

VDL 模式 2 系统媒介访问控制协议建模

刘海涛,董沁卓,戴永璋

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津 300300)

摘要: 甚高频数据链(VDL, VHF data link)模式 2 系统是民用航空空中交通管理(ATM, air traffic management)系统的重要基础设施。未来 ATM 系统将采用基于四维航迹的空域运行(TBO, trajectory-based operations)模式,该模式对 VDL 模式 2 系统提出了更高的要求。为提升 VDL 模式 2 系统的性能,本文基于优化网络工程工具(OPNET, optimized network engineering tools)构建了其媒介访问控制协议的仿真模型,该协议采用 p -坚持载波侦听多路访问(p -CSMA, p -persistent carrier sense multiple access)机制。通过仿真实验,系统分析了坚持参数 p 对系统吞吐量、传输时延和丢帧率的影响规律。研究表明:坚持参数 p 对上述 3 项性能指标具有显著影响,且三者之间存在明显的权衡关系;通过合理选取 p 值,可在实现较高吞吐量的同时,保持较低的传输时延和丢帧率,从而满足 TBO 运行对通信可靠性与实时性的要求。

关键词: 航空数据链; VDL 模式 2 系统; 媒介访问控制; 优化网络工程工具(OPNET)建模

中图分类号: V355; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0080-06

Modeling the medium access control protocol of VDL Mode 2

LIU Haitao, DONG Qinzhao, DAI Yongzhang

(Tianjin Key Laboratory of Intelligent Signal and Image Processing, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: VHF Data Link (VDL) Mode 2 is a critical infrastructure of the civil aviation air traffic management (ATM) system. The future ATM system will adopt the trajectory-based operations (TBO) paradigm, which imposes more stringent requirements on VDL Mode 2. To enhance the performance of VDL Mode 2, this paper develops a simulation model of its medium access control (MAC) protocol using the optimized network engineering tools (OPNET). The protocol employs the p -persistent carrier sense multiple access (p -CSMA) mechanism. Through extensive simulations, the influence of the persistence parameter p on system throughput, transmission delay, and frame loss rate is systematically analyzed. The results show that p has a significant impact on these three performance metrics, and a clear trade-off exists among them. By appropriately selecting the value of p , it is possible to achieve high throughput while maintaining low transmission delay and frame loss rate, thereby satisfying the reliability and real-time communication requirements of TBO operations.

Key words: aeronautical data link; VDL Mode 2; medium access control; optimized network engineering tools (OPNET) modeling

随着全球航空运输业快速发展与空域资源日趋稀缺之间的矛盾日益突出,美国和欧洲分别规划并实施了各自的下一代空中交通管理(ATM, air traffic management)系统^[1-2]。目前,国际民航界已达成共识:下一代 ATM 系统将采用基于四维航迹的空域运行(TBO, trajectory-based operations)模式^[3]。TBO 以飞机四维航迹为基础,在空管部门、航空公司与飞机之间共享航迹信息,支持飞行员与地面之间的航迹协商与时间约束协商,从而实现对飞行轨迹和间隔的精确控制,

保障飞行安全并提升运行效率。相比现有管制技术, TBO 可提高飞行灵活性与空域利用率,减少航班延误,并降低二氧化碳排放^[4-5]。

TBO 的实施对民航空地数据链系统提出了全新挑战,为满足其高要求,优化空地数据链系统性能具有重要意义^[6]。近年来,围绕甚高频数据链(VDL, VHF data link)模式 2 系统的研究主要集中在 3 个方面:物理层设计与优化^[7-9]、协议栈测试与优化^[10-12]、系统建模与性能分析^[13-15]。文献[7]提出一种 VDL 模式 2 系统功

