延;最后,通过依次调整各优先级阈值,维持整体信道处在满载阈值水平,保证了最高优先级队列的高传输成功率与低传输时延,有效地提高了整体蜂群无人机自组网的性能。仿真结果表明:在不同业务量接入的情况下,所提协议能够保持各优先级数据的高传输成功率、低时延和高吞吐量传输,传输成功率比基于业务量统计的多优先级接入协议提升了14.2%,并在最高优先级数据传输成功率、端到端时延以及吞吐量等方面具有较大的优势。

关键词: 蜂群无人机自组网;多优先级;动态阈值;高传输成功率;低时延

中图分类号: TN919.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202306008 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0065-09

Multi-Priority Dynamic Threshold Algorithm for Swarm Unmanned Aerial Vehicle Ad Hoc Network Access Protocol

GAO Maocheng¹, MEI Shaohui¹, WANG Nan¹, MA Mingyang²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To tackle the defects existing in the swarm unmanned aerial vehicle (UAV) ad hoc network, including the low transmission success rate and high delay, a multi-priority dynamic threshold algorithm for the swarm UAV ad hoc network access protocol was proposed in this study. Firstly, the transmission process of data frame in wireless channel was analyzed, and the data transmission probability of each priority was calculated and used to further obtain each priority success rate of data transmission. Then, an improved strategy to calculate the channel full load threshold was proposed, and the data can be transmitted stably with reduced delay even when channel environment changed. Finally, each priority threshold was adjusted successively to maintain the overall channel at the full load threshold level, which ensures the high transmission success rate and low transmission delay of the highest priority queue, and effectively improves the overall performance of the swarm UAV ad hoc network. The simulation results showed that the

proposed protocol can maintain high transmission success rate, low time delay and high throughput when different service volumes are accessed. Compared with existing methods, the proposed protocol was 14.2% higher than TSMP-MAC protocol in terms of the transmission success rate and had greater advantages in the success rate of the highest priority data transmission, time delay and throughput.

Keywords: swarm UAV ad hoc network; multiple priority; dynamic threshold; high transmission success rate; low time delay

随着近年来无人机协同规划、定位、通信中继等技术的发展,其工作模式也开始向无人机编队、无人机集群、蜂群无人机转变^[1]。蜂群无人机网络是由大量无人机组成的无中心、自组织网络^[2],网络中的每架无人机都实现了互联互通。蜂群无人机自组网具有分布性、抗毁性、自愈性等特点,被广泛应用在侦察、农业、巡检、安防等领域。移动节点自组网(MANET)^[3]通常是由地面慢速移动的节点组成,并且节点密度较低。与MANET不同,蜂群无人机自组网的节点移动速度快(速度在0~100 m/s,最高达138 m/s),节点密度高,拓扑变化更加剧烈,在电磁环境干扰严重时会产生严重的数据碰撞。这种数据碰撞不但会降低报文的传输成功率,也影响报文的接入实时性。与地面移动单位只在同一水平面移动不同,无人机单位由于高度变化剧烈,对自组网的性能提出了更高要求。为了满足上述情形,需要对无人机节点业务传输进行通信服务质量(QoS)保证,进而实现更高性能的无线传输。

蜂群无人机媒体接入协议(MAC)作为网络的核心机制,在节点之间分配有限的信道资源,并且在保障数据传输成功率、传输时延和信道利用率等性能方面起着至关重要的作用。目前国内外无线自组网接入协议的研究可以分为3类:①竞争接入技术^[4],通过请求发送/允许发送(RTS/CTS)交互机制预约竞争时隙,代表协议为载波侦听多路访问/冲突避免(CAMA/CA)协议;②调度接入技术^[5],通过时隙分配算法分配时隙资源保障通信,代表协议为时分多址(TDMA)协议;③统计接入技术^[6],代表协议为统计优先级多址接入(SPMA)^[7]协议。SPMA协议划分了若干种优先级队列,不同优先级的数据进入相应队列,将监测到的信道负载状态与每个队列的发送阈值进行比较,然后决定是否进行数据发送。文献[8]提出了多优先级接入的媒体控制协议,能够在轻负载下实现数据的高效、准确传输,但由于采用了固定阈值的方法,无法模拟业务量与信道环境突变的真实通信环境。文献[9]提出了一

种混合型媒体控制接入协议,虽然满足了蜂群无人机自组网高带宽、低时延的要求,但由于受限于较低的信道利用率,无法实现高负载情况下的高传输成功率。

上述方法虽然能够满足移动节点对于无线传输的基本要求,但由于蜂群无人机自组网拓扑变化剧烈,导致现有方法无法保证数据的高效传输。因此,为满足蜂群无人机高传输成功率、低时延以及高吞吐量的要求,提出了一种面向蜂群无人机自组网接入协议的多优先级动态阈值算法。首先,分析数据帧在信道中的传输过程并计算帧传输成功率;其次,为了在满足最高优先级业务可靠传输情况下最大限度地利用信道,提出了一种改进的动态阈值计算方法,利用最高优先级帧传输成功率分阶段求得精准的信道满载阈值;接着,提出了一种各优先级接入阈值的动态调整策略,能够实现不同业务量情况下各优先级业务的高效、可靠传输;最后通过OPNET平台的仿真结果,充分验证了本文算法的优越性。

