

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.02.019

基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法

刘海涛, 郑晨, 曾茂树

(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: 针对跨洋航空自组网 (Aeronautical ad-hoc network, AANET) 单信道空间/时分多址 (Space-time division multiple access, STDMA) 协议传输速率低、传输时延大、难以保证多业务服务质量等问题, 提出了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法。首先, 建立了跨洋 AANET 系统模型, 并根据定向天线建立了链路模型。其次, 给出了系统传输方案, 该方案采用分布式预约 STDMA, 并引入滑动加权平均统计数据帧到达速率, 根据数据帧到达速率和数据帧传输速率进行动态的时隙分配和移除, 同时通过周期性广播时隙调度表实现网络内时隙分配信息的同步。最后, 基于 OMNeT⁺⁺ 构建跨洋 AANET 仿真系统, 采用有组织航迹系统 (Organized track system, OTS) 生成实际跨洋场景下的节点分布模型, 并对所提方法的性能进行仿真研究。研究表明: 在高密度和高负载的情况下, 所提出的方法能够保证多业务服务质量, 空中交通服务 (Air traffic services, ATS) 和航务管理通信 (Aeronautical operations control, AOC) 业务的端到端时延能够保持收敛, 投递率维持在 95% 以上, 航空行政通信 (Aeronautical administrative communication, AAC) 和航空旅客通信 (Airline passenger communication, APC) 业务能够持续传输。

关键词: 定向天线; 多信道; 分布式; 空间/时分多址

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)02-0378-09

Multi-channel Distributed STDMA Slot Scheduling Method Based on Directional Antenna

LIU Haitao, ZHENG Chen, ZENG Maoshu

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the issues of low transmission rate, high transmission delay, and difficulty in ensuring multi-service quality of service (QoS) in transoceanic aeronautical ad-hoc networks (AANET) with single-channel space-time division multiple access (STDMA) protocols, this paper proposes a multi-channel distributed STDMA slot scheduling method based on directional antenna. Firstly, a system model for the transoceanic aeronautical ad-hoc network is established, and a link model is constructed based on directional antennas. Secondly, a system transmission scheme is proposed, which adopts distributed reservation-based STDMA and introduces a sliding weighted average to statistically measure the data frame arrival rate. Dynamic time slot allocation and removal are performed according to the data frame arrival rate and transmission rate, while periodic broadcasting of time slot scheduling tables achieves synchronization of time slot allocation information within the network. Finally, a transoceanic aeronautical ad-hoc network simulation system is built using OMNeT⁺⁺, and the organized track system (OTS) is employed to generate a node distribution model under real transoceanic scenarios. The performance of the proposed method is evaluated through simulations. Research results show that under high-density and high-load conditions, the proposed

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2022YFB3904503)。

收稿日期: 2024-12-27; **修订日期:** 2025-03-25

通信作者: 刘海涛, 男, 教授, 硕士生导师, E-mail: htliucauc@qq.com。

引用格式: 刘海涛, 郑晨, 曾茂树. 基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法 [J]. 南京航空航天大学学报 (自然科学版), 2025, 57(2): 378-386. LIU Haitao, ZHENG Chen, ZENG Maoshu. Multi-channel distributed STDMA slot scheduling method based on directional antenna [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(2): 378-386.

method can guarantee multi-service QoS. The end-to-end delays of air traffic service (ATS) and aeronautical operational control (AOC) services remain convergent. The delivery rate is maintained above 95%, and aeronautical administrative communication (AAC) and aeronautical passenger communication (APC) services achieve sustained transmission.

Key words: directional antenna; multi-channel; distributed; space-time division multiple access (STDMA)

随着互联网技术的飞速发展,跨洋飞行中空交通服务通信及航空旅客通信的需求日益提升,而传统的洋区通信技术手段难以满足快速增长的通信需求^[1]。为了解决飞机在洋区通信中面临的传输速率低、传输时延大,无法保证多业务服务质量的问题,国内外学者提出基于航空自组网(Aeronautical ad-hoc network, AANET)的洋区通信系统^[2-3]。AANET具有自组织、自修复、快速部署及高效组网等优势,因此获得了业界和学术界的广泛关注^[4-5]。

围绕着 AANET,国内外开展了大量研究^[6-9]。其中,关于媒介访问控制(Multiple access control, MAC)协议的研究主要分为两类^[10]:基于竞争的 MAC 协议和基于调度的 MAC 协议^[11]。

在基于竞争的 MAC 协议中,节点通过竞争使用信道,当发生冲突时则依据退避机制重新竞争,直到数据包发送成功,该类协议在高负载时存在吞吐量低、时延高等问题^[12]。

在基于调度的 MAC 协议方面,主要采用基于时分多址(Time division multiple access, TDMA)的接入方式^[13],包括集中式和分布式 TDMA 协议。集中式 TDMA 协议^[14-15]通过中心节点统一管理分配网络的时隙资源,该方法存在鲁棒性差、扩展性差等缺点,因此相关研究主要集中在分布式 TDMA 协议。为了满足网络的服务质量(Quality of service, QoS)需求,文献^[16]提出了一种基于 TDMA 的令牌环协议,该协议利用令牌环交换控制信息,从而使节点实时更新时隙调度表,研究表明该协议能灵活分配时隙,提供有效的 QoS 保证。为了解决 TDMA 协议带宽利用率低下的问题,文献^[17]提出一种动态 TDMA 时隙预留(Dynamic TDMA slot reservation, DTSR)协议,该协议根据拓扑密度和带宽需求动态调整时隙长度,研究显示该协议可提高带宽利用率,降低传输时延。针对高动态情况下的时隙分配问题,文献^[18]提出了一种分布式空间/时分多址(Space-time division multiple access, STDMA)协议,该协议为链路设置优先级参数,并按优先级分配时隙,研究表明该协议有利于均衡分配时隙,防止网络拥塞。为了解决传输时延较大的问题,文献^[19]提出了一种基于位置的 TDMA(Location-based TDMA, LBTM)协议,该协议通过飞机位置计算传播时延,并根据传播时延调整确认字符(Acknowledge character, ACK)消

