doi:10.11887/j.cn.201802024 http://journal.nudt.edu.cn

动态服务质量的多信道媒体接入控制传输机制*

原 源[1,2],曹先彬[1],范梅梅[3]
(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191;
2. 中国人民解放军95801部队,北京 100843;3. 空军装备研究院六所,北京 100081)

摘 要:针对航空自组网在高负载下的服务质量及时延问题,提出一种动态服务质量的多信道媒体接入控制传输机制。以多信道检测统计为平台,结合优先级机制,通过在高负载网络中适当遏制低优先级业务,并且进行网络流量优化,保证高优先级业务的低时延发送;同时利用流量预测模型估计网络流量,通过粒子群优化算法进行优化,寻找合适的优先级门限值,确保高优先级业务接入率。通过计算机仿真可知,所设计的动态服务质量的多信道媒体接入控制传输机制,可在大负载网络中动态控制信道的接入,保持良好的网络吞吐量,其高优先级业务接入率达到99%以上,能有效解决航空数据链网络高业务量导致的服务质量及时延问题。

关键词:优先级;阈值;预测;粒子群算法
中图分类号:TN915 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)02-150-06

Multi-channel MAC transmission mechanism based on dynamic QoS

YUAN Yuan[1,2], *CAO Xianbin*[1], *FAN Meimei*[3]
(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. The PLA Unit 95801, Beijing 100843, China;
3. No. 6 Institute, Air Force Equipment Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the QoS(quality of service) and delay problems of aeronautic Ad Hoc network under high load, a DQM transmission mechanism was proposed(dynamic QoS of multi-channel MAC). On the basis of multi-channel detection statistics and the priority mechanism, the DQM optimized the network traffic via shutting down the low-priority traffic in the high-load network timely to ensure the low-latency transmission of high-priority traffic. The traffic prediction model was used to estimate the network traffic. Combined the particle swarm optimization algorithm, the DQM could find the optimal priority threshold and guarantee the access rate of high-priority services. Simulation results prove that the DQM maintains an optimized network traffic by adaptively controlling channel access in high-load network. Thus, the access rate of high-priority services reaches above 99%, which helps to solve the QoS and latency issues associated with high traffic in the air data link.

Key words: priority; threshold; prediction; particle swarm optimization

航空自组网属于移动Ad Hoc网络的一种形式,不仅具有移动Ad Hoc网络的特点,如多跳、无中心等特点,也具有网络自身的特殊性。

在航空自组网中,单跳通信半径可达数百公里,在网络分布广阔的地域上,甚至可能建立在洲际的范围上。同时,由于飞机的飞行是在三维空间内完成的,因此该网络具有三维的特性。另外,军用飞机速率的变化范围很大,最高速可达1191 m/s,故航空节点的高速移动会造成网络拓扑的快速变化,从而对网络连通性、媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议、路由协议等方面产生严重影响。在航空自组网中,由于场景广阔,而且节点稀少,导致节点密度小,可能出现网络不连通的情况,因此其组网可行性和网络连通性是研究的首要问题。

航空自组网采用分布式组网,无中心节点,功率、带宽相对有限,节点移动性强,这些特点使得它很难支撑有效的服务质量(Quality of Service, QoS),且随着网络负载的逐渐提升,吞吐量、QoS、时延等问题愈发突出[1-4]。

文献[5-6]分别从公平性和优先级方面对信道竞争机制进行改进,针对性降低了部分时延。

* **收稿日期**:2017-01-05
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61401499)
作者简介:原源(1980—),女,河南林州人,博士研究生,E-mail:Luna_369@163.com;
曹先彬(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xbcao@buaa.edu.cn

然而在业务高负载、节点高密度网络中,当流量超过网络容量限定时,上述 MAC 协议不能有效避免流量冲突碰撞,发生信道堵塞现象,影响传输的实时性,最终导致重要信息无法正常传送。