1 帧传输成功率计算

为保证蜂群无人机自组网高优先级数据的高效传输,需要针对不同优先级设置不同的阈值,而阈值设定的先验条件是要确定当前信道的负载情况。文献[10]采用物理层采样的方式统计信道负载,发现重负载情况下脉冲数据碰撞严重,导致统计结果存在较大偏差。文献[11]采用物理层和网络层获取统计的方法,指出物理层在重负载下不可行,网络层在轻、重负载下准确率都不高。为了提高信道负载的准确度,许多方法^[12-14]尝试将物理层信道的数据传输过程进行分析并计算帧传输成功率,进而通过传输成功率得到信道负载。本文从理论上分析并求得了各优先级队列的帧传输成功率,然后通过实验仿真结果进行了验证。

1.1 优先级队列数据帧发送概率

数据帧从网络层传输到数据链路层时,需按数据业务优先级的不同分配到不同的队列中,具体表

现为:上层传输来的数据帧以某种速率进入传输队列中,依次接受服务然后离开系统。因此,我们将传输队列建模为 $M/G/1$ 队列^[15]。其中, M 表示输入过程,数据帧的到达服从泊松分布; G 表示服务时间,服从均匀分布; 1 表示每次只能处理一个数据帧。数据帧传输模型如图 1 所示。

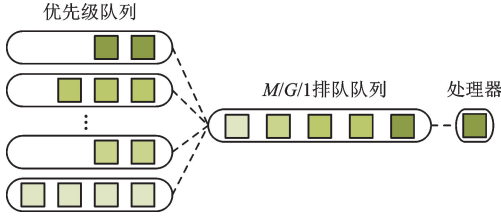


图 1 数据帧传输模型

Fig. 1 Data frame transmission model

假设网络中有 m 个节点,各节点业务类型相同且相对独立。对于当前节点 $j, j=1, 2, \dots, m$, 等概率选择其余节点进行发送,则服务时间 $T_{S,j}$ 的概率分布如下所示

$$P\{T_{S,j} = T_{p,i}\} = \frac{T_{\text{traff},i,j}}{T_{\text{traff}}} \quad (1)$$

式中: $T_{p,i}$ 为 i 节点的处理时间, $i=1, 2, \dots, m$; $T_{\text{traff},i,j}$ 为 i 节点与 j 节点之间的业务时间; $T_{\text{traff},j}$ 为当前节点 j 的总业务时间且 $T_{\text{traff},j} = T_{\text{traff},1,j} + T_{\text{traff},2,j} + \dots + T_{\text{traff},m,j}$ 。

数据处理传输的概率记为 P_{DT} ,即正在接受服务数据帧的数日期望。根据排队论中的李特尔 (Little) 公式^[16],队列中接受服务的数据帧数目 M_j 等于数据帧平均到达速率乘以数据帧平均排队时长

$$M_j = \lambda E(T_{S,j}) = \lambda \sum_{i=1}^n T_{p,i} P\{T_{S,j} = T_{p,i}\} = \lambda \sum_{i=1}^n \frac{T_i T_{\text{traff},i,j}}{T_{\text{traff},j}} \quad (2)$$

式中: λ 为数据帧到达的速率,服从泊松分布,即数据帧平均到达速率期望为 λ ; $E(T_{S,j})$ 表示为数据帧平均排队时长。

当前 $M/G/1$ 排队队列中,来自不同优先级队列的数据帧数量为 A_i (i 为优先级)。当 $M/G/1$ 排队队列中存在数据帧时就会立即发送,不同优先级的数据帧发送概率为

$$P_{\text{DT},i} = \frac{A_i}{M_j} \quad (3)$$

1.2 优先级队列数据帧传输成功概率

节点数据帧经过编码、交织等过程后被处理成多段脉冲数据,每段脉冲数据通过加扰、加同步头、

调制等步骤^[17]进行发送。为了提升数据的传输成功率与保密能力,战术目标瞄准网络技术 (TTNT) 数据链的物理层采用基于跳频跳时的处理机制^[18],将脉冲数据分散在不同时间、不同频率信道上进行传输。数据帧发送流程如图 2 所示。

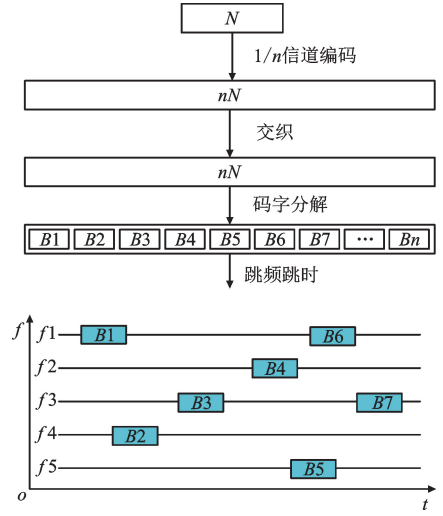


图 2 数据帧发送流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of data frame sending process

