

# 无人机自组网中基于优先级和发送概率的低时延MAC协议设计

王洁 王海军\* 张晓瀛 赵海涛 张姣 刘潇然  
(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 媒体接入控制(MAC)协议是满足数据传输质量服务需求的一项关键技术,其性能的优劣直接决定了网络的整体运行效率。相较于其他经典MAC协议,基于统计优先级的多址接入(SPMA)协议采用了多优先级接入、信道检测和流量控制等机制,因此它能更好地满足无人机自组网的低时延、区分服务、大规模组网等重要需求。其中,不同优先级阈值是影响该协议性能的关键指标之一,而现有研究中的阈值设置策略会导致无人机自组网吞吐量波动较大的问题。除此之外,在大规模节点组网的情况下,由于特殊的发送机制,该协议面临数据包冲突加剧的问题。针对以上问题,本文提出了一种新的阈值设置方法和低优先级数据概率性接入信道的方法。在大规模节点网络高业务量的情况下,该改进策略根据新的阈值和周期性负载统计的比较结果决定是否延迟或者拒绝相关数据的接入。与此同时,将SPMA协议的多优先级接入机制和排队论基本原理相结合,通过计算设定发送概率对不同低优先级数据进行接入控制。仿真结果表明,所提方法能够使得无人机自组网的吞吐量保持稳定,并为不同类型业务的差异性服务质量(QoS)需求提供良好支持,提高不同优先级数据的首发传输成功率的同时不会带来较大的额外时延损耗,性能优于现有的SPMA协议。

**关键词:** 无人机自组网; 差异性QoS; SPMA协议; 阈值设置; 低优先级数据接入控制

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.04.005

**引用格式:** 王洁,王海军,张晓瀛,等. 无人机自组网中基于优先级和发送概率的低时延MAC协议设计[J]. 信号处理, 2024, 40(4): 661-670. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.04.005.

**Reference format:** WANG Jie, WANG Haijun, ZHANG Xiaoying, et al. Design of low latency MAC protocol based on priority and transmission probability in UAV ad-hoc network[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(4): 661-670. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.04.005.

## Design of Low Latency MAC Protocol Based on Priority and Transmission Probability in UAV Ad-hoc Network

WANG Jie WANG Haijun\* ZHANG Xiaoying ZHAO Haitao ZHANG Jiao LIU Xiaoran  
(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ad-hoc networks feature dynamic topology, self-organization, and multi-hop routing. The Media Access Control (MAC) protocol outlines how nodes can efficiently transmit data while utilizing limited channel resources. It is an important technology for satisfying data transmission quality of service requirements, and its performance directly determines the operational efficiency of UAV ad-hoc networks. Design optimization of pro-

收稿日期: 2023-12-03; 修回日期: 2024-01-12

\*通信作者: 王海军 haijunwang14@nudt.edu.cn \*Corresponding Author: WANG Haijun, haijunwang14@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61931020);湖南省自然科学基金杰青项目(2022JJ10068)

Foundation Items: Key Program of National Natural Science Foundation of China (61931020); Excellent Youth Program of Hunan Provincial Natural Science Foundation (2022JJ10068)

protocols is critical to enhancing the stability and reliability of UAV ad-hoc networks. Compared with other classical MAC protocols, the Statistical Priority-Based Multiple Access (SPMA) protocol uses mechanisms such as multi-priority access, channel detection, and flow control. Therefore, it can better meet the requirements of UAV ad-hoc networks with low latency, differentiated services, and large-scale connectivity. However, this protocol faces the problem of increased packet collisions in the case of high bursts and high loads of network traffic. Therefore, this paper introduces a new threshold-setting method and probabilistic access control for low-priority data. In the case of high network traffic, the proposed method decides whether to delay or deny access to the service based on the comparison results of the new threshold value and periodic load statistics. Meanwhile, the access control of different low-priority data was conducted by calculating their transmission probabilities. Simulation results verify that the proposed method can maintain a more stable throughput of UAV ad-hoc networks and support better differentiated Quality of Service (QoS) requirements for different types of services, compared to the existing SPMA protocol. However, there are still some shortcomings, and future research can consider the following aspects: 1) Priority threshold setting strategy in multi-hop scenarios. The current threshold studies are all proposed based on all-pass network scenarios, and dynamically adjusting the priority thresholds in multi-hop scenarios can improve the data transmission performance. 2) Considering external interference and topology changes, adjusting the access strategy of the protocols according to the environmental changes, and more fully utilizing the prioritized channel resources.

**Key words:** unmanned aerial vehicle ad-hoc network; differential quality of service; statistical priority-based multiple access protocol; threshold setting; low-priority data access control

## 1 引言

近年来,无人机由于其部署敏捷、机动性强、维护成本低等特点<sup>[1]</sup>,被广泛用于智能监测、无人物流、应急保障等领域。特别是,作为一种新型空基移动平台,无人机的自主化和网络化技术经历迅速发展,使得其在很大程度上影响着博弈双方的主动权。例如,近期的俄乌冲突彰显出大规模无人机集群对战场态势的重要影响程度,同时也预示着未来利用无人机进行高效通信的广阔远景。其中,基于无人机自组织组网技术构建的通信网络系统<sup>[2-3]</sup>,可进一步用于支撑高动态环境下有人/无人任务单元间的态势共享和任务协同。在某些特定应用场景中,对无人机自组网通信系统性能有如下要求<sup>[4]</sup>:1)支持多种不同类别的服务质量需求;2)保证高优先级数据的极低时延(达到2 ms级别);3)保证数据首发成功率不低于99%;4)支持大规模节点组网,同时网络吞吐量在高数据流情况下能保持稳定。

媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)协议规定着自组织网络中的节点如何在有限信道资源的情况下进行高效有序的数据传输,是保障时敏业务服务需求的关键技术,其性能的优劣直接决定了网络整体运行的效率<sup>[5-6]</sup>。根据节点获取信道使用权的方式,目前无人机自组网MAC协议主要分为时分多址接入(Time Division Multiple Access, TDMA)<sup>[7-8]</sup>、载波侦听/冲突避免多址接入

(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA)<sup>[9-11]</sup>和基于业务优先级统计的多址接入(Statistical Priority-based Multiple Access, SPMA)<sup>[12]</sup>。其中,TDMA是一种以时间为资源的接入协议,包含静态和动态两种方式。静态TDMA的基本思想是:在通信开始之前为每个节点分配固定的专属时隙,节点在通信过程中需要等待专属时隙的到来进行数据传输。动态TDMA的基本思想是:节点在发送数据前需要通过控制消息预约相应时隙。不过,由于无人机自组网节点间传播距离大,控制帧往返传播时延不可忽略。因此,TDMA协议虽然可以避免节点间的数据冲突,但存在不能提供有效区分服务,不能保证高优先级极低时延的问题。CSMA/CA是一种随机竞争类的MAC协议,节点通过在随机退避窗口时期对信道进行忙/闲监测从而减小数据包在共享信道上的碰撞。但其同样存在不能提供有效区分服务的问题,并且在大规模节点组网情况下,会出现数据包冲突加剧现象,无法保证业务的可靠高效传输。

SPMA协议<sup>[12]</sup>作为一种流量控制协议,不需要事先为节点分配和预约时隙,只需要根据周期性的信道负载统计和阈值的大小关系,决定是否接入相应数据帧。此策略再加上帧抢占机制,可保证高优先级分组的低时延特性。此外,通过负载与阈值的比较,将网络负载控制在设定范围,保证已发送数据的较高传输成功率。但是,目前已有的研究工作都只是从负载统计周期内的平均情况

去分析提高 SPMA 协议性能,忽略了数据发送时刻其他节点的情况。由于系统物理层的增强,SPMA 协议通过负载与阈值的大小关系直接决定该节点数据包的发送,虽然可对网络负载起到控制作用,但不能避免大量节点在同一时刻进行数据传输,超出信道最大承受能力,造成高优先级数据的碰撞概率增大。

随着无人机网络中业务实时性要求的不断提高,目前亟须一种新型接入策略以实现在复杂网络情况下,时敏业务的低时延、高可靠传输。本文主要贡献为:一是详细分析了 SPMA 协议流程以及现有相关研究的不足;二是针对网络随机性产生的高优先级数据发送成功率降低的问题,提出了一种新的阈值计算方法;三是针对统计周期内不同节点同时传输大量数据包,超过信道最大承受能力的问题,提出了低优先级数据概率接入的方法,并给出了具体推导过程;四是与现有 SPMA 协议进行了仿真对比,证实了所提方法在稳定吞吐量方面的优越性。

## 2 相关研究与问题分析

SPMA 协议主要特点是为不同优先级的业务类型设置不同的发送阈值,对信道数据包数进行周期性统计,然后据此衡量信道的忙闲程度并判断不同的优先级业务是否允许接入。通过延迟或拒绝低优先级业务的接入,将网络信道负载保持稳定,避免业务量大情况下数据的碰撞和重传,优先保证在

动态性较大的无人机自组网中高优先级业务的传输性能。SPMA 使 TTNT 可以实现 100 海里 2 ms 的极低时延,灵活性也大大提高。

文献[12]首先提出了 SPMA 协议,并阐述了该协议的主要思想和大致流程,但未涉及其中的关键指标数据<sup>[13]</sup>。在文献[12]中,一种结合跳时跳频的 TxRxN 波形设计被用于 SPMA 系统。这等价于节点具有以一定速率传输数据,同时以相同速率接收  $N$  个独立的数据流的能力。SPMA 系统框图如图 1 所示,首先根据从上层到达 MAC 层的不同业务类型的优先级将其加入到不同的优先级队列,然后从高到低按照优先级依次检查队列是否有待传输数据,若有则将此数据包取出。此时,如果数据包超过有效期则直接丢弃,否则进行该优先级阈值与信道负载的比较。若该优先级阈值大于信道负载值则将此包发送,反之执行退避算法。当低优先级数据处于回退等待阶段时,如果有更高优先级数据的到来,为了进一步保证时敏性业务的传输质量,需要停止低优先级数据的退避,对更高优先级数据进行发送判断。

从上述 SPMA 协议的多优先级接入、帧抢占等机制可以看出,该协议可以在无人机自组网有限传输资源的情况下优先给时敏性业务提供可靠的传输性能,而低优先级业务的传输取决于网络传输资源的容量和高优先级业务的情况。由此可知,该协议在一定程度上可以满足实际中不同类型业务 QoS 的需求,即高优先级业务的极低时延