由于网络的动态性,业务负载会发生动态变化,不同优先级业务的竞争能力将直接影响网络吞吐量以及业务的 QoS,在感知网络负载变化的条件下,寻找最优的优先级竞争机制,才能最大化网络性能。

文献[7]采用流量预测,在网络拥塞之前更新路由路径,实现网络低丢包率,降低了端到端时延及路由开销。文献[8]采用粒子群优化算法,设计符合系统的适应度目标函数,寻求最优的性能参数,优化系统性能。

为了有效解决航空 Ad Hoc 网络工作于高业务量时所存在的 QoS 下降及时延问题,本文首先在统计优先级多址接入(Statistic Priority-based Multiple Access, SPMA)[9]协议思想基础上,通过结合流量预测及粒子群优化算法,提出一种基于 QoS 的 MAC 优化策略,即一种动态 QoS 的多信道 MAC 传输机制(Dynamic QoS of multi-channel MAC, DQM)。

1　流量预测及粒子群优化

1.1　模糊神经网络流量预测

T-S(Takagi-Sugeno)模糊系统[10]具有很强的自适应、自学习能力,能够自动修正模糊子集的隶属度函数。当规则为 R^i,模糊推理如下:

$$R^i\text{: If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \cdots, x_k \text{ is } A_k^i$$
$$\text{Then } y_i = p_0^i + p_1^i x_1 + \cdots + p_k^i x_k$$

其中:A_j^i 为模糊集;P_j^i 为模糊参数($j=1,2,\cdots,k$);y_i 为模糊输出。由于输出是确定的,输入是模糊的,这表明该模糊推理是输出与输入的线性组合关系,该推理可根据实际需求进行修正。

首先,根据模糊规则对输入量 $\boldsymbol{x}=[x_1, x_2, \cdots, x_k]$ 计算各值隶属度,如式(1)所示。

$$\mu_{A_j^i} = \exp(-(x_j - C_j^i)^2 / b_j^i) \quad j=1,2,\cdots,k \quad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中:c_j^i 为隶属度函数的中心;b_j^i 为隶属度函数宽度;k 为输入参数的个数;n 为模糊子集的个数。

其次,分别进行模糊计算,将连乘算子作为模糊算子,如式(2)所示。

$$\omega^i = \mu_{A_j^1}(x_1) \cdot \mu_{A_j^2}(x_2) \cdot \cdots \cdot \mu_{A_j^k}(x_k) \quad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

最后,通过模糊计算所得到的结果来计算模糊模型的输出值 y_i,如式(3)所示。

$$y_i = \sum_{i=1}^{n} \omega^i (p_0^i + p_1^i x_1 + \cdots + p_k^i x_k) / \sum_{i=1}^{n} \omega^i \tag{3}$$

T-S 模糊神经网络主要由输入层、模糊化处理层、模糊规则计算层以及输出层组成。输入向量 $\boldsymbol{x}_i$ 直接连接输入层,输入向量的维数应该与节点数一致。模糊化处理层采用式(3)处理输入值,得到模糊隶属度值 μ。模糊规则计算层采用式(2)计算得到 ω。输出层采用式(3)计算得到模糊神经网络的输出值。

综上所述,模糊神经网络的算法具体分为以下步骤。

1)误差计算

$$e = \frac{1}{2}(y_d - y_c)^2 \tag{4}$$

式中:y_d 为模糊神经网络的期望值;y_c 是网络的实际值;e 为期望值与实际值的误差。

2)系数修正

$$p_j^i(k) = p_j^i(k-1) - \alpha \frac{\partial e}{\partial p_j^i} \tag{5}$$

$$\frac{\partial e}{\partial p_j^i} = (y_d - y_c)\omega^i / \sum_{i=1}^{m} \omega^i x_j \tag{6}$$