息的保护间隔,研究显示该协议可有效降低传输时延。针对同样的问题,文献^[20]提出一种基于干扰的分布式 TDMA(Interference-based distributed TDMA, IDTA)方法,该方法在发送和接收节点上同步运行,并根据链路优先级分配时隙。研究显示该方法同样能降低传输时延。

尽管国内外学者围绕着 AANET 的 TDMA 协议展开了大量研究,但这些研究主要集中在单信道 TDMA,应用于民航跨洋通信系统存在传输速率低、时延大、难以保证多业务服务质量的问题。针对以上问题,提出了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 传输方案及时隙调度方法。论文存在 2 个方面创新:(1)提出了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 系统传输方案;(2)提出了该方案的时隙调度方法。

1 跨洋 AANET 模型

1.1 网络模型

图 1 显示给出了跨洋场景下 AANET 的示意图。越洋飞行中,飞机节点以分布自组织方式实现自动组网、拓扑维护、多跳路由和数据传输。此外, AANET 通过地面网关节点接入到地面网络设施。



图 1 网络模型

Fig.1 Network model

在 AANET 中,第 i 架飞机节点 P_i 的空间位置坐标记为 (x_i, y_i, z_i) ,飞机节点集记为 $\{P_i | i = 1, 2, \dots, I\}$,其中, i 为飞机节点的序号, I 为飞机节点的数量。节点 P_i 的邻居节点集记为 $N_i \triangleq \{P_j | d(i, j) < R, j = 1, 2, \dots, I, j \neq i\}$,其中, $d(i, j)$ 为节点 P_i 与 P_j 之间的距离, R 为节点的通信覆盖范围。地面网关节点集记为 $\{G_k | k = 1, 2, \dots, K\}$,其中, k 为地面网关节点的序号, K 为地面网关节点的数量。

假设节点均配置全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)接收机,通过

GNSS 授时信息可建立精确的网络定时同步,同时各节点均配备广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)系统,可获取周边飞机节点的身份、空间位置和运动状态等信息。

1.2 链路模型

在 AANET 中,各节点均配置具有定向性和多波束的智能天线,在时隙开始时刻可根据调度表中信息确定天线的指向^[21-22],从而建立通信链路。

图 2 给出了链路模型的示意图。天线的波束可简化为扇区^[23],其中, C_{T_i} 为节点 P_i 的发射波束, C_{R_j} 为节点 P_j 的接收波束^[18]。

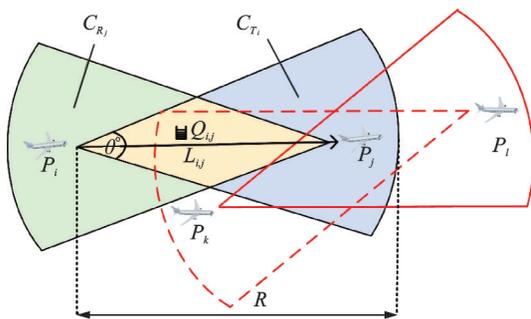


图2 链路模型

Fig.2 Link model

如果 P_j 位于 P_i 的接收波束内,且 P_i 位于 P_j 的发射波束内,即满足式(1)。

$$(x_j, y_j, z_j) \in C_{T_i} \cap (x_i, y_i, z_i) \in C_{R_j} \quad (1)$$

则可建立从 P_i 到 P_j 的单向通信链路 $L_{i,j}$,另外,节点 P_i 的 MAC 层维护着链路 $L_{i,j}$ 的传输队列 $Q_{i,j}$ 。

如果链路 $L_{i,j}$ 和 $L_{k,i}$ 还满足式(2,3),则两条链路之间不存在相互干扰,可以用空分复用方式工作。

$$(x_j, y_j, z_j) \notin C_{T_i} \cup (x_k, y_k, z_k) \notin C_{R_i} \quad (2)$$

$$(x_i, y_i, z_i) \notin C_{T_i} \cup (x_i, y_i, z_i) \notin C_{R_i} \quad (3)$$

2 基于定向天线的多信道分布式 STDMA 系统

2.1 传输方案及时帧结构

为了提高网络的性能,采用了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 传输方案。

图 3 给出了系统的时帧结构。系统共使用 N 个信道(频率),信道集为 $\{f_n | n = 1, 2, \dots, N\}$,其中, n 为信道的序号, N 为信道数。在各信道中,信道时间分为等长的时帧,时帧集记为 $\{F_p | p = 1, 2, \dots, P\}$, p 为时帧的序号, P 为时帧数目。每个时帧进一步分成等长的时隙,时隙集记为 $\{S_m | m = 1, 2, \dots, M\}$, m 为时隙的序号, M 为时隙数目。按