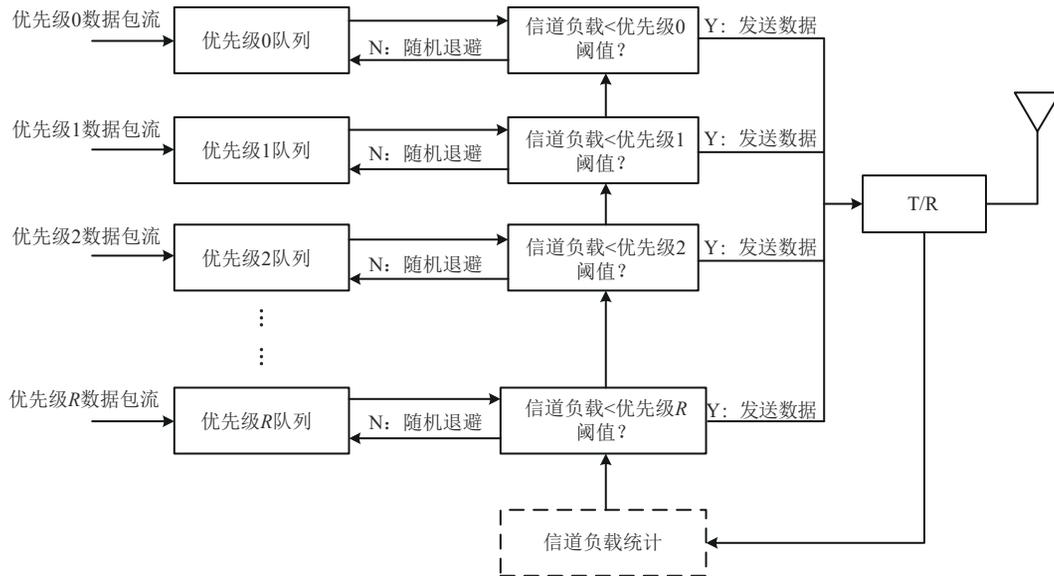


图 1 SPMA 系统框图

Fig. 1 SPMA system block diagram

和高首发成功率、低优先级业务相对较长的数据有效期。

后续有大量学者在此基础上针对退避时间、负载统计、阈值计算等方面进行分析研究。文献[14]首先指出二进制指数退避及其一些改进算法在多优先级区分服务场景下的不适用性,然后提出基于优先级的退避窗口计算。文献[15-17]在此基础上,将阈值、负载统计等因素纳入退避窗口的计算,进一步对不同业务进行区分服务。针对负载统计的准确性,文献[18]提出了基于素数序列的跳频跳时图案设计,文献[19]在通过物理层、网络层获得负载的基础上提出了混合式获取信道负载的方法,文献[20-21]引入流量预测技术,可以更准确获取到发送时刻的信道状态信息。

从 SPMA 的基本思想看,业务优先级阈值的设置是影响协议性能的一个重要因素,针对不同优先级的阈值计算,目前主要有两大类计算方法。文献[14]提出将阈值门限作为最低优先级的阈值,根据业务比例计算不同优先级的阈值。此类方法存在的问题是:当网络流量较大时,此时的阈值大小不能保证高优先级业务的低时延和高成功率,极端情况下甚至会出现高优先级的成功率小于低优先级的情况。这是因为,这种方法没有考虑到数据实际传输的随机性,对负载控制能力较差。高优先级数据在较高负载情况下仍可以发送,这必然会引起冲突,造成传输成功率降低。在此基础上文献[22]提出将阈值门限作为最高优先级的阈值,然后根据统计周期内信道的剩余承载能力依次从最高优先级判断数据的发送。此类方法加强了对负载的控制能力,但网络吞吐量波动性较大,仍值得进一步改进。

综上所述,现有无人机自组网 SPMA 协议显著存在两方面问题。一方面,现有 SPMA 协议中,其余优先级阈值的设置在最低优先级阈值确定之后只是简单的根据不同优先级的业务比例得出,是一种统计平均的思想,忽略了网络中不同优先级数据的到达具有随机性。另一方面,现有 SPMA 协议中,数据包的发送仅仅考虑了自身节点的发送对网络的影响,而忽略了其他节点的发送对信道忙闲程度的整体影响。即当负载小于阈值时,自身节点可以对数据包进行接入,但如果此时网络中其他大量节点也判断得到自身的数据包可以进行接入,总的数据包数就会超过信道的实际最大承受能力,导致冲突加剧现象发生。

### 3 基于负载控制和优先级业务比例的阈值设置

SPMA 协议的主要思想是通过比较负载和阈值的大小关系从而延迟或者拒绝低优先级数据的接入,将网络负载控制在一个范围,使数据包首次发送成功率为 99%。如果优先级阈值设置的过高,允许发送的数据包数越多,信道负载的增大会导致数据冲突和重传加剧的现象;如果优先级阈值设置的过低,更多的优先级分组将退避,负载会低于传输成功率 99% 时的满载门限,将造成信道利用率的降低。因此,为了使数据包高效传输和最大利用信道资源,需要合理地设置不同优先级阈值。进一步,为了满足时敏性业务的传输需求,特别是最高优先级的 2 ms 极低时延要求,高优先级分组阈值应该大于低优先级分组。当周期性信道负载统计超过低优先级分组阈值时,对低优先级数据包延迟接入,保证高优先级数据的传输不受影响。