式中:p_j^i 为网络系数;α 为网络学习率;x_j 为输入参数;ω^i 为输入参数隶属度连乘积。

3)参数修正

$$c_j^i(k) = c_j^i(k-1) - \beta \frac{\partial e}{\partial c_j^i} \tag{7}$$

$$b_j^i(k) = b_j^i(k-1) - \beta \frac{\partial e}{\partial b_j^i} \tag{8}$$

式中,c_j^i 为隶属度函数中心,b_j^i 为隶属度函数宽度。

DQM 涉及的模糊神经网络是单步流量预测,采用单输入单输出结构,故而本文根据模糊神经网络进行相应简化,如图 1 所示,模型算法进行简化设计,如式(9)~(15)所示。

$$\mu_i(x) = \exp[-(x - c_i)^2 / 2b_i^2] \tag{9}$$

$$y_c = \sum_{i=1}^{n} \mu_i p_i / \sum_{i=1}^{n} \mu_i \tag{10}$$

$$e = \frac{1}{2}[y_d(t) - y_c(t)]^2 \tag{11}$$

$$p_i(t) = p_i(t-1) - \alpha \frac{\partial e}{\partial p_i} \tag{12}$$

$$\frac{\partial e}{\partial p_i} = (y_d - y_c)\omega^i / \sum_{i=1}^{m} \omega^i x \tag{13}$$

$$c_i(t) = c_i(t-1) - \beta \frac{\partial e}{\partial c_i} \tag{14}$$

$$b_i(t) = b_i(t-1) - \beta \frac{\partial e}{\partial b_i} \qquad (15)$$

式中：x 为输入参数；c_i 为隶属度函数中心；b_i 为隶属度函数宽度；p_i 为系统参数；y_d 为网络的期望输出值，y_c 网络的实际输出值；n 为模糊子集数；α、β 为网络学习率。

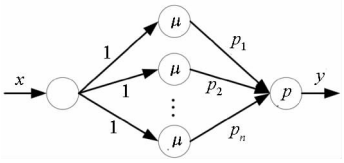


图 1 简化模型结构

Fig. 1 Simplified model structure

为检验预测算法的性能，利用自相似流量模型产生 4096 个流量数据，前 1000 个流量数据作为训练数据，对预测模型进行训练修正，以便对后 3096 个数据进行预测，且预测过程中不断修正预测参数，保证预测的准确性及跟踪性。仿真结果如图 2 所示，经过训练数据对模型参数修正以及预测过程中的参数自我修正，预测曲线与真实曲线具有较高的拟合度，能够真实反映流量数据。

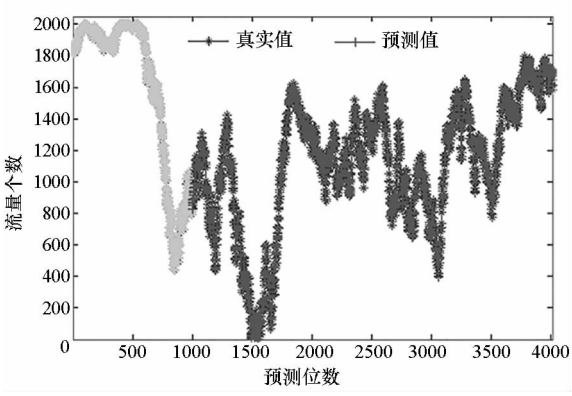
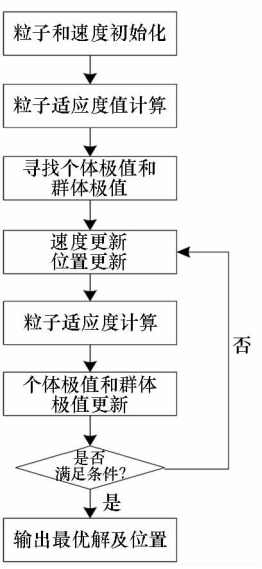