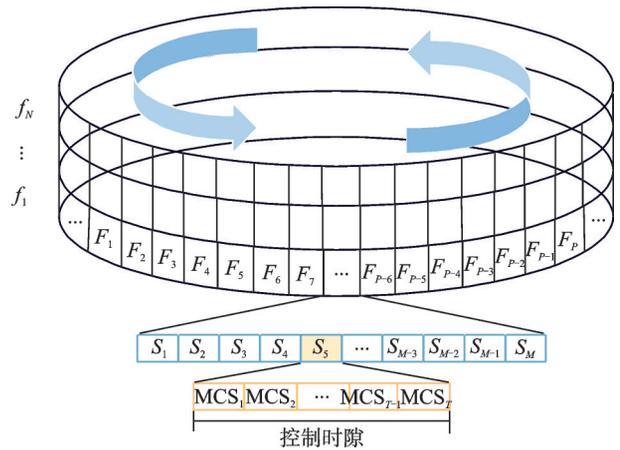


图3 时帧结构

Fig.3 Time frame structure

照时隙的用途,时隙分为控制时隙(Control slot, CS)和数据时隙(Data slot, DS),其中,控制时隙用于节点之间控制信息的传输,以预分配的方式均匀地分布在时帧中,数据时隙用于节点之间数据传输。控制时隙又进一步分为等长的控制子时隙(Mini-control slot, MCS),控制子时隙集记为 $\{MCS_t | t = 1, 2, \dots, T\}$, t 为控制子时隙的序号, T 为控制子时隙的数目。

系统采用了分布式预约 STDMA 的工作方式。在时隙预约阶段,预约节点在控制子时隙内以时隙 Aloha 方式发送预约申请^[24],响应节点收到预约申请后,回复时隙确认,随后预约节点和响应节点再控制子时隙内广播时隙占用信息。在数据传输阶段,预约节点和响应节点使用分配的数据时隙完成两个节点之间的数据传输。数据传输结束后,预约节点或响应节点在控制子时隙内发送时隙释放通知。

2.2 时隙调度方法

2.2.1 时隙调度思想

为了实现时隙资源的分布式调度,各节点均维护着一个时隙调度表。时隙调度表记录着一个调度周期内(Scheduling cycle, SC)本节点及邻居节点各信道时隙资源的占有状况(本方案中,调度周期为一个时帧的长度)。各节点在控制子时隙内周期性广播本节点的时隙调度表,并接收邻居节点的时隙调度表,从而使各节点均知晓时隙资源的占有情况。

各节点 MAC 层以时帧为单位统计得到数据帧到达速率及数据帧传输速率两个参量,并依据其定量关系进行时隙资源的调度。当数据帧到达速率大于数据帧传输速率时,节点进行时隙分配。当数据帧到达速率小于数据帧传输速率时,节点进行时隙移除。

图 4 给出了节点 P_i 在 MAC 层的数据帧到达速率及数据帧传输速率示意图。图 4 左侧,节点 P_i 与

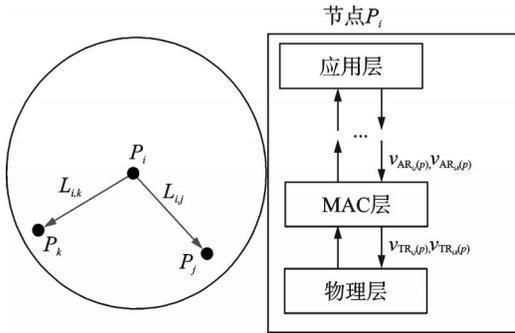


图 4 MAC 层数据帧到达速率及数据帧传输速率

Fig.4 MAC-layer data frame arrival and transmission rate

P_j, P_k 建立了链路 $L_{i,j}$ 和 $L_{i,k}$ 。图 4 右侧,在第 p 个时帧内,节点 P_i 高层传输至 MAC 层,并将通过链路 $L_{i,j}$ 发送至 P_j 的数据帧个数称为数据帧到达速率 $v_{AR,i(p)}$ (单位:个/时帧);在第 p 个时帧内,节点 P_i 在 MAC 层通过链路 $L_{i,j}$ 传输至 P_j 的数据帧个数称为数据帧传输速率 $v_{TR,i(p)}$ (单位:个/时帧)。

图 5 给出了调度周期的示意图。首先,在第 $p-1$ 个调度周期结束时,节点 P_i 统计得到 MAC 层的 $v_{AR,i(p-1)}$ 和 $v_{TR,i(p-1)}$ 。随后,在第 p 个调度周期, P_i 根据 $v_{AR,i(p-1)}$ 和 $v_{TR,i(p-1)}$ 的定量关系进行时隙调度,如果 $v_{AR,i(p-1)} > v_{TR,i(p-1)}$,则 P_i 通过时隙分配过程获得新的时隙资源。如果 $v_{AR,i(p-1)} < v_{TR,i(p-1)}$,则 P_i 通过时隙移除过程释放时隙资源。最后,在第 $p+1$ 个调度周期, P_i 按照更新后的时隙分配信息进行通信。

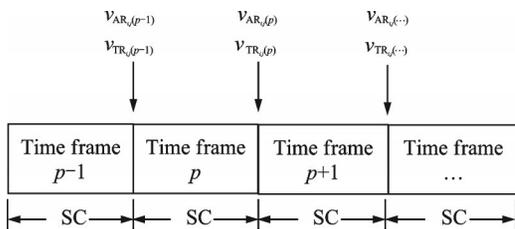


图 5 调度周期示意图

Fig.5 Schematic diagram of the scheduling cycle

2.2.2 调度表

考虑到一个调度周期内,存在 $N \times M$ 个时隙,因此节点 P_i 的时隙调度表 ST_i 建模为一个 $N \times M$ 的二维矩阵 $L_{ST_i} = \{e_{nm} | n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M\}$,其中, e_{nm} 为第 n 个信道第 m 个时隙的分配状况,当 e_{nm} 取值为 0 时,表示该时隙为空闲时隙;当 e_{nm} 取值为 1 时,表示该时隙为控制时隙;当 e_{nm} 取值为 $\{i, j; k, l\}$ 时,表示链路 $L_{i,j}$ 与 $L_{k,l}$ 以空分复用方式共享该时隙。