率控制机制,通过控制传输功率提升频谱效率并缓解信道拥塞;文献[8]提出基于幅度相位键控(AMPSK, amplitude phase shift keying)的调制方案,在频谱效率和抗放大器非线性失真能力方面优于 VDL 模式 2 系统现行的差分八相相移键控(D8PSK, differential 8-phase shift keying)调制;文献[9]设计了一种高线性动态接收前端,解决了 VDL 模式 2 系统接收机前端因信号强度变化而导致的信道失真问题;文献[10]围绕 VDL 模式 2 系统通信协议栈的一致性展开研究,设计并验证了相应测试系统;文献[11]提出一种基于信号与干扰噪声比的 VDL 模式 2 系统切换判决方法,有效降低了被动切换比例,提升了系统性能;文献[12]利用 VDL 模式 2 系统模型,仿真评估了现有传输协议在支持管制员与飞行员数据链通信(CPDLC, controller pilot data link communication)等关键业务中的性能瓶颈;文献[13]基于优化网络工程工具(OPNET, optimized network engineering tools)构建了 VDL 模式 2 系统,分析了平均时延与飞机数量的关系,以及吞吐量和信道效率与负载的关系;文献[14]研究了 VDL 模式 2 系统数据包发送成功概率和系统吞吐量随负载的变化规律;文献[15]仿真评估了 VDL 模式 2 系统承载 CPDLC 业务的性能。

尽管已有大量研究,但 VDL 模式 2 系统媒介访问控制(MAC, medium access control)协议中坚持参数 p 对吞吐量、传输时延及丢帧率的具体影响尚不明确。针对该问题,本文依据国际民用航空组织(ICAO, International Civil Aviation Organization)发布的 VDL 模式 2 系统技术规范^[6],基于 OPNET 构建了其 MAC 协议的仿真模型,系统研究了坚持参数 p 对上述 3 项性能指标的影响。

本文的主要贡献如下:①依据 VDL 模式 2 系统技术规范,设计并实现了其 MAC 协议的 OPNET 仿真模型;②通过仿真实验,分析了坚持参数 p 对吞吐量、传输时延及丢帧率性能的影响。研究成果为四维航迹运行模式下 VDL 模式 2 系统的优化奠定了基础。

1 VDL 模式 2 系统

1.1 VDL 模式 2 系统概述

VDL 模式 2 系统是 ICAO 于 1997 年制定的工作于民航甚高频频段(118~136.975 MHz)的空地数据链系统,主要用于机载与地面电子设备间的高速数据通信^[6]。系统采用 D8PSK 调制,码元速率为 10 500 Bd,传输带宽为 25 kHz;MAC 层采用 p -坚持载波监听多

路访问(p -CSMA, p -persistent carrier sense multiple access)协议;数据链路层采用航空甚高频链路控制(AVLC, aviation VHF link control)协议;空地链路间采用可交换虚电路连接方式。VDL 模式 2 系统可提供航空电信网络子网服务,数据分组比特差错概率低至 10^{-6} ,可用性达 99.9%。VDL 模式 2 系统支持两类业务:空中交通管制通信和航空公司运行控制通信。前者包括数字化起飞前放行、管制员与飞行员数据链通信、合约式自动相关监视;后者包括航空器位置报告、飞机状态监控与维护协调、机组管理等。

1.2 VDL 模式 2 系统协议模型

图 1 给出了 VDL 模式 2 系统的协议模型^[6]。系统由物理层、数据链路层和子网层组成。数据链路层包括 MAC 层、发送队列、数据链路实体(DLE, data link entity)、逻辑链路控制类型 1(LLC_1, logical link control type 1)和链路管理实体(LME, link management entity);子网层包括数据包层和站点管理实体(SME, station management entity)。

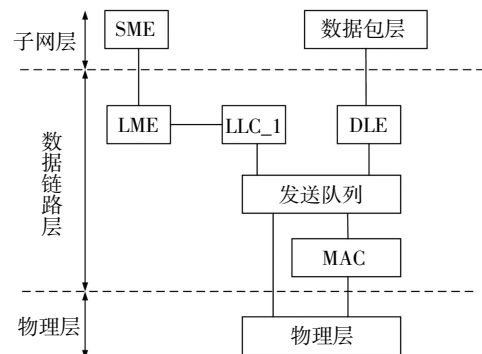


图 1 VDL 模式 2 系统协议模型

Fig.1 Protocol model of VDL Mode 2

物理层负责物理层成帧、信道编码/译码、调制/解调等功能。在数据链路层中,MAC 层负责信道访问控制;发送队列用于缓存高层待发送的数据帧;DLE 完成面向连接的数据传输;LLC_1 完成面向非连接的数据传输;LME 负责链路管理。在子网层中,数据包层负责数据包的分段与重装;SME 负责空地子网连接的建立、维护与释放。