图 2 流量预测

Fig. 2 Traffic prediction

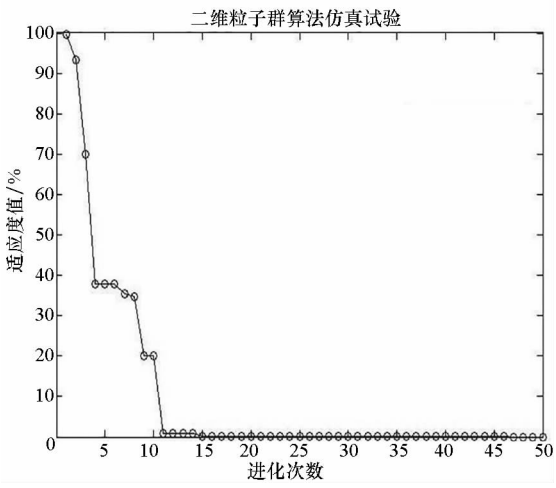
1.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法[11-12]（Particle Swarm Optimization，PSO）在可解空间中对一群粒子进行初始化，每个粒子都表示一个潜在的极值优化问题的最优解，该粒子特征用适应度值、速度、位置三项指标表示，粒子优劣由适应度值表征。本文算法：在解空间中，粒子进行运动，通过对个体极值 Pbest 和群体极值 Gbest 进行分析，来对个体位置进行更新。当粒子位置更新时，必须对适应度值进行相应更新，同时对新粒子的适应度值、个体极值和群体极值进行比较，然后更新 Pbest 和 Gbest 及其位置。经实验仿真证明，进化（迭代）十次以上时，算法即可快速收敛至稳定值，可见该算法收敛性强，且能够快速寻优。算法流程及收敛性仿真曲线如图 3 所示。



（a）算法流程

（a）Algorithm flow



（b）算法收敛性

（b）Algorithm convergence

图 3 PSO 算法

Fig. 3 PSO Algorithm

2 DQM 协议

DQM 进行业务优先等级的分类，当网络发生过载问题时，通过控制优先级阈值与对比信道占用统计，遏制优先级较低业务，优先发送高优先级业务；当网络状态为改善后，处理低优先级业务。采用多信道收发机制，降低碰撞率及丢包率。

各个优先级所对应的发送判别门限，称之为业务优先级阈值；对预定周期内道上脉冲进行累计，其数量称之为信道占用统计，在预定周期结束时，将其清零。

协议流程如图 4 所示，检测各优先级业务队

列;有数据时取出较高优先级队列数据(无数据时持续检测);进行过期判断,若没有过期,则将信道占用统计与其优先级阈值进行比较(过期则丢弃);如果有低于优先级阈值的信道,则选择占用统计最低的信道发送数据;进入下一轮队列检测及数据处理;如果没有符合条件(高于阈值)的传输信道,则使该业务数据等待一个回退间隔,按照以上流程再次进行计算。