2.2.3 调度参量

为了得到准确的数值,节点 P_i 在 MAC 层的数据帧到达速率 $v_{AR,i(p)}$ 采用滑动加权平均进行统

计^[25],统计方法如下

$$\begin{cases} v_{AR,i(p)} = \alpha v_{AR,i(p-1)} + (1 - \alpha) \Delta_{i,j}(p-1) & p > 1 \\ v_{AR,i(p)} = \Delta_{i,j}(p) & p = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta_{i,j}(p)$ 为第 p 个调度周期结束时队列 $Q_{i,j}$ 的长度; α 为平滑因子, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

节点 P_i 的 MAC 层的数据帧传输速率 $v_{TR,i(p)}$ 通过读取调度表进行统计,统计算法如下:

```

v_TR,i(p) = 0
for n = 1 to N
  for m = 1 to M
    element = e_mn
    if (isinstance(element, set))
      if i, j in element
        v_TR,i(p) = v_TR,i(p) + 1
      else
        continue
    continue
  return v_TR,i(p)

```

2.2.4 调度表广播

节点 P_i 广播的过程如下:

- (1) 节点 P_i 的 MAC 层广播定时器定时时间到, P_i 在随后的控制子时隙内广播其时隙调度表 ST_i ;
- (2) 节点 P_i 的邻居节点接收到 P_i 播发的时隙调度表,随后邻居节点更新自身时隙调度表。

2.2.5 时隙分配/移除过程

节点 P_i 和 P_j 之间的时隙分配过程如下:

- (1) 节点 P_i 根据 ST_i 确定候选时隙集,并通过 ReqMsg 消息将候选时隙集发送给节点 P_j , P_j 收到 ReqMsg 消息后,产生 ControlAckMsg 消息发送给 P_i ;

- (2) P_j 从候选时隙集中确定可用时隙并选择信道序号,通过 RepMsg 消息告知 P_i , P_i 收到 RepMsg 消息后,产生 ControlAckMsg 消息发送给 P_j ;

- (3) P_j 在 ST_j 中更新 $L_{i,j}$ 的时隙及信道使用信息,并将 ST_j 通过广播消息发送;

- (4) P_i 在 ST_i 中更新 $L_{i,j}$ 的时隙及信道使用信息,并将 ST_i 通过广播消息发送。

节点 P_i 和 P_j 之间的时隙移除过程如下:

- (1) 飞机节点 P_i 从 ST_i 中选择待移除时隙序号,并通过 DeleteMsg 消息发送给飞机节点, P_j 收到 DeleteMsg 消息后,产生 ControlAckMsg 消息发送给 P_i ;

- (2) P_j 更新 ST_j , 并将 ST_j 通过广播消息发送。

- (3) P_i 成功接收 ControlAckMsg 消息后更新 ST_i , 并将 ST_i 通过广播消息发送。

此外,飞机节点之间还需通过重传机制确保控制消息成功传输。节点发送完控制消息后,如果在重传等待时间 $T_{\text{wait_ack}}$ 内没有收到 ControlAckMsg 消息,则需要对控制消息进行重传。如果达到最大重传次数 $N_{\text{retr_max}}$,此时网络拥塞严重,为避免持续产生冲突,节点在暂停传输时间 T_{pause} 后才能再次重传控制消息。

3 仿真结果

3.1 仿真系统

为了验证跨洋场景下基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法性能,基于 OM-NeT⁺⁺ 构建跨洋 AANET 仿真系统。

图 6 给出了跨洋 AANET 仿真系统示意图。系统由地面网关节点和若干飞机节点组成,其中,地面网关节点部署在陆地边缘,飞机节点按照有组织航迹系统(Organized track system, OTS)随机分布在洋区上空^[26]。仿真通过生成多组随机拓扑,并计算平均值获得仿真结果^[15]。



图 6 跨洋 AANET 仿真系统

Fig.6 Transoceanic AANET simulation system

地面网关节点配置 4 类业务,按照优先级从大到小排序为:ATS、AOC、AAC、APC。各节点配置 3 层协议栈:应用层、网络层、MAC 子层,其中,网络层采用地理负载均衡路由(Geographic load share routing, GLSR)协议^[27],MAC 层采用本文提出的基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法,同时与文献[28]中 STDMA 协议及文献[18]中基于窃取机制的 STDMA 协议进行对比。

3.2 仿真参数和仿真结果

表 1 给出了跨洋 AANET 系统仿真参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
仿真时间/s	600
仿真场景/(km×km)	3 500×1 500
飞机数量/架	100~200
通信半径/km	350
天线波束宽度/(°)	30
时隙长度/ms	13.33
数据时隙数量/个	20
控制子时隙长度/ms	2.66
控制子时隙数量/个	5
信道数量/个	1~5
最大重传次数/次	3
重传等待时间/s	0.5~1
暂停传输时间/s	1
广播周期/s	1~2