所以,考虑各优先级数据到达的随机性,提出了一种新的阈值计算方法,可以有效的将网络负载控制在最优范围,保证已发送数据的传输质量不受影响,同时又有较好的信道利用率。假设全网存在  $R$  类数据业务,优先级从高到低依次是  $0 \sim R-1$ ,各优先级业务占比为  $r_i$  且对应的阈值为  $\text{Threshold}_i$ 。首先,当网络负载不大于最低优先级阈值  $\text{Threshold}_{R-1}$  时,所有数据随到随发。其中,最低优先级阈值  $\text{Threshold}_{R-1}$  也称为门限值,可通过场景测试方法得到。由于 SPMA 协议实质上是一种流量控制协议,即通过对低优先级数据的退避或者拒绝接入将信道负载控制在特定范围,从而保证已发送数据包的传输性能。为了衡量高传输成功率下的实际负载能力,网络中节点均采用 ALOHA 协议,所有数据被视为同一优先级随到随发,然后逐渐增大节点业务量,当传输成功率由 100% 降低至 99% 时,将周期内的平均数据包数作为最低优先级阈值  $\text{Threshold}_{R-1}$ 。然后,为了保证较高负载情况下到达的少量高优先级的传输性能,将最高优先级的阈值  $\text{Threshold}_0$  定义为 ALOHA 网络传输成功率 95% 时的负载。这样设置的原因是,一方面,考虑到网络信道资源的利用,最高优先级阈值不能设置得过低,否则网络中大部分数据包会进行退避;另一方面,可以保证即使此时有少量的最高优先级到来,网络性能也没

有恶化到不能接受的程度。在此基础上,根据不同优先级的业务比例,得到中间优先级的阈值:

$$\text{Threshold}_i = (\text{Threshold}_0 - \text{Threshold}_{R-1}) \times \frac{\sum_{j=0}^i r_j}{\sum_{k=1}^{R-2} \sum_{j=0}^{k-1} r_j} + \text{Threshold}_{R-1}, 0 < i < R-1 \quad (1)$$

根据前述内容对SPMA协议框图的介绍,特殊的发送机制本质上是通过控制较短统计周期内的数据包数不超过信道实际最大承载能力,保证已发送数据的低时延和高成功率性能。而阈值的设置就是对信道实际承受能力和对不同优先级进行区分服务的体现。由公式(1)里的 $\text{Threshold}_0$ 和 $\text{Threshold}_{R-1}$ 参数设置方法和发送机制可知,即使在不同的网络状态下,信道负载都会被控制在两个参数范围之间,可以更好的保证已发送数据的传输性能。其中第二项乘法因子表示不同优先级的阈值不仅仅是简单的根据业务比例得出,还考虑了不同优先级数据之间的退避或接入对负载影响程度的关系。因为业务比例的不同,所以当对不同优先级分组进行退避或接入时,业务量大的优先级数据会比业务量小的优先级数据对信道负载产生更大的影响,也就是对信道负载的调整使其稳定的速度不同。因此,阈值的设定与这个速度息息相关,而不是单纯的根据比例得出。

#### 4 基于发送概率的低优先级接入算法

在大规模节点组网情况下,网络流量的增加大多是因为较低优先级业务的剧增,而属于高优先级业务的紧急控制、告警提示等命令主要特征是突发性强。在现有SPMA协议中,数据包的发送忽略了其他节点的情况,当信道剩余容量较小时,为了避免大量节点同时对业务接入造成的冲突加剧情况对高优先级业务传输的影响,所以引入低优先级业务的概率接入算法是很有必要的。

当网络流量较高、节点数目较大时,以概率 $1-p'_i$ 延迟或拒绝低优先级数据的接入,既可以保证高优先级业务的低时延和高成功率性能,又能保持网络吞吐量稳定。具体来说,概率 $p'_i$ 通过单位时间发送概率 $P_{\text{out}}$ 计算得到,计算过程如下。

一方面,在阈值计算阶段可以得到每个节点的单位时间发送概率:

$$P_{\text{out}} = \frac{\text{Threshold}_{R-1}}{N \cdot T} \quad (2)$$

其中, $N$ 表示网络节点数目; $T$ 表示时间,根据不同的网络参数取值,作用是将节点发送的数据包数归一化为单位时间发送概率。这代表节点在单位时间内以 $P_{\text{out}}$ 的概率发送数据,可使得数据的首发成功率高达99%。

另一方面,结合SPMA协议具体发送流程,可以分析得到引入概率接入低优先级分组时的单位时间发送概率。这表明低优先级分组在高业务量情况下以概率发送,仍然可使网络吞吐量保持稳定,数据的首发成功率达到99%。

首先,设优先级 $i$ 业务的到达率服从 $\lambda_i$ 的泊松分布,那么在时间 $t$ 内,该优先级数据包到达 $k$ 个的概率为:

$$f_i(k, t) = \frac{e^{-\lambda_i t} \cdot (\lambda_i t)^k}{k!} \quad (3)$$

根据前文分析,SPMA协议通过抢占机制保证高优先级分组的低时延高成功率性能。由于高优先级数据可以打断低优先级数据的发送,因此需要考虑在退避时间 $t$ 内,低优先级的发送不会被到来的高优先级数据中断的概率:

$$g_i(t) = \begin{cases} \prod_{j=0}^{i-1} f_j(0, t) = \prod_{j=0}^{i-1} e^{-\lambda_j t}, & i \geq 1 \\ 1, & i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由SPMA协议流程,位于队首的数据包可以发送的条件为负载统计值小于该优先级阈值,发送时刻信道状态达到发送条件的概率为:

$$\gamma_i = \sum_{k=0}^{R_i} P(D=k) \quad (5)$$

$$P(D=k) = C_{n,N}^k \left( P_{\text{out}}^k \cdot (1 - P_{\text{out}})^{n-k} \right) \quad (6)$$