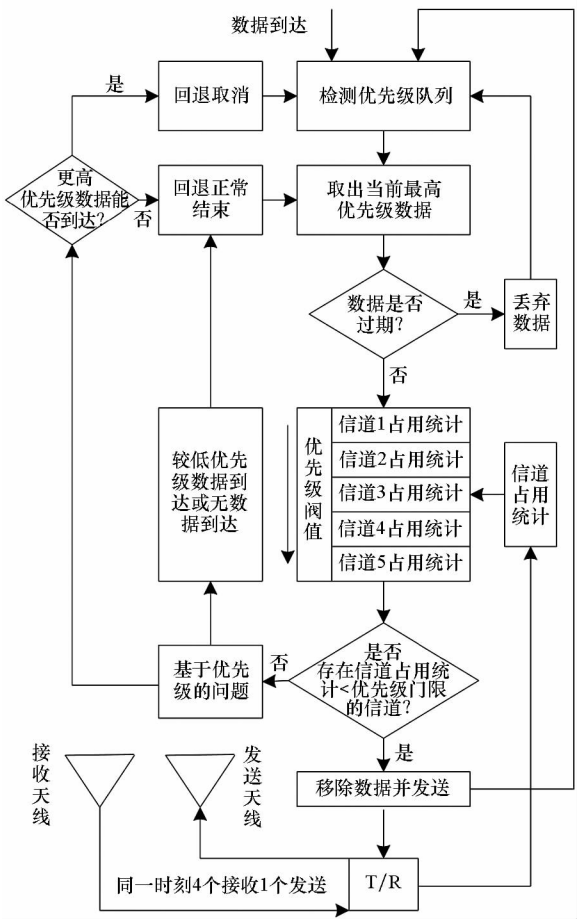


图 4　DQM 协议流程

Fig. 4　Flow chart of DQM

协议运作中,每隔五个预定周期,采用流量预测模型预知下一时段的流量,再利用粒子群优化算法寻找符合既定 QoS 的优先级门限,并导入更新优先级阈值,使系统性能最优。系统启动前利用以往网络流量数据训练模糊神经网络,系统启动后,在每十个预定周期内,利用当前流量统计训练模糊神经网络,保证流量估计的准确性及跟踪性。

此优先级发送机制可按照优先等级进行业务的分类发送,满足数据使用的客观需求,同时保证网络适当的吞吐量。

3　仿真分析

以 Exata[13] 为仿真平台,测试 DQM 协议的性能,如图 5 所示。按照航空自组网的特点,设置不同优先级的 4 组业务流,分别是业务优先级为 3 的①－⑥数据流,业务优先级为 2 的②－⑦数据流,业务优先级为 1 的③－⑧数据流,业务优先级为 0 的④－⑤数据流,共用五个信道,0 代表最高优先级。根据实际需求,设定业务流比例,设总业务流量为 M,仿真中①－⑥数据流量为 $0.2M$,②－⑦ 数据流量为 $0.2M$,③－⑧数据流量为 $0.5M$,④－⑤数据流量为 $0.1M$。

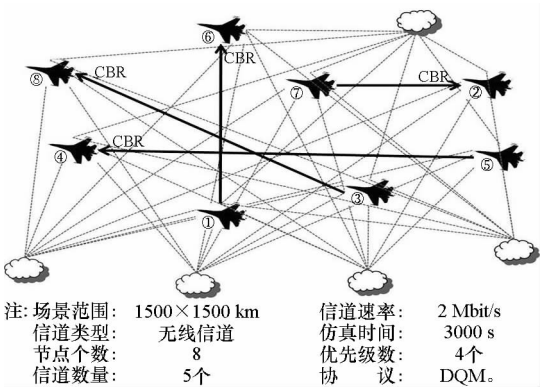


图 5　三维仿真场景

Fig. 5　3D simulation scenes

网络业务量 M 在 3000 s 的仿真时间内,每秒从 0 ~ 20(Mbit/s)之间选择一个值作为下一周期的网络总流量,在协议作用下进行数据统计。仿真结束后,依据 M 值大小将数据进行分类,并计算平均值得到 20 组数据,即得到业务量由低载到过载的发包率及吞吐量变化趋势。仿真中使用 DQM、SPMA 两种协议,前者采用预测优化算法,动态更新优先级阈值;后者采用固定优先级阈值,其值取 DQM 性能全局最优,即 DQM 在 M 为 10 Mbit/s时的优先级阈值。

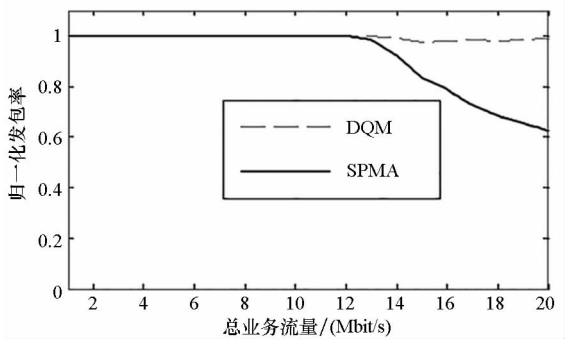
仿真中业务 QoS 设置为两种:A 方案是 0 优先级业务达到 99% 的发包率;由于信道环境及编码技术等影响,为了保证通信的可靠性,业务总吞吐率低于 90%;B 方案是 0 优先级业务达到 99% 的发包率,由于信道环境及编码技术等影响,为了保证通信的可靠性,业务总吞吐率低于 85%。