3.2.1 飞机节点数对时隙分配数的影响

图 7 给出了飞机节点数对时隙分配数的影响曲线,网络的负载为 100 packets/s,垂直虚线表示时隙分配数达到其最大值 95% 的时间点。仿真表明:(1)随着仿真时间的增加,时隙分配数线性增加,当时隙分配数到达最大值后收敛;(2)飞机节点数越多,时隙分配数收敛的时间越长,200 个节点相比于 100 个节点的收敛时间延长了 21 s。

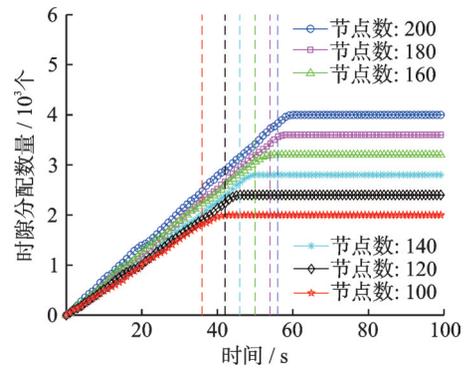


图 7 飞机节点数对时隙分配数的影响曲线(信道数:5)

Fig.7 Impact of aircraft node number on slot allocation (Number of channels: 5)

原因分析:由于 GLSR 协议具有多径性,能实现负载均衡,因此节点数更多的网络可以建立更多的通信链路,且通信链路能通过空分复用充分利用多信道提供的时隙资源,但节点需要通过时隙 Aloha 方式竞争数据时隙。因此,随着网络节点数增多,能分配得到更多时隙,但时隙分配数收敛的时间会变长。

3.2.2 网络负载对吞吐量的影响

图 8 给出了不同方法下负载对吞吐量的影响曲线。其中,网络节点数为 100,仿真表明:(1)当负载小于 100 packets/s 时:吞吐量随着负载增大而增大,3 种协议无明显差别;(2)当负载大于 100 packets/s 时:随着负载的增大,文献[26]的吞吐量逐渐趋于稳定,文献[18]相较于文献[26]吞吐量约高 17.85%,本文相较于文献[26]吞吐量约高 39.29%。

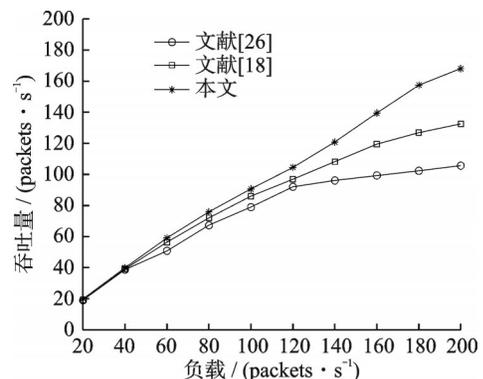


图 8 不同方法下负载对吞吐量的影响曲线

Fig.8 Impact curves of load on throughput under different methods

图9给出了不同节点及信道数量下负载对吞吐量的影响曲线。仿真表明:(1)节点数为100时:吞吐量随着负载的增大而增大,中高负载(60~200 packets/s)情况下,5个信道相比于1个信道高14.87%,3个信道相比于1个信道高7.42%;(2)节点数为200时:吞吐量随着负载的增大而增大,中高负载情况下,5个信道相比于1个信道高13.07%,3个信道相比于1个信道高8.02%;(3)信道数量相同时:吞吐量随着负载的增大而增大,200个节点相比于100个节点能保持更高的吞吐量。

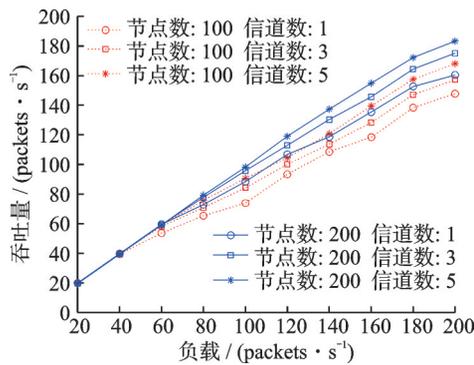


图9 不同节点及信道数量下负载对吞吐量的影响曲线
Fig.9 Impact curves of load on throughput under different nodes and channel numbers

文献[18]在文献[26]所提 STDMA 协议的基础上增加了窃取机制,即高优先级链路可通过协商窃取低优先级链路的时隙,能有效避免网络产生拥塞,但都是单信道 STDMA 协议,可用的信道资源十分固定。本文提出了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 时隙调度方法,能够在网络采用 GL-SR 协议实现负载均衡的同时,通过定向天线及动态时隙分配、移除过程充分利用多信道提供的信道资源。因此,随着负载的增大,在单信道 STDMA 协议因为时隙资源不够,吞吐量难以提高时,本文所提的方法仍能持续提高吞吐量。

3.2.3 网络负载对投递率的影响

图10给出了负载对投递率的影响曲线。其中,网络节点数为100,仿真表明:(1)投递率随着

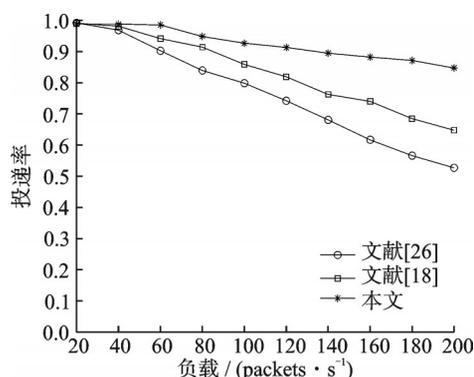


图10 负载对投递率的影响曲线
Fig.10 Impact curves of load on delivery rate

负载的增大而降低;(2)文献[26]的投递率降低速度最快,当负载达到200 packet/s时,投递率只有53%左右;当负载达到200 packet/s时,本文的投递率仍维持在85%以上。