在传输过程中,物理层采用了 F 个频点,数据采用 $1/n$ 的信道编码且交织后拆分成 B 个脉冲,每个脉冲持续的时间为 T_{ph} ,单个时隙长度为 δ ,则脉冲数据的发送概率为

$$P_{\text{PT},i} = \frac{nBP_{\text{DT},i}}{\delta F} \quad (4)$$

脉冲数据在信道传输时服从泊松分布且会发生碰撞,其易受冲突的区间为 $2T_{\text{ph}}$,若在 $2T_{\text{ph}}$ 时间内没有发生碰撞则认为传输成功^[19]。所以,脉冲数据的传输成功率为

$$P_{\text{PS},i} = e^{-2T_{\text{ph}}P_{\text{PT},i}} \quad (5)$$

接入协议采用 Turbo 码的方式进行编码,只要 1 个数据帧接收的脉冲数据大于一半数量,整个数据帧就可以被接收。因此,数据帧传输成功概率服从参数 B 和 P_{PS} 的二项分布,可表示为

$$P_{\text{DS},i} = \sum_{k=B/2}^B [C_B^k P_{\text{PS},i}^k (1 - P_{\text{PS},i})^{B-k}] \quad (6)$$

1.3 验证分析

为了验证上述分析与推导,假设数据帧拆分数 $B=32$,脉冲持续时间 $T_{\text{ph}}=3 \mu\text{s}$,时隙长度 $\delta=25 \mu\text{s}$ 。通过仿真得到信道接入量与数据帧传输成功率的变化曲线,如图 3 所示。随着信道接入量的增大,数据帧和突发的传输成功率不断降低。当设定信道接入量不超过 11 000 包/s 时,数据帧能够保证

99%以上的成功率;当设定信道接入量不超过15 000包/s时,数据帧仅能保证90%以上的传输成功率。因此,为保证数据传输的可靠性,将帧传输成功率达到99%时的接入量视为当前信道负载。

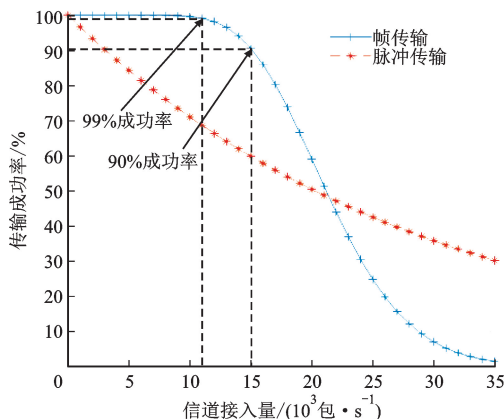


图3 传输成功率随信道接入量的变化

Fig. 3 Transmission success rate varies with channel access quantity

2 信道满载阈值计算

由于蜂群无人机自组网的信道承载力受到信道环境、通信方式、网络拓扑结构等多种因素影响,因而现有方法计算出的信道接入阈值无法直接应用在蜂群无人机自组网中。文献[20]通过报文递交率与信道负载的公式,在满足最高优先级报文传输率高于99%的情况下得出阈值,但由于该节点仅适用于移动速度较慢的节点,无法满足蜂群无人机的通信环境进而导致计算出的阈值缺乏准确性。文献[21]通过网络理论容量与数据帧长度计算得出阈值,但由于无人机信道环境变化剧烈,计算出的阈值并不准确。文献[22]提出动态阈值调整的方式,通过对数增长、比例增长以及动态调整3个阶段逼近信道真实阈值。该方法能够动态求得精确的满载阈值,且适用于无人机网络动态变化的环境,但由于计算效率较低,无法满足蜂群无人机自组网对于高实时性与低时延的要求。本文在文献[22]的基础上进行改进,提出了信道满载阈值动态调整方法。

2.1 满载阈值计算

如图4所示,在信道接入的初始阶段采用对数递增方式,由于对数函数同自变量正相关且在开始时有着较大的增长速度,适合在系统初始阶段进行调整。在阈值调整的中段与后段,采用比例递增和动态调整的方式,能使系统更容易达到稳态。阈值

初始化过程完成后,当信道环境发生变化时,系统会根据变化之前的满载阈值进行比例增长与动态调整,从而动态地对阈值进行更新。该方法既加速了满载阈值的收敛速度,又降低了信道阈值动态调整过程的计算量。上述改进简化了信道满载阈值的计算过程,在信道环境发生变化后,将变化之前的满载阈值进行比例增长与动态调整,更新为新的满载阈值。