3.1　归一化发包率

高优先级业务发包率仿真结果如图 6 所示,DQM 协议保持在 90% 以上。当负载较小的时候,高优先级业务的发包率接近 100%;当网络负载逐渐变大的时候,高优先级业务发包率出现小幅降低,但仍维持在 90% 以上,0 优先级业务维持 99% 基本不变,1 优先级业务发包率最多降低到 90%。由此可知,在过载情况下,通过对遏制低优

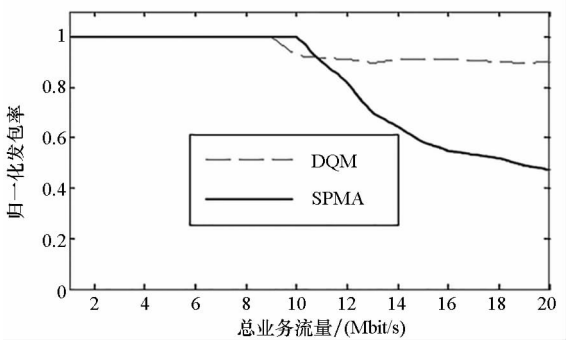
先级业务,满足 QoS,最大限度地保证了高优先级业务时限要求。

从图 6 还可看出,负载较低时,两个协议的仿真曲线基本重合,维持高发包率。随着负载增大,DQM 发包率明显高于 SPMA,而且优先级越高,发包率越高,如图 6 所示,DQM 下的 0、1 优先级业务发包率较高,且稳定性好;而 SPMA 下的 0、1 优先级业务发包率下降幅度较大,这说明 DQM 对高优先级业务作用明显,更好地保证了高优先级业务的实时性。



(a) 0 优先级业务发包率

(a) Packet delivery fraction of priority 0



(b) 1 优先级业务发包率

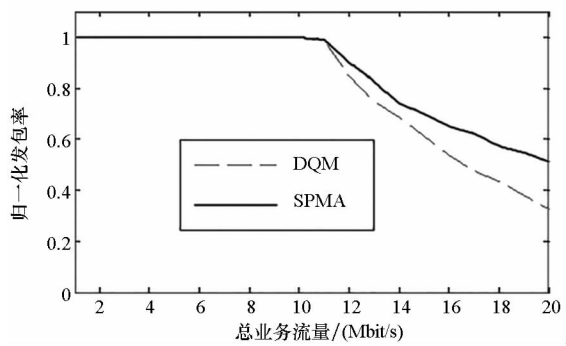
(b) Packet delivery fraction of priority 1

图 6 A 方案高优先发包率

Fig. 6 High priority packet delivery fraction of A scheme

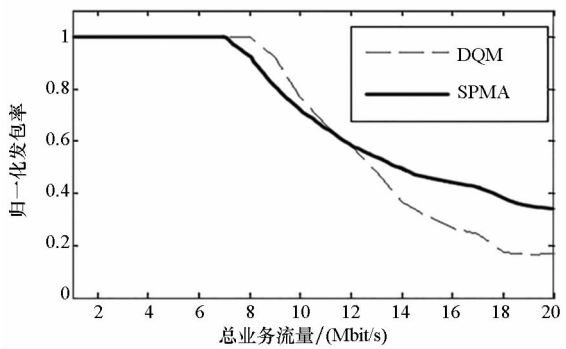
低优先级业务发包率仿真结果如图 7 所示。当负载较轻的时候,低优先级业务的发包率接近 100%,随着负载逐渐变大及 QoS 要求,低优先级业务发包率逐渐降低,如图 7 所示,DQM 下的 2、3 优先级业务发包率最低值于 SPMA 下 2、3 优先级业务发包率。对比图 6,PQM 牺牲低优先级业务换取高优先级业务,这说明 DQM 通过对低优先级业务的截流遏制,维持良好的网络负载,在满足 QoS 的同时更加有效地保证了高优先级业务的低时延性能。