图11给出了负载对ATS业务投递率的影响曲线。仿真表明:(1)节点数为100时,负载的变化对投递率无显著影响,维持在97%以上,当负载达到200 packets/s时,单信道下的投递率相比于多信道约降低1%;(2)节点数为200时,负载的变化对投递率无显著影响,维持在99%左右,当负载达到200 packets/s时,单信道下的投递率相比于多信道降低不足1%。

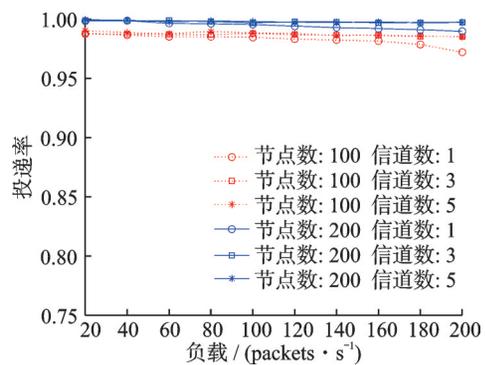


图11 负载对投递率的影响曲线(ATS业务)
Fig.11 Impact curves of load on delivery rate (ATS services)

图12给出了负载对AOC业务投递率的影响曲线。仿真表明:(1)节点数为100时,随着负载的增大,投递率逐渐降低,中高负载情况下,5个信道相比于1个信道高1.77%,3个信道相比于1个信道高1.23%;(2)节点数为200时,随着负载的增大,投递率逐渐降低,中高负载情况下,5个信道相比于单信道高1.22%,3个信道相比于1个信道高1.04%。

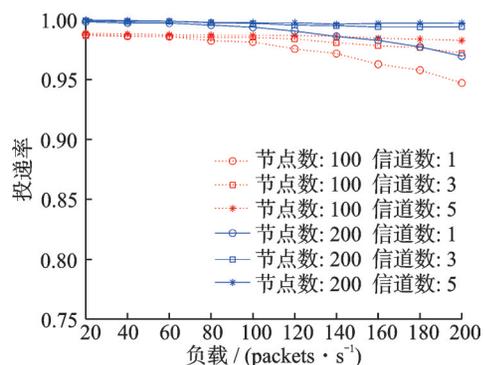


图12 负载对投递率的影响曲线(AOC业务)
Fig.12 Impact curves of load on delivery rate (AOC services)

图13给出了负载对AAC业务投递率的影响曲线。仿真表明:(1)节点数为100时,随着负载的增大,投递率显著降低,中高负载情况下,5个信道相

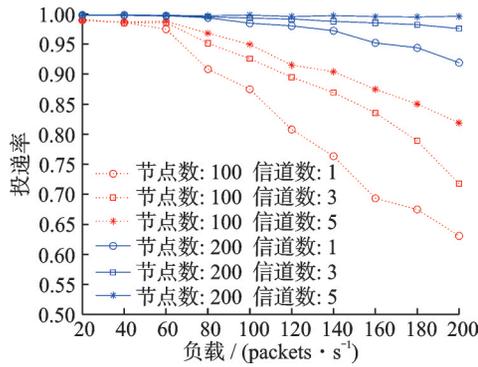


图 13 负载对投递率的影响曲线(AAC 业务)

Fig.13 Impact curves of load on delivery rate (AAC services)

比于单信道高 17.32%，3 个信道相比于单信道高 11.7%；(2)节点数为 200 时，随着负载的增大，投递率逐渐降低，中高负载情况下，5 个信道相比于 1 个信道高 3.41%，3 个信道相比于 1 个信道高 2.47%。

图 14 给出了负载对 APC 业务投递率的影响曲线。仿真表明：(1)节点数为 100 时，随着负载的增大，投递率急剧降低，当负载分别达到 80 和 180 packets/s 时，1 个信道和 3 个信道时的投递率不足 50%；(2)节点数为 200 时，随着负载的增大，投递率急剧降低，当负载达到 143 packets/s 时，1 个信道下的投递率已不足 50%，多信道仍能维持 55% 以上的投递率。

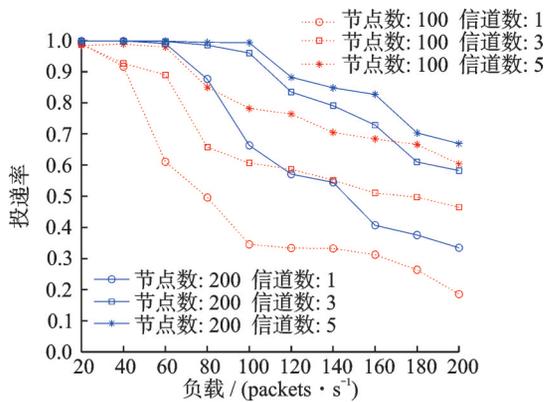


图 14 负载对投递率的影响曲线(APC 业务)

Fig.14 Impact curves of load on delivery rate (APC services)

原因分析：(1)根据负载对网络吞吐量的影响，本文提出的方法相较于文献[18]及文献[26]所提的 STDMA 协议，能够在高负载时实现更高的吞吐量，并实现更高的投递率；(2)节点数更多的网络中，通过 GLSR 协议能建立更多的通信链路，并通过定向天线实现空间复用，多条链路可使用同一时隙内并行传输，从而提高投递率；(3)信道数更多的网络中，可用时隙资源更多，当节点需要通信时，通过动态的时隙分配、移除过程按需分配时隙资源，减少时隙资源竞争，从而提高投递率。