其中, $R_i$ 表示每个优先级的阈值, $n$ 表示统计周期内包含的单位时间长度个数,乘以节点数 $N$ 表明每个节点在网络模型中是平等,发送只取决于网络负载情况。概率 $P(D=k)$ 表示网络中信道负载即发送数据包数为 $k$ 的概率服从二项分布。

由M/G/1排队模型的性质可知,处于队首数据包的优先级为 $i$ 的概率为:

$$P_i = \frac{\lambda_i \cdot \bar{T}_i}{\sum_{j=0}^{R-1} \lambda_j \cdot \bar{T}_j} \quad (7)$$

$\bar{T}_i$ 表示优先级数据 $i$ 的平均服务时间:

$$\bar{T}_i = \sum_{k=1}^{m_i} b_i \cdot (1 - \gamma_i)^k \quad (8)$$

其中, $m_i$ 表示最大回退次数, $b_i$ 表示单次平均退避

时间包含的单位时间长度个数。值得注意的是,由于SPMA协议是基于区分服务的,并且在发送前需要将负载与阈值进行判断,所以,本文采用的退避策略不再是二进制指数退避,而是每个优先级分组具有不同的回退窗口和不同的最大回退次数。

当数据经过 $j$ 次退避后,达到信道负载小于阈值的发送条件,可以发送的概率为:

$$\theta_j^{(i)} = \left[ (1 - \gamma_i) \cdot g_i(b_i) \right]^j \gamma_i, 0 \leq j \leq m_i \quad (9)$$

进一步,结合本文提出的低优先级概率接入算法,得到优先级 $i$ 没超过最大回退次数时的发送概率为 $p_{\text{sent}}^{(i)}$ :

$$p_{\text{sent}}^{(i)} = \begin{cases} \sum_{j=0}^{m_i} \theta_j^{(i)}, & i=0 \\ \sum_{j=0}^{m_i} \theta_j^{(i)} \cdot \bar{p}, & 1 \leq i \leq N-1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\bar{p}$ 表示所有低优先级分组的平均接入概率。

因此,可得到优先级数据 $i$ 的单位时间发送概率<sup>[23]</sup>为:

$$P_{\text{out}} = \sum_{i=0}^{R-1} p_i \cdot p_{\text{sent}}^{(i)} \cdot \frac{1}{T_i} \quad (11)$$

综上,得到低优先级的平均发送概率 $\bar{p}$ ,然后可根据不同比例求出不同低优先级分组的接入概率 $p'_i$ 。 $p'_i$ 的计算不仅需要保证信道负载稳定,还需要遵从优先保障高优先级分组传输性能的原则。因此 $p'_1 \sim p'_{R-1}$ 的具体计算过程为:从高优先级分组开始依次保证以概率“1”发送,利用公式(12)计算出可发送的最低优先级分组的发送概率 $p'_i$ 。

$$\sum_{j=1}^{R-1} p'_j \cdot r_j = \bar{p} \cdot \sum_{j=1}^{R-1} r_j, 1 \leq i \leq R-1 \quad (12)$$

结合文章第3、4部分内容,给出不同优先级的阈值计算和概率接入算法的伪代码,如算法1所示。

## 5 算法仿真

### 5.1 仿真条件及参数

为说明SPMA协议在稳定吞吐量方面的优势和验证所提方法的有效性,本文采用OPNET Modeler 14.5对改进前后的SPMA协议进行仿真,然后分别从传输成功率和时延两个角度进行比较和分析。在本文中,无人机自组网网络是由多架地位平等的无人机节点构成的单连通网络,即网络中任意两个节点之间可以直接通信。网络中的流量根据

#### 算法1 SPMA 优先级队列调度算法

输入:传输成功率为99%和95%时的信道负载

输出:不同优先级数据包是否发送

1. 根据信道负载计算得到优先级 $i$ 的阈值 $\text{Threshold}_i$ 和发送概率 $p'_i$
2. while 队列不为空 do
3. 选择最高优先级数据包
4. if 数据包超过有效期 then
5. 删除该数据包,重新选择最高优先级数据包
6. else
7. if 信道负载大于该优先级阈值 then
8. 根据退避窗口执行退避
9. if 有更高优先级数据到达 then
10. 退避终止,选择最高优先级数据包
11. end if
12. 退避结束,概率发送该优先级数据包
13. end if
14. else
15. 概率发送该优先级数据包
16. end if
17. end while

业务类型、紧急程度被分为不同优先级,用以满足不同类别服务质量需求。

系统仿真参数如表1所示。本仿真中节点随机分布在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 区域内,系统中的数据包被分为4个优先级,其中0为最高优先级业务,到达率分别服从参数为 $\lambda_i$ 的泊松分布,各优先级业务比例如表中所示。为了对不同优先级分组进一步区分服务,各个优先级数据包的退避机制不再是二进制指数退避,而是每个优先级分组具有不同的回退窗口和不同的最大回退次数。退避时间设置的总原则是高优先级分组的退避时间和有效期小于低优先级分组。据第二部分介绍,SPMA系统中的节点具有“一发四收”的能力,所以在本文仿真中,通过收包队列建立的处理来体现这一能力,然后据此判断数据包是否被成功接收。此外,由于本文着重于解决现有研究中的阈值设置策略会导致无人机自组网吞吐量波动较大的问题和大规模节点组网情况下数据包冲突加剧的问题,所以针对负载统计值,本文采用通过物理层获取信道负载的方法。具体来说,在统计周期内,节点物理层模块直接将接收数据包数和发出数据包数之和作为信道负载统计值。此方法结果较为准确,可以真实地反应物理信道上的占用情况,并且统计结果时延较小,近似实时。