从图 6 ~ 7 可以看出,DQM 能够满足业务 QoS 要求,有效地保持了 0 优先级业务达到 99% 的发包率,1 优先级业务达到 90% 的发包率,性能



(a) 2 优先级业务发包率

(a) Packet delivery fraction of priority 2



(b) 3 优先级业务发包率

(b) Packet delivery fraction of priority 3

图 7 A 方案低优先级发包率

Fig. 7 Low priority packet delivery fraction of A scheme

优于 SPMA。仿真验证得到方案 A 中 DQM 性能仍优于 SPMA。

3.2 归一化总吞吐量

业务量由低负载到严重过载过程中的总吞吐量曲线如图 8 所示。低负载时,DQM 及 SPMA 随着负载的增加,总吞吐量曲线快速升高,负载达到 11 时开始平缓,至 20 时曲线仍趋于平缓,由此可知,两个协议间的优势明显,当网络发生超载问题时,不会即刻发生堵塞,同时通过信道占用情况分析来有效地控制优先级较低的业务数据发送,进而保证优先级较高业务的有效传输。

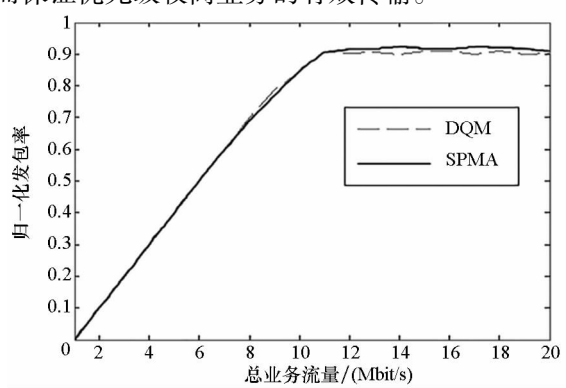


图 8 A 方案负载与吞吐量曲线

Fig. 8 A scheme performance curve of load-throughput

从图 8 还可以看出,负载 10 Mbit/s 以内,两者曲线基本吻合;负载超过 10 Mbit/s 后,DQM 吞吐量维持在 91% 基本不变,SPMA 维持在 92% 基本不变,两者差距甚小。这说明 DQM 利用很小的代价,使得高优先级业务的低时延和高发包率得到更加可靠的保证。DQM 能够满足业务 QoS 要求,有效保持业务总吞吐率达到 90% 以上。

图 9 为方案 B 吞吐量曲线,对比图 8,无论哪种 QoS 方案,DQM 始终能够将总吞吐率保持在 QoS 要求范围左右,同时最大化吞吐率,相反,SPMA 不能满足,仅能最大化吞吐率。这是由于 DQM 采用动态机制更新优先级门限,能更好地适应通信负载的变化,实时满足 QoS。