3.2.4 网络负载对端到端时延的影响

图 15 给出了负载对端到端时延的影响曲线。其中，网络节点数为 100。

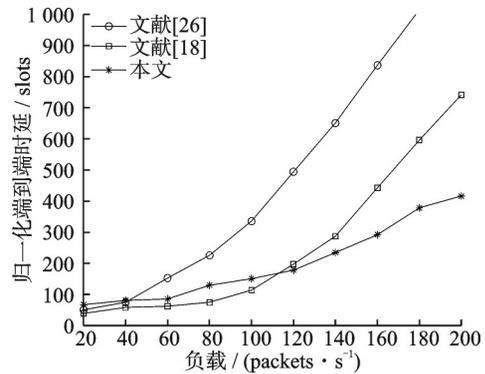


图 15 负载对端到端时延的影响曲线

Fig.15 Impact curves of load on end-to-end delay

仿真表明：(1)端到端时延随着负载的增大而增大；(2)当负载小于 100 packet/s 时，文献[18]的端到端时延最小；(3)当负载大于 100 packet/s 时本文的端到端时延最小。

图 16 给出了负载对 ATS 业务端到端时延的影响曲线。仿真表明：(1)节点数为 100 时，随着负载的增大，端到端时延缓慢增大后收敛；(2)节点数为 200 时存在上述类似情况，但相同信道数下，相比于节点数为 100 时的端到端时延更低。

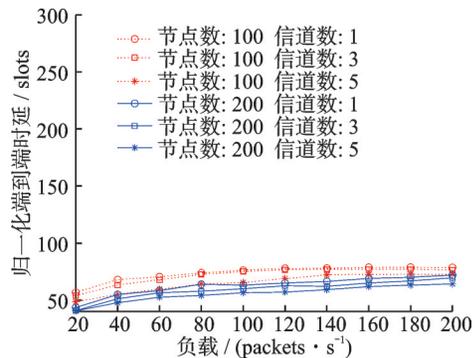


图 16 负载对端到端时延的影响曲线(ATS 业务)

Fig.16 Impact curves of load on end-to-end delay (ATS services)

图 17 给出了负载对 AOC 业务端到端时延的影响曲线。仿真表明：(1)节点数为 100 时，端到端时延随着负载增大而逐渐增大，且 1 个信道相比于多个信道的增长趋势更大；(2)节点数为 200 时，端到端时延随着负载增大缓慢增大并收敛。

图 18 给出了负载对 AAC 业务端到端时延的影响曲线。仿真表明：(1)节点数为 100 时，端到端时延随着负载的增大而陡增，负载达到 40 packets/s 时，1 个信道的端到端时延陡增，负载达到 60 packets/s 时，多信道的端到端时延陡增；(2)节点数为 200 时，端到端时延随着负载的增大而增大，负载达到 140 packets/s 时，1 个信道的端到端时延陡

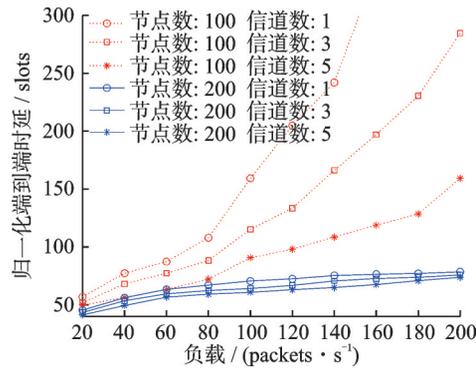


图 17 负载对端到端时延的影响曲线(AOC业务)

Fig.17 Impact curves of load on end-to-end delay (AOC services)

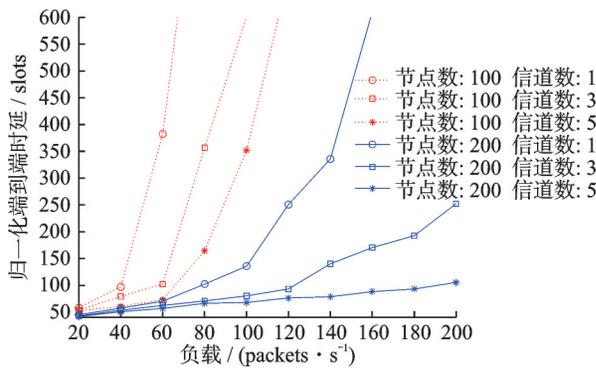


图 18 负载对端到端时延的影响曲线(AAC业务)

Fig.18 Impact curves of load on end-to-end delay (AAC services)

增,此时多信道仍保持逐步增长趋势。

图 19 给出了负载对 APC 业务端到端时延的影响曲线。仿真表明:(1)节点数为 100 时,端到端时延随着负载的增大而陡增,只有 5 个信道的端到端时延在负载达到 40 packet/s 才开始陡增;(2)节点数为 200 时,低负载情况下,端到端时延缓慢增大,在负载达 60 packet/s 时陡增,单信道相比于多信道的增长趋势更大。

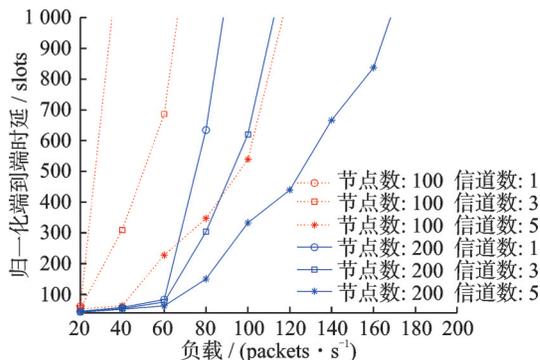


图 19 负载对端到端时延的影响曲线(APC业务)