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数/单位	参数值
仿真场景/km×km	100×100
节点个数/个	50
传输速率/Mbps	5
数据包长/bit	1000
业务优先级数目/个	4
业务优先级比例	1:2:3:4
负载统计周期T/ms	10
仿真时间/s	30
仿真随机seed值	(200,400,600,800)

5.2 仿真结果及分析

5.2.1 优先级阈值设置

首先仿真ALOHA测试场景,随着网络负载的增大,得到传输成功率下降为99%时的网络负载是3.25 Mbps,传输成功率下降为95%时的网络负载是5.45 Mbps。在ALOHA测试场景下,部署的多个节点均采用ALOHA协议的工作模式(即数据不区分优先级随到随发)。然后,得到不同优先级数据包的时延和成功率并与文献[22]的阈值计算方法(即FSPMA)进行对比,结果如图2和图3所示。在本文仿真中,考虑到当数据包超过有效期时不得不丢包,所以成功率的统计不是指发送成功率,而是指接收端成功接收的数据包数除以发送端产生的数据包数。

仿真结果表明,数据传输成功率随着业务量的增大而减小这是由于,一方面在中重业务量的情况下,低优先级分组数据的多次退避会导致其超过有

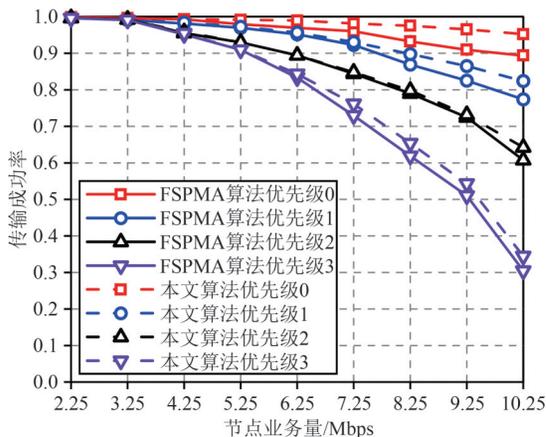


图2 不同计算方法下各优先级业务的传输成功率

Fig. 2 Transmission success rate of each prioritized service with different calculation methods

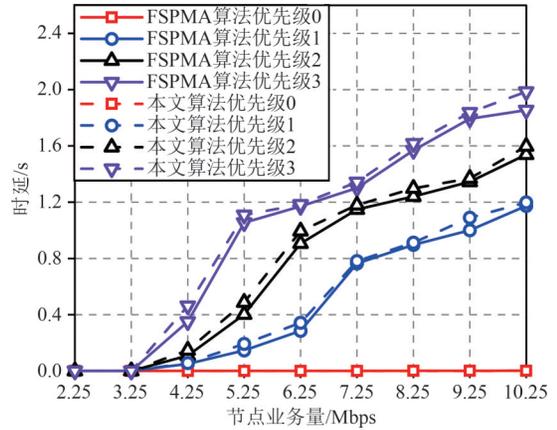


图3 不同计算方法下各优先级业务的时延

Fig. 3 Latency of each prioritized service with different calculation methods

效期而被丢包;另一方面逐渐增加的业务量超过了信道的实际承载能力,低优先级数据帧不断的退避虽然可以将信道负载稳定在一定范围,但网络的随机性仍会使信道负载存在一定的波动,底层数据帧便会产生碰撞。当节点业务量小于3.25 Mbps时,各优先级分组的发送不做控制,传输成功率均不低于99%,时延不高于2 ms。当节点业务量大于3.25 Mbps时,SPMA协议通过负载与阈值的比较,延迟或拒绝低优先级分组的接入,从而保证数据包的发送成功率和负载的稳定。对比使用两种方法时的网络性能,在分组传输成功率方面,本文提出的阈值计算方法优于文献[22]的计算方法,特别是在高业务量情况下尤为明显。具体来说,当节点业务量逐渐增大到10.25 Mbps时,最高优先级数据的传输成功率可达到95.3%提高了约6%,优先级1、2和3数据的传输成功率分别可达到82.4%、64.2%、34.5%,分别提高了约5%、3.5%、4%。在数据时延方面,虽然低优先级分组的时延略微增加,但是可以保证数据在有效期内,并不会影响整个网络的有效运行。具体来说,当节点业务量逐渐增大到10.25 Mbps时,最高优先级数据时延的变化可忽略不计,仍可达到2 ms指标要求;优先级1、2和3数据增加的时延绝大部分时候不会超过100 ms。由此可见,本文提出的方法更能使信道负载保持稳定,在保证数据有效的同时提高了数据的传输成功率,从而提高系统吞吐量。两种计算方法下的系统吞吐量如图4所示。