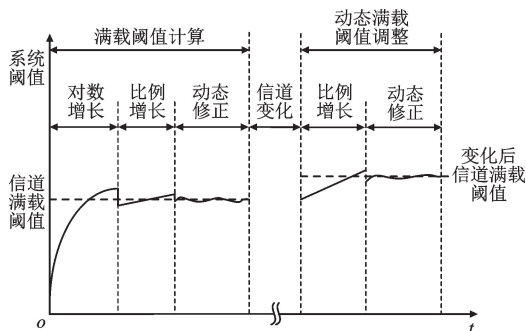


图4 满载阈值调整示意图

Fig. 4 Schematic diagram of full load threshold adjustment

2.2 初始满载阈值调整

(1)对数增长阶段。初始阶段随着数据量的增加,脉冲数据发送概率随之增加并且拥有较高的增长速度,在接近信道真实阈值时速度变缓。因此,满载阈值在初始阶段采用对数增长的函数模型,如下所示

$$V_{th,lg} = \lg(9P_{PT} + 1) \quad (7)$$

式中: $V_{th,lg}$ 为对数增长阶段的信道初始满载阈值; P_{PT} 为脉冲数据发送概率。

随着业务量的增加,信道中脉冲数据的碰撞概率变高,数据帧传输成功率逐渐变低。当最高优先级数据帧传输成功率 $P_{DS,0}$ 小于99%时,将此时的信道初始满载阈值降低至初始阶段的90%,记为

$$V_{th,low} = 0.9V_{th,lg} \quad (8)$$

(2)比例增长阶段。经过对数增长阶段的调整, $V_{th,low}$ 已经接近信道满载阈值,两者的差值较小。采用比例增长模型加速其收敛过程,描述为

$$V_{th,ratio} = V_{th,low} + \gamma\delta_T \quad (9)$$

式中: γ 为比例系数; δ_T 为当前时刻 P_{PT} 与比例增长开始时 P_{PT} 的差值。

(3)动态修正阶段。当最高优先级传输率 $P_{DS,0}$ 小于99%时,信道接入阈值的减小使一部分数据脉冲进行退避,最高优先级队列传输成功率 $P_{DS,0}$ 上升。 $P_{DS,0}$ 高于99%时,适当增加信道接入阈值以便于更多的数据接入,从而使当前信道的阈值保持在

满载水平。动态修正阶段模型如下

$$V_{th,max} = \begin{cases} [1 + \alpha(P_{DS,0} - 0.99)]V_{th, ratio}, & P_{DS,0} > 0.99 \\ [1 + \beta(0.99 - P_{DS,0})]V_{th, ratio}, & P_{DS,0} \leq 0.99 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $V_{th,max}$ 为动态调整后的信道满载阈值; α 和 β 为修正系数默认为 1,在实际系统模拟和测试中进行修正; $P_{DS,0}$ 为最高优先级数据帧的传输成功率。

2.3 动态满载阈值调整

当信道环境发生变化时,需要重新调整满载阈值,而动态调整间隔时间短,阈值调整量较小。为了减小系统开销,在不引入较大超调量的前提下,动态满载阈值调整设计了 2 个阶段。

(1)比例增长阶段。在前一次动态修正得出的满载阈值的基础上,利用 P_{PT} 不同时刻的差值进行比例修正。比例增长模型如下

$$V_{th, ratio}^{new} = V_{th, ratio}^{old} + \gamma \delta_T \quad (11)$$

式中: $V_{th, ratio}^{new}$ 为比例增长阶段得出的新的满载阈值; $V_{th, ratio}^{old}$ 为前一次动态修正得出的满载阈值。

(2)动态修正阶段。与满载阈值计算的动态修正阶段类似,利用前一次比例增长阶段得出的满载阈值对当前动态修正阶段进行修正,模型如下

$$V_{th,max}^{new} = \begin{cases} [1 + \alpha(P_{DS,0} - 0.99)]V_{th, ratio}^{new}, & P_{DS,0} > 0.99 \\ [1 + \beta(0.99 - P_{DS,0})]V_{th, ratio}^{new}, & P_{DS,0} \leq 0.99 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $V_{th,max}^{new}$ 为动态满载阈值经过调整后新的满载阈值。

3 动态阈值调整

为满足蜂群无人机自组网高传输成功率和低时延的需求,基于上文所提出的满载阈值更新模型,设计了一种动态更新各级阈值的算法,整体流程如图 5 所示。

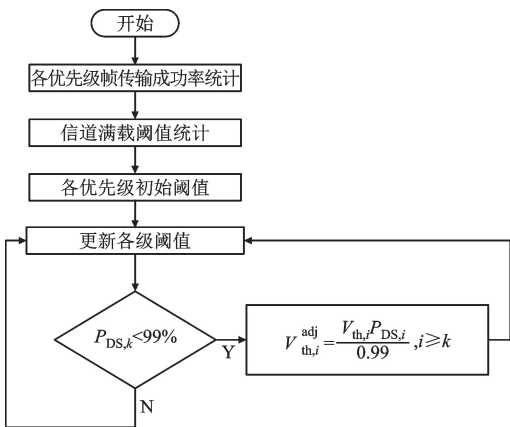


图 5 动态阈值设置流程图

Fig. 5 Flow chart of dynamic threshold setting

(1)系统开始工作后,数据链路层将上层传输的数据帧根据服务类型分为 N 组,并依次传入各优先级队列中等待传输。对各优先级队列的帧传输成功率 P_{DS} 和信道满载阈值 $V_{th,max}$ 进行统计,根据信道满载阈值计算各级信道初始阈值,各优先级传输的数据帧个数为 $A_i, A = A_0 + A_1 + \dots + A_N$,各优先级初始阈值 $V_{th,i}^{int}$ 为