1.3 VDL 模式 2 系统 MAC 层

图 2 展示了 MAC 层与发送队列及物理层之间的原语^[6]。具体如下:①PH_IDLE.ind,即物理层向 MAC 层通告信道空闲;②PH_BUSY.ind,即物理层向 MAC 层通告信道繁忙;③MA_RTS.ind,即发送队列向 MAC 层请求使用信道;④MA_CTS.ind,即 MAC 层向发送队列通告允许使用信道;⑤MA_EVENT_TM2.ind,即

MAC层向发送队列通告信道不可用;⑥PH_DATA.req,即请求物理层发送该帧。

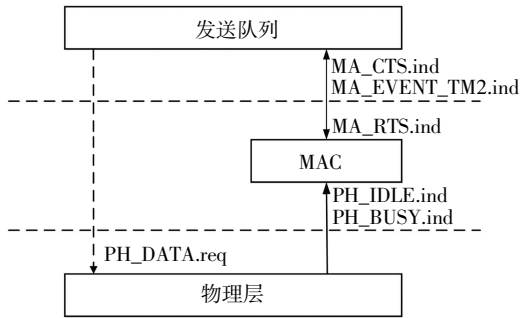


图2 VDL模式2系统MAC层与相邻层之间的原语

Fig.2 Primitives between the MAC layer and its adjacent layers in VDL Mode 2

VDL模式2系统MAC层采用p-CSMA协议控制信道访问,其缺省参数如表1所示。

表1 VDL模式2系统MAC层p-CSMA协议缺省参数

Tab.1 Default parameters of the p-CSMA protocol in the MAC layer of VDL Mode 2

参数名称	参数含义	取值
TM1/ms	互访时延	4.50
TM2/s	信道拥塞时间间隔	60.00
p	坚持参数	0.05
M1/次	最大重复发送次数	135.00

p-CSMA协议工作原理:当发送队列有数据待发送时,向MAC层提出信道使用申请(MA_RTS.ind),若此时信道空闲,则通过随机种子生成发送概率参数 β ($\beta \in [0, 1]$),若 $\beta \leq p$,则MAC层通知发送队列立刻使用信道(MA_CTS.ind);若 $\beta > p$,则MAC层启动定时器1,延迟TM1时间后重新生成 β 并判断,该过程不断重复,直至 $\beta \leq p$ 或重复次数达到上限M1;若重复次数超过M1,系统则不再生成 β ,而是立刻通知发送队列使用信道(MA_CTS.ind);另外在定时器1运行期间,若信道转为繁忙(PH_BUSY.ind),则复位定时器1,待信道再次空闲时(PH_IDLE.ind),重新启动定时器1;此外,为避免信道长期繁忙导致发送队列无法发送数据,MAC层还设置了定时器2,若其超过TM2时间,则判定信道不可用,同时将该状况通告给发送队列(MA_EVENT_TM2.ind)。

图3给出了VDL模式2系统MAC层的状态转移图^[9],包含4个状态:①空闲,即发送队列为空且信道空闲;②繁忙,即发送队列为空且信道繁忙;③未定,即发送队列不为空且信道空闲;④等待,即发送队列不为空且信道繁忙。各状态的转移逻辑:①当MAC层

处于空闲状态时,若信道变繁忙,则转入繁忙状态;若有新数据帧到达发送队列,则转入未定状态;②当MAC层处于繁忙状态时,若信道变空闲,则转入空闲状态;若有新数据帧到达发送队列,则转入等待状态;③当MAC层处于未定状态时,若发送队列变为空,则转入空闲状态;若信道变繁忙,则转入等待状态;④当MAC层处于等待状态时,若信道变空闲,则转入未定状态。