5.2.2 低优先级概率接入算法

在新的阈值计算方法基础上,本文进一步仿真

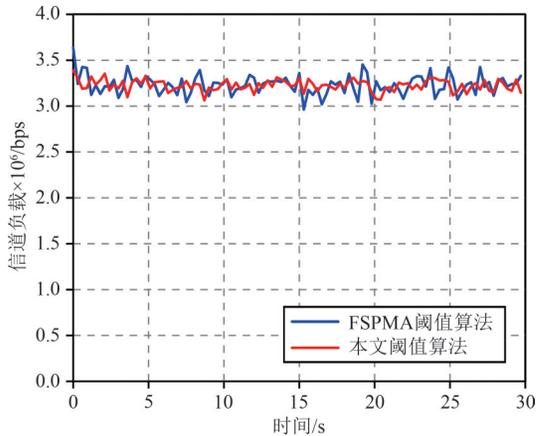


图4 两种阈值计算方法下信道负载统计

Fig. 4 Channel Load Statistics for Two Threshold Calculation Methods

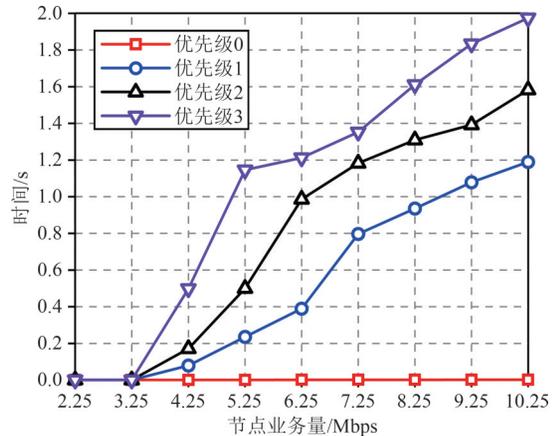


图6 概率接入算法下各优先级分组时延

Fig. 6 Delay of each prioritized service for probabilistic access algorithm

了概率接入算法,每个优先级分组的时延和成功率仿真结果如图5和图6所示。

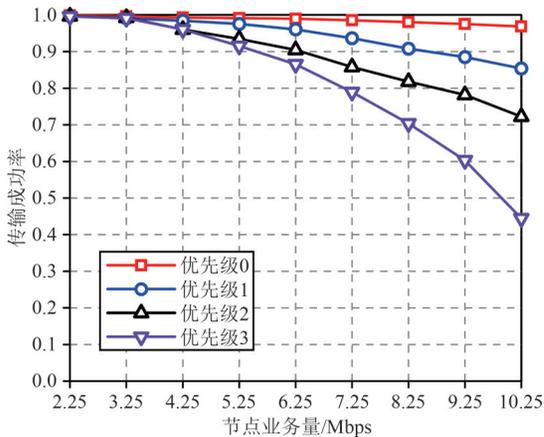


图5 概率接入算法下各优先级分组成功率

Fig. 5 Transmission success rate of each prioritized service for probabilistic access algorithm

结果表明在大规模节点自组网高业务量情况下,概率接入方法不但可以进一步提高传输成功率而且还能保证数据包的低时延性能。具体来说,当节点业务量由3.25 Mbps逐渐增大到10.25 Mbps时,优先级1、2、3业务的传输成功率可分别达到85.3%、72.2%、44.5%;并且最高优先级数据的时延仍可控制在2 ms以内,满足时敏性业务的极低时延需求;而其余优先级业务的时延会略有增加,但都不会超过500 ms。在高业务量的情况下,这对于传输时延是秒级的低优先级数据来说,几乎不会影响其信息的有效性。这是因为SPMA是一种基于负载统计的MAC协议,当统计的负载小于相

应优先级阈值时,节点将此数据包发送至信道。但是在这个过程中,节点并没有考虑网络中其他节点的发送情况。在高业务量的情况下,大量节点会同时发送数据,导致网络负载超过信道最大承受能力,从而引起冲突加剧的情况。此时,通过发送概率的计算将需要传输的低优先级分组进行退避,可以提高信道中数据的发送成功率。另外,虽然对低优先级分组进行了退避,但这使得信道负载更加稳定,冲突情况减少,自组网系统更加高效运行,所以并不会造成低优先级分组时延剧烈的增加。

### 6 结论

本文提出了一种SPMA协议新的阈值算法和低优先级数据概率接入信道算法。新的阈值算法考虑到了网络随机性对高优先级数据传输的影响,通过对信道资源利用率和传输性能的权衡考虑,重新确定了最高优先级阈值和中间优先级阈值算法。低优先级数据概率接入信道算法通过分析SPMA协议流程和M/G/1排队模型,根据节点单位时间发送概率计算得到,在保证吞吐量的同时提高了数据传输成功率。仿真结果表明,本文提出策略可降低高负载下数据包之间的冲突,提高时敏性业务的传输性能。

### 参考文献

[1] FENG Qiang, LIU Meng, DUI Hongyan, et al. Importance measure-based phased mission reliability and UAV number optimization for swarm[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 223: 108478.