$$V_{th,i}^{int} = \frac{A_i}{A} V_{th,max} \quad (13)$$

(2)更新各级阈值,并使各优先级阈值保持满载水平。更新后的各级阈值 $V_{th,i}$ 为

$$V_{th,i} = V_{th,max} \frac{V_{th,i}^{adj}}{\sum_{i=0}^N V_{th,i}^{adj}} \quad (14)$$

式中: $V_{th,i}^{adj}$ 为传入的各优先级阈值,首次传入即为优先级队列初始阈值。

(3)调整各优先级阈值。随着信道负载的增长,脉冲数据碰撞概率变大,导致高优先级数据的传输成功率降低。为保证高负载情况下最高优先级数据的传输成功率,按优先级层次依次调整各优先级阈值。当优先级为 k 的数据传输成功率低于 99% 时,优先级大于 k 的数据传输成功率更低,调整优先级大于等于 k 的阈值为

$$V_{th,i}^{adj} = \frac{V_{th,i} P_{DS,i}}{0.99} \quad (15)$$

(4)更新各级阈值。调整各优先级阈值后,相应队列的阈值会减小,传输成功率上升。再次更新各级阈值后,整体阈值保持满载,且能够最大限度地发送数据从而降低整体信道时延,并满足最高优先级队列高传输成功率的性能要求。

4 网络协议性能分析

针对本文提出的面向蜂群无人机自组网接入协议的多优先级动态阈值算法,下面对其性能优势进行理论性分析。

4.1 端到端时延的降低

数据从源节点发送到目的节点并成功接收,需要经过排队等待、系统处理、分组传输以及分组传播等过程。数据的端到端时延 T_{delay} 包括:进入队列到准备发送的排队时延 T_{queue} ,处理器完成处理开始发送到发送完成的传输时延 $T_{transport}$,以及在无线链路中消耗的传播时延 T_{spread} 。数据端到端时延计算如下

$$T_{delay} = T_{queue} + T_{transport} + T_{spread} \quad (16)$$

式中: T_{queue} 为处理时间 $t_{process}$ 与退避时间 $t_{backoff}$ 之和

$$T_{\text{queue}} = t_{\text{backoff}} + t_{\text{process}} \quad (17)$$

传输时延 $T_{\text{transport}}$ 为数据帧大小 P_{size} 与发送速率 t_{rate} 的比值

$$T_{\text{transport}} = \frac{P_{\text{size}}}{t_{\text{rate}}} \quad (18)$$

传播时延 T_{spread} 为距离 L 与光速 c 的比值

$$T_{\text{spread}} = \frac{L}{c} \quad (19)$$

当信道环境变化时,信息传输变得不稳定,传统的阈值设置不能应对快速变化的信道环境而导致部分业务数据丢失。在高业务量情况下,脉冲数据在信道中发生碰撞的概率上升,接收机无法接收到碰撞的数据,导致数据传输成功率下降。改进的信道满载阈值根据帧传输成功率进行动态调整,在高业务量时退避掉部分低优先级业务,保障了高优先级业务的传输,提高了其传输成功率。满载阈值方法使信道始终处于稳定状态,减小了数据传输中的处理时间 t_{process} 和退避时间 t_{backoff} ,降低了排队时延 T_{queue} ,从而降低了整体数据的端到端时延 T_{delay} 。最后,通过满载阈值策略对各优先级阈值进行调整,进而降低了最高优先级数据的时延。

4.2 吞吐量

数据吞吐量 $S_{\text{throughput}}$ 为单位时间系统正确接收到数据帧的总和

$$S_{\text{throughput}} = \frac{P_{\text{size}} D_{\text{receive}}}{nT} \quad (20)$$

式中: D_{receive} 为接收成功的数据帧数目; $1/n$ 为编码效率; T 为传输时间。

信道处于稳定状态后,数据帧的传输成功率提高,接收成功的数据帧数目 D_{receive} 也随之提高。在数据帧大小、编码效率和传输时间不变的情况下,系统的吞吐量也随之提高。

5 仿真分析

5.1 仿真条件

为验证蜂群无人机自组网的性能以及高优先级数据在不同负载情况下的表现情况,利用 OPNET 仿真平台对所提算法进行仿真与验证。仿真场景的大小为 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$,场景内存在不规则地形,设置相应的地表导电率以及折射率。各无人机节点在场景中随机动态分布,运动方向随机,产生 4 个优先级业务且各优先级业务比例相同。具体仿真参数如表 1 所示。实验同时对比了 4 种现有协议,包括多路接收阈值自适应协议(MR-ATMA)^[22]、无需物理层统计的多优先级接入协议(SPMA-NPS)^[23]、基