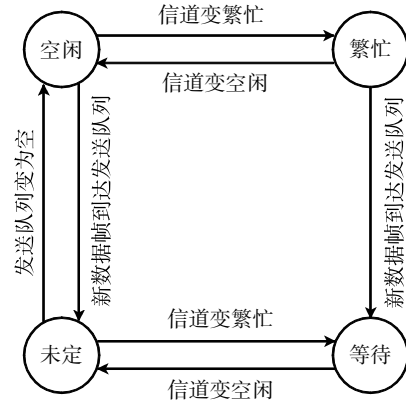


图3 VDL模式2系统MAC层状态转移图

Fig.3 State transition diagram of the MAC layer in VDL Mode 2

2 VDL模式2系统MAC协议建模

本文采用OPNET对VDL模式2系统MAC协议进行建模。为提高仿真效率,将发送队列与MAC协议合并映射至OPNET的MAC进程。

图4展示了基于OPNET的MAC进程的状态转移图,包含4个非强制状态和3个强制状态。图4中虚线上的语句为状态跳转的程序,状态下的数字为进入状态和转出状态的代码数量。MAC进程的非强制状态分别是:①idle,即发送队列为空且信道空闲;②busy,即发送队列为空且信道繁忙;③waiting,即发送队列不为空且信道繁忙;④pending,即发送队列不为空且信道空闲。MAC进程的强制状态分别是:①init,即完成MAC进程初始化;②set_p,即生成发送概率参数 β ;③tx_send,即执行数据帧发送。

表2是VDL模式2系统MAC进程的状态转移表。MAC进程启动后,首先进入init状态,并完成MAC协议相关参数(包括TM1、TM2、p和M1)初始化,随后进程转移至idle状态。在idle状态下,如果信道变繁忙,则转移至busy状态;如果有数据帧到达,则进程转移至set_p状态。在busy状态下,如果信道变空闲,则转移至idle状态;如果有数据帧到达,则转移至