- [2] WANG Haijun, ZHAO Haitao, ZHANG Jiao, et al. Survey on unmanned aerial vehicle networks: A cyber physical system perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 1027-1070.
- [3] 赵海涛, 高士顺, 王海军, 等. 无人机自主通信和组网能力评估方法[J]. *通信学报*, 2020, 41(8): 87-98. ZHAO Haitao, GAO Shishun, WANG Haijun, et al. Evaluation method for autonomous communication and networking capability of UAV[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 87-98. (in Chinese)
- [4] 孙士勇, 归琳, 朗修璞, 等. 面向低时延业务的无人机自组织网络接入协议研究[C]. 2021年无人系统高峰论坛(USS 2021), 2021. SUN Shiyong, GUI Lin, LANG Xiupu, et al. Research on UAV ad hoc network access protocol for low delay service [C]. 2021 Unmanned Systems Summit Forum (USS 2021), 2021. (in Chinese)
- [5] CHENG Pan, YANG Xin, WANG Dawei, et al. An outage-probability-aware MAC protocol for UAV-assisted networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(11): 12251-12262.
- [6] WANG Haijun, JIANG Bo, ZHAO Haitao, et al. Joint resource allocation on slot, space and power towards concurrent transmissions in UAV ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(10): 8698-8712.
- [7] CHO A R, YUN C, LIM Y K. Performance analysis of BTB-TDMA considering asymmetry of propagation delays in UANets [J]. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 2015, 19(1): 50-60.
- [8] 周逊, 李其超, 宋威威, 等. 一种高效低时延的无人机自组网多跳TDMA协议[J]. *光通信研究*, 2019(4): 55-60. ZHOU Xun, LI Qichao, SONG Weiwei, et al. An efficient and low delay multi-hop TDMA access protocol for unmanned aerial vehicle ad hoc networks [J]. *Study on Optical Communications*, 2019(4): 55-60. (in Chinese)
- [9] ZHENG Zhichao, JIANG Shengming, FENG Ruoyu, et al. An adaptive backoff selection scheme based on Q-learning for CSMA/CA [J]. *Wireless Networks*, 2023, 29(4): 1899-1909.
- [10] NGUYEN T T, OH H. SCSMA: A smart CSMA/CA using blind learning for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(12): 10981-10988.
- [11] BAEK H, LIM J. Time mirroring based CSMA/CA for improving performance of UAV-relay network system [J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(4): 4478-4481.
- [12] CLARK S M, HOBACK K A, ZOGG S J F. Statistical priority-based multiple access system and method: US7680077[P]. 2010-03-16.
- [13] 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.
- [14] 王希洋. 基于统计优先级的数据链MAC协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017. WANG Xiyang. Research on statistical priority-based MAC protocol for data link [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [15] 郑文庆, 金虎, 郭建蓬, 等. 基于信道占用及优先级的MAC协议退避算法[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(11): 80-84, 116. ZHENG Wenqing, JIN Hu, GUO Jianpeng, et al. Back-off algorithm for MAC protocol based on channel occupancy and priority [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(11): 80-84, 116. (in Chinese)
- [16] GE Zhibin, ZHANG Wenbo, HAO Ying, et al. Window adaptive backoff algorithm basing on statistical priority-based multiple access protocol [C]//2021 2nd International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction (ICHCI). Shenyang, China. IEEE, 2022: 171-174.
- [17] SUN Fang, LI Xupeng, ZHANG Feng. Study on SPMA protocol and algorithm improvement [C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China. IEEE, 2022: 204-209.
- [18] 李志林. 面向高时敏业务的统计优先级多址接入技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019. LI Zhilin. Research on statistical priority-based multiple access technology for high time-sensitive services [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [19] 陈少峰. 基于SPMA协议的混合式信道负载统计方法[J]. *现代导航*, 2017, 8(1): 42-47. CHEN Shaofeng. Hybrid channel load statistical method based on SPMA protocol [J]. *Modern Navigation*, 2017, 8(1): 42-47. (in Chinese)
- [20] 张彦晖, 吕娜, 缪竞成, 等. 基于循环神经网络的SPMA协议信道状态智能检测改进算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(3): 735-744. ZHANG Yanhui, LYU Na, MIAO Jingcheng, et al. Improved intelligent detection algorithm for SPMA protocol channel state based on recurrent neural network [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(3): 735-744. (in Chinese)
- [21] FANG Zheng, ZHENG Bo, ZHAO Wei, et al. A novel statistical multi-channel busy recognition mechanism in

the MAC layer for airborne tactical networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19662-19667.

- [22] 任智, 杨迪, 胡春, 等. 一种低时延无人机自组网阈值自适应接入协议[J]. 光通信研究, 2020(4): 74-78.  
REN Zhi, YANG Di, HU Chun, et al. An low-delay threshold adaptive access protocol for unmanned aerial vehicle ad hoc networks[J]. Study on Optical Communications, 2020(4): 74-78. (in Chinese)
- [23] 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). Chengdu, China. IEEE, 2018: 30-35.

#### 作者简介



王 洁 女, 1999年生, 重庆人。国防科技大学电子科学学院硕士研究生, 主要研究方向为无人机自组网低时延 MAC 协议设计。

E-mail: Wangj\_0320@163.com



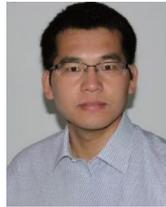
王海军 男, 1993年生, 安徽淮北人。国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向为无人机通信和组网。

E-mail: haijunwang14@nudt.edu.cn



张晓瀛 女, 1980年生, 湖南长沙人。国防科技大学电子科学学院教授, 主要研究方向为无线信道建模、宽带无线通信。

E-mail: zhangxiaoying@nudt.edu.cn



赵海涛 男, 1981年生, 山东昌乐人。国防科技大学电子科学学院教授, 主要研究方向为认知无线网络和自组织网络。

E-mail: haitaozhao@nudt.edu.cn



张 姣 女, 1990年生, 湖南汨罗人。国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向为边缘计算和无人机组网。

E-mail: zhangjiao16@nudt.edu.cn



刘潇然 男, 1992年生, 河南洛阳人。国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向为无线通信信号处理、多载波波形设计和智能通信技术。

E-mail: liuxiaoran10@nudt.edu.cn

(责任编辑: 刘建新)