于业务量统计的多优先级接入协议(TSMP-MAC)^[24]和固定阈值接入协议^[25],分别从传输成功率、平均时延以及吞吐量等 3 个方面来验证本文算法的优越性。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting	
参数	数值
节点数目	50
移动速度/(m · s ⁻¹)	20~100
跳频点数	24
跳时点空比	1:5
信道传输速率/(Mb · s ⁻¹)	2
数据包大小/bit	1 000
分组拆分突发数	32
编码效率	1/3
时隙长度/μs	25

5.2 传输成功率对比

图 6 给出了 TSMP-MAC 协议与本文协议在不同输入负载情况下,4 种不同优先级队列的传输成功率对比。其中 Prior0 为最高优先级,Prior3 为最低优先级。当业务量为 6 Mb/s 时,2 种协议各优先级传输成功率均接近 100%。随着业务量增加到 7 Mb/s,2 种协议的 Prior3 队列传输成功率分别为 60% 和 35%。业务量为 9 Mb/s 时,2 种协议的 Prior3 队列传输成功率低至 0,而 Prior1 队列传输成功率仍接近 100%。由此可见,随着业务量的增加,2 种协议的低优先级业务传输成功率先降低,但高优先级业务传输成功率保持稳定。当业务量为

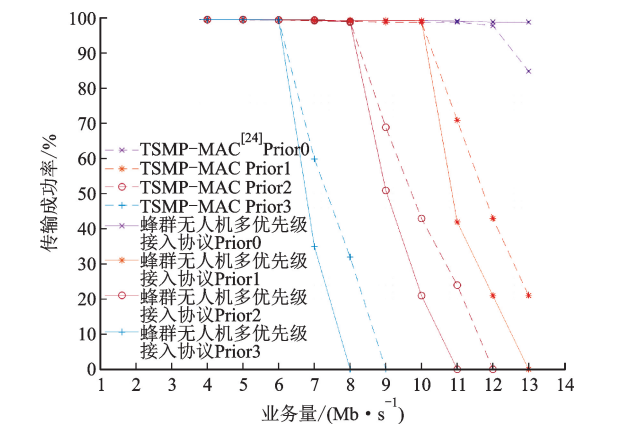


图 6 TSMP-MAC 协议与蜂群无人机多优先级接入协议传输成功率对比

Fig. 6 Comparison of transmission success rates between TSMP-MAC protocol and UAV swarm protocol

13 Mb/s时,TSMP-MAC 协议的 Prior1 队列传输成功率为 21%,高于本文协议。然而,TSMP-MAC 协议的 Prior0 队列传输成功率低至 85%,低于本文协议的 99.2%的传输成功率。从仿真结果来看,本文协议采用的各级阈值动态更新方法保证了最高优先级数据的高传输成功率。

图 7 为不同业务量情况下,蜂群无人机多优先级接入协议与 TSMP-MAC、SPMA-NPS、固定阈值接入协议的最高优先级队列传输成功率的对比。由于采用了动态阈值接入协议,随着业务量的增加,本文协议和 TSMP-MAC 协议最高优先级队列传输成功率一直保持在 99%以上。当业务量高于 6 Mb/s 时,TSMP-MAC 协议的最高优先级队列传输成功率开始逐渐减小,而本文协议一直保持着高成功率。固定阈值接入协议和 SPMA-NPS 协议的最高优先级队列由于阈值设置固定不能动态调整,所以传输成功率随着业务量的增加一直减少。当业务量为 10 Mb/s 时,由于业务数据丢失,传输成功率也随之下降,这 2 种协议的最高优先级队列传输成功率仅为 95%和 88%。从仿真结果来看,本文协议的最高优先级传输成功率相比其他几种协议最高,具有很大的优势。

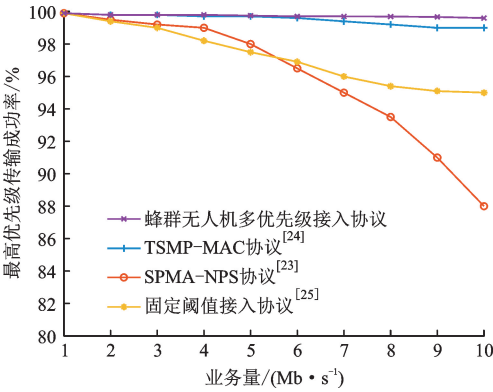


图 7 最高优先级传输成功率对比

Fig. 7 Comparison of highest priority transmission success rates

5.3 端到端时延对比

图 8 为业务量 6 Mb/s 时 MR-ATMA 协议与本文所提协议的平均时延对比。由图可见,MR-ATMA 的时延要高于本文所提协议。当前业务量下,脉冲数据碰撞导致业务数据产生了丢失,由于节点随机移动并采用相同的业务,两者的传输时延 $T_{transport}$ 与传播时延 T_{spread} 相差不大。然而由于仿真网络中存在地形因素影响,在节点移动时会造成信