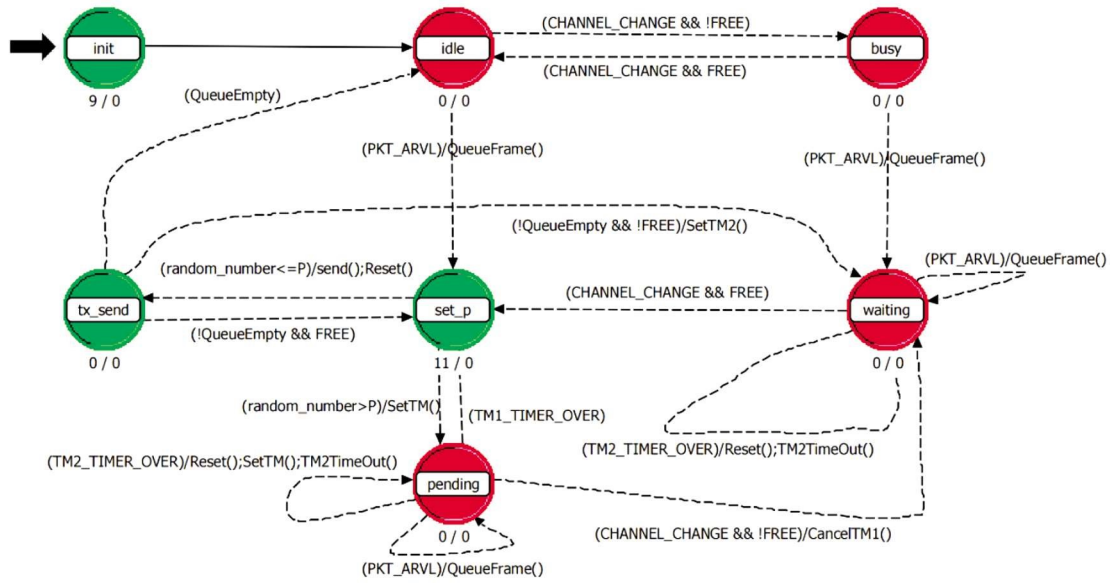


图 4 基于 OPNET 的 MAC 进程的状态转移图

Fig.4 State transition diagram of the MAC process based on OPNET

表 2 VDL 模型 2 系统 MAC 进程的状态转移表

Tab.2 State transition table of the MAC process in VDL Mode 2

当前状态	输入	输出	下一个状态
init	初始化	—	idle
idle	信道变繁忙	—	busy
idle	数据帧到达	数据帧存储到发送队列	set_p
busy	信道变空闲	—	idle
busy	数据帧到达	数据帧存储到发送队列	waiting
waiting	数据帧到达	数据帧存储到发送队列	waiting
waiting	信道变空闲	—	set_p
waiting	定时器 2 到时	重置定时器 1 和定时器 2	waiting
set_p	$\beta \leq p$	清除定时器 1 和定时器 2	tx_send
set_p	$\beta > p$	启动定时器 1,若定时器 2 未启动,则启动定时器 2	pending
tx_send	发送队列不为空,且信道空闲	—	set_p
tx_send	发送队列不为空,启动定时器 2 且信道繁忙	—	waiting
tx_send	发送队列为空,且信道空闲	—	idle
pending	数据帧到达	数据帧存储到发送队列	pending
pending	定时器 2 到时	重置定时器 1 和定时器 2	pending
pending	信道变繁忙	取消定时器 1	waiting
pending	定时器 1 到时	—	set_p

waiting 状态。在 waiting 状态下,如果有数据帧到达,状态保持不变;如果信道变空闲,则转移至 set_p 状态;如果定时器 2 到时,则状态保持不变。在 set_p 状态下,如果 $\beta \leq p$,则转移至 tx_send 状态;如果 $\beta > p$,则转移至 pending 状态。在 tx_send 状态下,如果发送队列不为空,且信道空闲,则转移至 set_p 状态;如果发

送队列不为空,且信道繁忙,则转移至 waiting 状态;如果发送队列为空,且信道空闲,则转移到 idle 状态。在 pending 状态下,如果有数据帧到达,则状态不改变;如果定时器 2 到时,则状态不改变;如果信道变繁忙,则转移至 waiting 状态;如果定时器 1 到时,则转移至 set_p 状态。

3 仿真

3.1 仿真参数

仿真网络由 1 个地面接收节点和 40 个空中发送节点组成。发送节点以泊松分布的随机速率发送数据帧;接收节点负责接收并统计所有传输的数据帧。表 3 是 VDL 模式 2 系统 MAC 协议仿真参数。

表 3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

仿真参数	取值
发送节点数 N /个	40
数据帧周期 T /s	0.264
数据帧长度/bits	8 312
比特传输速率/(bits·s ⁻¹)	31 500
各节点数据帧的发送间隔/s	D
单个节点数据帧到达速率 R_n /(帧·s ⁻¹)	$1/D$
所有节点数据帧的到达速率 R_s /(帧·s ⁻¹)	$N \cdot R_n$
网络负载 G /(帧·T ⁻¹)	$R_s \cdot T$

注: D 服从指数分布,取值为 200、133、100、80、57、40、33、25、20、16、12、10、9.5、8、5、4。

仿真实验统计的评估指标包括:①吞吐量,即单

位数据帧周期内成功接收的帧数；②传输时延，即数据帧从产生到成功接收的平均时间；③丢帧率，即丢失帧数与总发送帧数之比^[17]。

3.2 仿真结果

载波侦听多路访问(CSMA, carrier sense multiple access)协议主要分为 1-坚持载波侦听多路访问(1-CSMA, 1-persistent carrier sense multiple access)协议与 p -CSMA 协议, 其中 VDL 模式 2 系统采用 p -CSMA 协议; 而 ALOHA 协议可视为 CSMA 协议在无载波侦听情况下的特例。因此, 在研究 VDL 模式 2 系统多路访问性能时, 通常将 p -CSMA 协议与 1-CSMA 和 ALOHA 协议的性能进行比较。

图 5 展示了网络负载对系统吞吐量的影响。从图 5 可以看出: ①VDL 模式 2 系统的 p -CSMA($p = 0.05$) 协议在网络负载相同的情况下, 其系统吞吐量显著优于 1-CSMA 和 ALOHA 协议; ②当网络负载为 1 帧/ T 时, 使用 p -CSMA 协议的系统吞吐量达到峰值 0.807 帧/ T 。