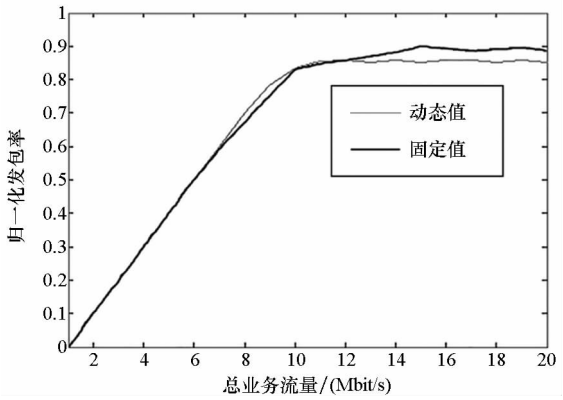


图 9　B 方案负载与吞吐量曲线

Fig. 9　B scheme performance curve of load-throughput

4　结论

在业务高负载、节点高密度的航空数据链网络中,结合模糊神经网络流量预测模型、粒子群优化算法,DQM 动态的更新优先级门限,高负载时通过截流低优先级业务,确保了高优先级业务发送的低时延和高发包率,同时保证了网络吞吐量的最大化,有效地避免了拥塞。通过计算机仿真实验表明,模糊神经网络与粒子群优化算法收敛性能良好,能够很快地完成迭代计算,满足网络流量的实时性和各业务 QoS 要求。由此可见,所提 DQM 能够更好地保证通信 QoS 要求,较 SPMA 协议性能优越。本文中流量预测的准确性直接关系到参数性能优化的精确性,因此如何寻找最优的流量预测方案将是后续工作的研究重点。

参考文献(References)

[1] Jurdak R, Lopes C V, Baldi P. A survey classification and comparative analysis of medium access control protocols for Ad Hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(1): 2 – 16.

[2] 张棋飞. 无线自组织网络路由及 MAC 协议关键技术研究[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 2012.
ZHANG Qifei. Key techniques of routing and MAC protocal in the wireless self-organized network [M]. Wuhan: Hubei People's Publishing House, 2012. (in Chinese)

[3] 吕娜, 杜思深. 数据链理论与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
LYU Na, DU Sishen. Theory and system of data link[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2011. (in Chinese)

[4] 骆光明, 杨斌. 数据链——信息系统连接武器系统的捷径[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
LUO Guangming, YANG Bin. Data link—the shortcut between information system and weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

[5] 张国鹏, 张海林, 赵力强. WLAN 中基于协作博弈的比例公平性带宽分配机制[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(1): 87 – 93.
ZHANG Guopeng, ZHANG Hailin, ZHAO Liqiang. Cooperative game theoretic bandwidth sharing scheme for proportional fairness in WLAN [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(1): 87 – 93. (in Chinese)

[6] 李楠, 蔡越民, 程乃平. Ad Hoc 网络中一种具有优先控制的自适应协同 MAC 协议[J]. 信号处理, 2011, 27(3): 450 – 455.
LI Nan, CAI Yuemin, CHENG Naiping. An adaptive cooperative MAC with priority for Ad Hoc networks[J]. Signal Processing, 2011, 27(3): 450 – 455. (in Chinese)

[7] 沙毅, 闫星星, 唐逊. 基于流量预测的 Ad Hoc 网络负载均衡协议[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1403 – 1406.
SHA Yi, YAN Xingxing, TANG Xun. Load balancing routing protocol based on traffic prediction for Ad Hoc network [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2012, 33(10): 1403 – 1406. (in Chinese)

[8] 刘芳, 孙芸, 杨庚, 等. 基于粒子群优化算法的社交网络可视化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(1): 37 – 43.
LIU Fang, SUN Yun, YANG Geng, et al. Visualization of social network based on particle swarm optimization [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(1): 37 – 43. (in Chinese)

[9] Stephen M, Clark K A, Hoback S J, et al. Statistical priority-based multiple access: US[P]. 768077, 2010 – 03 – 16.

[10] Lian R J. Adaptive self-organizing fuzzy sliding-mode radial basis-function neural network controller for robotic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1493 – 1503.

[11] Xiang T, Liao X F, Wong K W. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(2): 1637 – 1645.

[12] 李丽, 牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
LI Li, NIU Ben. Particle swarm optimization algorithms[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. (in Chinese)

[13] 徐以标, 王兴建, 尹建月. 基于 Exata 的网络通信协议仿真[J]. 计算机与数字工程, 2014(11): 2212 – 2216.
XU Yibiao, WANG Xingjian, YIN Jianyue. Simulation of network communication protocols based on Exata [M]. Computer & Digital Engineering, 2014(11): 2212 – 2216. (in Chinese)