道环境变化,导致 MR-ATMA 协议的满载阈值收敛时间较长,影响了排队时间 T_{queue} ,继而造成了端到端时延升高。本文协议采用了快速收敛的满载阈值,能够使信道始终保持稳定,减少了数据排队时的退避处理时间,在端到端时延上更具有优势。

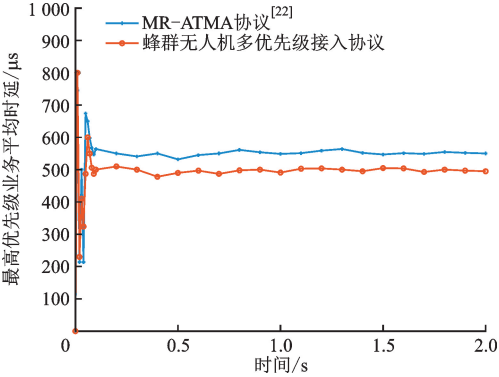


图 8 MR-ATMA 协议与蜂群无人机多优先级接入协议的平均时延对比

Fig. 8 Comparison of the delay between MR-ATMA protocol and UAV swarm protocol

图 9 为 4 种协议最高优先级平均时延对比图。随着业务量的增加,各协议最高优先级传输时延也在增加。业务量为 10 Mb/s 时,固定阈值协议的最高优先级时延最高,其传输时延在 900 μs 以上。业务量小于 6 Mb/s 时,TSMP-MAC 协议与 SPMA-NPS 协议的最高优先级传输时延相近,均维持在 500 μs 左右;当业务量为 10 Mb/s 时,两者的传输时延在 550 μs 左右。本文协议的平均时延在不同业务量时始终保持在 500 μs 以内,且随着业务量增长幅度较小,能够保持通信传输稳定性和高效性。

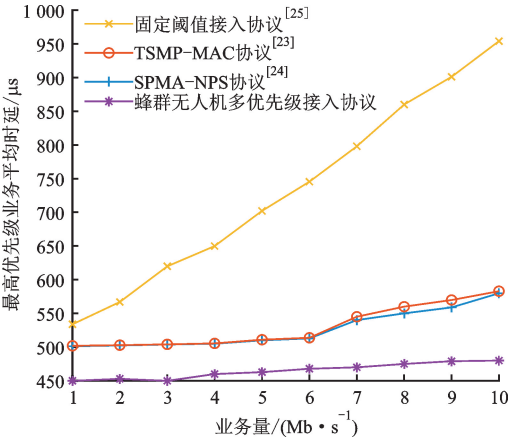


图 9 最高优先级数据平均时延对比

Fig. 9 Comparison of the delay of services with the highest priority

5.4 吞吐量对比

图 10 为 4 种协议最高优先级数据的吞吐量对比。当业务量低于 6 Mb/s 时,4 种协议的吞吐量相近。然而随着业务量的增加,信道中的数据碰撞概率上升,数据丢失越发严重,导致吞吐量出现下降。业务量为 10 Mb/s 时,SPMA-NPS 协议与固定阈值接入协议的吞吐量分别为 5.28 Mb/s 和 5.7 Mb/s,明显低于其他 2 种协议。蜂群无人机多优先级接入协议吞吐量在高负载情况下保持稳定且稍高于 TSMP-MAC 协议,在业务量为 10 Mb/s 时,吞吐量达到 5.967 Mb/s。由此可见,在高负载情况下本文所提协议能够保持吞吐量稳定,明显优于其他 3 种协议。

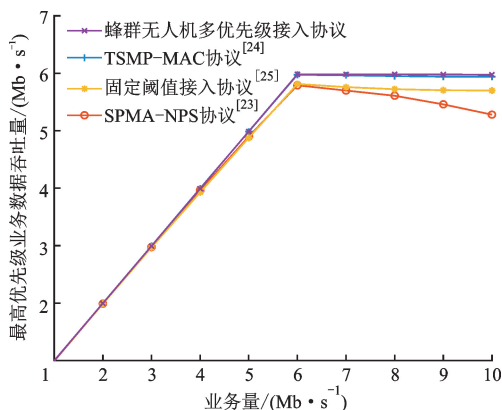


图 10 最高优先级业务数据吞吐量对比

Fig. 10 Comparison of highest priority service data throughput

6 结 论

本文设计了一种面向蜂群无人机自组网接入协议的多优先级动态阈值算法,解决了当前接入协议对于快速移动无人机节点存在的低传输成功率以及高传输时延问题。首先,分析了数据帧在信道的中传输过程并计算了各优先级数据帧的传输成功率;其次,提出了一种改进的信道满载阈值的计算方法,通过分段逐次逼近信道满载阈值,加速了收敛过程;最后,为进一步保证最高优先级队列数据传输成功率,提出了一种信道接入阈值的动态调整模型,通过动态调整各级阈值满足了蜂群无人机自组网的高性能要求。仿真实验结果表明了本文所提出协议相比于现有协议,在端到端时延、传输成功率以及吞吐量上都有着较为显著的优势。

参考文献:

[1] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综

述 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.

CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789.

[2] 张琨, 董超, 杨朋, 等. 无人机自组网路由协议研究综述 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37(5): 952-970.

ZHANG Min, DONG Chao, YANG Peng, et al. Overview on routing protocols for flying Ad-Hoc networks [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(5): 952-970.

[3] LIU Xuan, LI Zhuo, YANG Peng, et al. Information-centric mobile ad hoc networks and content routing: a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2017, 58: 255-268.

[4] 吴秋尘, 胡春静, 吴皓, 等. 基于 CSMA/CA 的无人机自组网容量分析 [J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1014-1019.

WU Qiuchen, HU Chunjing, WU Hao, et al. Capacity analysis of UAV Ad Hoc network based on CSMA/CA protocol [J]. Communications Technology, 2022, 55(8): 1014-1019.

[5] 王睿, 王文灿, 白丽, 等. 基于动态中继选择的无人机自组网协作接入协议 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37(1): 228-239.

WANG Rui, WANG Wencan, BAI Li, et al. Cooperative access protocol for UAVAd-Hoc network based on dynamic relay selection [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(1): 228-239.

[6] GAO Siying, YANG Ming, YU Hui. Modeling and parameter optimization of statistical priority-based multiple access protocol [J]. China Communications, 2019, 16(9): 45-61.

[7] FANG Zheng, QIU Qiming, DING Yongfei, et al. A QoS guarantee based hybrid media access control protocol of aeronautical Ad Hoc network [J]. IEEE Access, 2018, 6: 5954-5961.

[8] ZHENG Wenqing, JIN Hu. Analysis and research on a new data link MAC protocol [C]//2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 281-285.

[9] ABDEL-HAFEZ M, SALLABI F, ADNAN M, et al. Performance improvement of IEEE 802.15.6 MAC for eHealth applications using user priority switching [C]//ICC 2021-IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-6.

[10] ABEDI O, POURHASANI A. Prioritized multi-chan-

- nel MAC protocol in ad hoc networks using a TDMA/CSMA approach [J]. *Wireless Networks*, 2021, 27(4): 2629-2640.
- [11] 刘依婷. 无人机网络统计优先级多址接入协议的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [12] 刘派. SPMA 协议智能优化设计技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 002003.
- [13] 肖雷蕾, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 一种区分优先级自适应抖动的媒质接入控制协议 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(10): 123-129, 150.
- XIAO Leilei, ZHANG Hengyang, MAO Yuquan, et al. An adaptive jitter based media access control protocol with priorities [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(10): 123-129, 150.
- [14] BEG A, MOSTAFA S M, ABDULGHAFAR A A, et al. An adaptive and spectrally efficient multi-channel medium access control protocol for dynamic Ad Hoc networks [J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8666.
- [15] HUANG Jun, XIONG Zi, LIU Yanbing, et al. Multi-priority scheduling using network calculus: model and analysis [C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1464-1469.
- [16] KIM S H, WHITT W. Statistical analysis with little's law [J]. *Operations Research*, 2013, 61(4): 1030-1045.
- [17] ZHANG Yan, HE Yao, WANG Xijun, et al. Modeling and performance analysis of statistical priority-based multiple access: a stochastic geometry approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(15): 13942-13954.
- [18] XIONG Jian, NAN Jianguo, HUANG Jinke. An traffic intensity based media access control protocol with priorities [C]//2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 177-181.
- [19] LIU Jian, PENG Tao, QUAN Qingyi, et al. Performance analysis of the statistical priority-based multiple access [C]//2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 30-35.
- [20] 丁峰, 史琰, 赵雄旺. 一种 SPMA 协议的动态阈值设置方法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2022, 49(5): 37-46.
- DING Feng, SHI Yan, ZHAO Xiongwang. Approach to the adjustment of the dynamic threshold of the SPMA protocol [J]. *Journal of Xidian University*, 2022, 49(5): 37-46.
- [21] YANG Ming, ZHANG Qi, TU Yuliang, et al. Modeling and performance analysis of statistical priority-based multiple access protocol [C]//2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 399-404.
- [22] 丁峰, 陈小飞, 马世银. 面向多节点的协同突发业务接入体制研究 [J]. *航空兵器*, 2021, 28(4): 103-111.
- DING Feng, CHEN Xiaofei, MA Shiyin. Research on burst services access mechanism for multi-node cooperation [J]. *Aero Weaponry*, 2021, 28(4): 103-111.
- [23] 刘志峰. 网络协同数据链数据链路层的研究与设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [24] WANG Luman, LI Hai, LIU Zhifeng. Research and pragmatic-improvement of statistical priority-based multiple access protocol [C]//2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 2057-2063.
- [25] WEI Yixuan, SUN Xinghua, ZHANG Yan, et al. Performance analysis of SPMA protocol: a Markov renewal process approach [C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-6.

(编辑 李慧敏 刘杨)