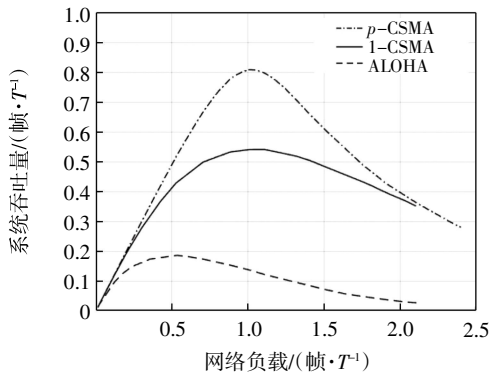


图 5 网络负载对系统吞吐量的影响

Fig.5 Impact of network load on system throughput

图 6 展示了在采用 p -CSMA 协议时, 坚持参数 p 对系统吞吐量的影响。由图 6 可知, 在网络负载为 1 帧/ T 的情况下, $p = 1.00$ 时, 系统吞吐量的峰值为 0.54 帧/ T ; $p = 0.01$ 时, 系统吞吐量性能最优, 其峰值提高至 0.83 帧/ T 。这表明: 随着 p 减小, 各节点在检测到信道空闲后立即发送数据帧的概率下降, 从而有效降低了多个节点同时发送数据帧引发碰撞的概率, 系统吞吐量峰值也随之提高。

图 7 展示了在采用 p -CSMA 协议时, 坚持参数 p 对系统传输时延的影响。从图 7 可知, 在网络负载为 1 帧/ T 的情况下, $p = 0.01$ 时, 系统传输时延为 5.21 s; $p = 1.00$ 时, 系统传输时延最小, 仅为 0.33 s。这表明: 随着 p 减小, 各节点在检测到信道空闲后立即发送数据帧的概率下降, 导致数据帧在发送队列中的等待时间增

加, 造成系统传输时延也随之增加。

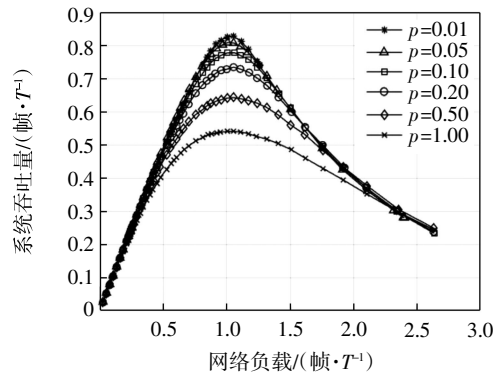


图 6 坚持参数 p 对系统吞吐量的影响

Fig.6 Impact of the persistence parameter p on system throughput

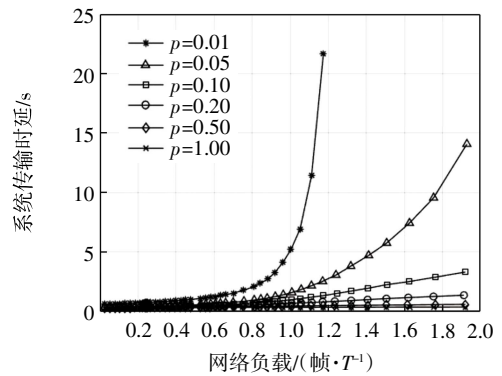


图 7 坚持参数 p 对系统传输时延的影响

Fig.7 Impact of the persistence parameter p on system transmission delay

图 8 给出了坚持参数 p 对系统丢帧率的影响。由图 8 可知, 在网络负载为 1 帧/ T 的情况下, $p = 1.00$ 时, 系统丢帧率为 0.47; $p = 0.01$ 时, 系统丢帧率降至最低, 仅为 0.16。这表明: 随着 p 减小, 各节点在检测到信道空闲后立即发送数据帧的概率下降, 从而减少了因数数据帧碰撞导致的丢帧现象, 系统丢帧率也随之下降。

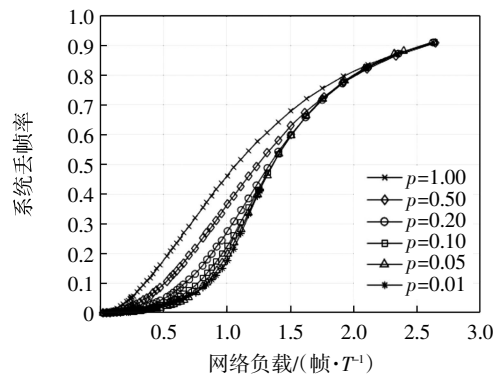


图 8 坚持参数 p 对系统丢帧率的影响

Fig.8 Impact of the persistence parameter p on system frame loss rate

由图 6—图 8 可知, 坚持参数 p 对系统的吞吐量、传输时延和丢帧率有显著影响。 p 较大时, 轻网络负载

下吞吐量高、传输时延低,但高网络负载下碰撞加剧,导致丢帧率上升、重传增多,反而降低吞吐量并增大传输时延; p 较小时,高网络负载下碰撞减少、丢帧率低、吞吐量更稳定,但因退避频繁,传输时延增加,轻网络负载下吞吐量受限。因此, p 的取值需要根据网络负载在高吞吐量、低传输时延、低丢帧率之间进行权衡。

4 结语

针对 VDL 模式 2 系统 MAC 协议性能分析的需求,本文依据 ICAO 技术规范,基于 OPNET 构建了 VDL 模式 2 系统 MAC 协议仿真模型,重点探究了 p -CSMA 协议中坚持参数 p 对系统性能的影响机理。研究表明, p 作为关键控制变量,显著影响系统吞吐量、传输时延与丢帧率等性能指标,其取值需根据网络负载在高吞吐量、低传输时延、低丢帧率之间进行权衡。本文结论为 VDL 模式 2 系统的工程部署提供了参数依据,也为 TBO 运行环境下的系统性能优化奠定了基础,对推进四维航迹相关技术建设具有参考价值。

参考文献:

- [1] POST J. The next generation air transportation system of the United States: vision, accomplishments, and future directions[J]. *Engineering*, 2021, 7(4): 427-430.
- [2] BOLIĆ T, RAVENHILL P. SESAR: the past, present, and future of European air traffic management research[J]. *Engineering*, 2021, 7(4): 448-451.
- [3] ICAO. Aviation system block upgrades (ASBUs) [EB/OL]. [2025-04-10]. <https://www.icao.int/sustainability/pages/asbu-framework.aspx>.
- [4] 中国民用航空局空中交通管理局. 中国民航管现代化战略(CAAMS)实施路线图[R]. 北京: 中国民用航空局空中交通管理局, 2020.
- [5] GUO X, LI J, PENG Z Z. Research on the impact of TBO on airline planning and scheduling[C]//2021 4th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE), November 4-6, 2021, Wuhan, China. IEEE, 2021: 367-371.
- [6] 刘天华,王 丽,林 静,等. 支持四维航迹运行的新一代民机数据链技术综述[J]. *电讯技术*, 2023, 63(1): 145-150.
- [7] ZENG D S, GONDA J C. VDL2 power control[C]//2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), September 25-29, 2016, Sacramento, CA, USA. IEEE, 2016: 1-5.
- [8] JAMAL H, MATOLAK D W. Advanced physical-layer technologies in VHF data link communications[C]//2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), October 11-15, 2020, San Antonio, TX, USA. IEEE, 2020: 1-8.
- [9] 牟光红,孙建华,王玉柱. 一种 VDL Mode 2 高动态接收前端的设计[J]. *电子元器件与信息技术*, 2022, 6(10): 166-170.
- [10] 张 瑶,张学军,张 军. 甚高频数据链模式二通信协议栈一致性测试系统设计与验证[J]. *航空电子技术*, 2008, 39(1): 1-4.
- [11] 邵 林. 基于信号与干扰噪声比的 VDL2 切换仿真[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(6): 1384-1390.
- [12] LALA V, PIROVANO A, RADZIK J. Towards a new approach to ensure end-to-end reliability of aeronautical data communications[J]. *The Aeronautical Journal*, 2025, 129(1334):1001-1027.
- [13] 贾旭光,张学军,张 军. 航空甚高频数据链模式二建模及仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(21): 5046-5050.
- [14] 李冬霞,叶倩文. 基于 OPNET 的 VDL2 系统传输性能仿真研究[J]. *中国民航大学学报*, 2012, 30(6): 60-64.
- [15] GOMEZ L, ORTIZ J. Modeling and simulation of VDL mode 2 subnet for CPDLC in El Dorado airport[C]//2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC), October 5-10, 2013, East Syracuse, NY, USA. IEEE, 2014: 3B4-1-3B4-15.
- [16] ICAO. Manual on VHF digital link (VDL) mode 2: Doc 9776-AN/970 [S]. Montreal: ICAO, 2015.
- [17] KLEINROCK L, TOBAGI F. Packet switching in radio channels: part I-carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1975, 23(12): 1400-1416.

(责任编辑:刘智勇)