Fig.19 Impact curves of load on end-to-end delay (APC services)

原因分析:(1)在低负载时,基于窃取机制的 STDMA 协议能快速响应突发流量,产生拥塞的链路可以窃取时隙,保证传输的实时性,从而确保较

低的端到端时延;在高负载时,多信道能提供更多的时隙资源,满足高负载网络的传输需求,从而确保较低的端到端时延。(2)节点数更多的网络中,通过 GLSR 协议能建立更多的通信链路,避免单一路径产生拥塞,同时,通过定向天线实现空间复用,多条链路可使用同一时隙,减少数据帧排队等待的时间,从而降低端到端时延。(3)信道数更多的网络中,可用时隙资源更多,当节点需要通信时,通过动态的时隙分配、移除过程按需分配时隙资源,减少数据帧排队等待的时间,从而降低端到端时延。

4 结 论

为了提高跨洋 AANET 的传输速率、降低传输时延,同时保证多业务的服务质量,提出了基于定向天线的多信道分布式 STDMA 系统传输方案,并提出了该方案的时隙调度方法。研究表明:在高密度和高负载的情况下,所提出的方法能够保证多业务服务质量,ATS 和 AOC 业务的端到端时延能够持续收敛,投递率能维持在 95% 以上,能保持较高的投递率和较低的端到端时延,AAC 和 APC 业务能够持续传输。

参考文献:

- [1] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. Aerouter: A graphical simulation tool for routing in aeronautical systems[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, USA: IEEE, 2005: 2506-2511.
- [2] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.
- [3] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of the 14th European Wireless Conference. Prague, The Czech Republic: IEEE, 2008: 1-6.
- [4] BILEN T, AHMADI H, CANBERK B, et al. Aeronautical networks for in-flight connectivity: A tutorial of the state-of-the-art and survey of research challenges [J]. IEEE Access, 2022, 10: 20053-20079.
- [5] KUMAR P, VERMA S. Research challenges in airborne ad-hoc networks (AANETs)[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Communications, Computing and Networks. Singapore: Springer, 2018: 1-6.
- [6] WANG Y, ERTURK M, ARSLAN H, et al. Throughput analysis in aeronautical data networks [C]//Proceedings of the 12th Annual Wireless and Microwave Technology Conference. Clearwater, USA: IEEE, 2011: 18.
- [7] ZHANG H, CHEN X, ZHENG B, et al. Analysis of connectivity requirement for aeronautical ad hoc net-

- works[C]//Proceedings of the International Conference on Electronic, Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, China: IEEE, 2011: 3943-3946.
- [8] WANG Y, ERTURK M C, LIU J, et al. Throughput and delay of single-hop and two-hop aeronautical communication networks[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2015, 17(1): 58-66.
- [9] VEY Q, PIROVANO A, RADZIK J, et al. Aeronautical ad hoc network for civil aviation[C]//Proceedings of the International Workshop on Communication Technologies for Vehicles. Cham, Switzerland: Springer, 2014: 81-93.
- [10] BILEN T, CANBERK B, SHARMA V, et al. AI-driven aeronautical ad hoc networks for 6G wireless: Challenges, opportunities, and the road ahead[J]. *Sensors*, 2022, 22(10): 3731.
- [11] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 机载网络 MAC 协议研究综述[J]. *电讯技术*, 2015, 55(9): 1058-1066.
- ZHUO Kun, ZHANG Hengyang, ZHENG Bo, et al. Survey on MAC protocols for airborne networks[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(9): 1058-1066.
- [12] TU H D, SHIMAMOTO S. A proposal of relaying data in aeronautical communication for oceanic flight routes employing mobile ad-hoc network[C]//Proceedings of the 1st Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems. Dong Hoi, Vietnam: IEEE, 2009: 436-441.
- [13] TUNÇ M A, PERRINS E, STERBENZ J P G. Performance evaluation of a TDMA MAC protocol in airborne telemetry networks[C]//Proceedings of the International Telemetry Conference. San Diego, USA: IEEE, 2010: 1-10.
- [14] YEO J, LEE H, KIM S. An efficient broadcast scheduling algorithm for TDMA ad-hoc networks[J]. *Computers & Operations Research*, 2002, 29(13): 1793-1806.
- [15] GRONKVIST J. Traffic controlled spatial reuse TDMA in multi-hop radio networks[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Boston, USA: IEEE, 1998: 1203-1207.
- [16] GUO Z, CHEN Y, DUAN M, et al. A token cycle scheduling of MAC protocols for TDMA based airborne ad hoc network[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology. Beijing, China: IEEE, 2009: 28-32.
- [17] KAMRUZZAMAN S M, ALAM M S. Dynamic TDMA slot reservation protocol for cognitive radio ad hoc networks[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Computer and Information Technology. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2010: 142-147.
- [18] MEDINA D, HOFFMANN F, ROSSETTO F, et al. A crosslayer geographic routing algorithm for the airborne internet[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-6.
- [19] JANG H, KIM E, LEE J J, et al. Location-based TDMA MAC for reliable aeronautical communications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 1848-1854.
- [20] LI J, GONG E, SUN Z, et al. An interference-based distributed TDMA scheduling algorithm for aeronautical ad hoc networks[C]//Proceedings of the International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Beijing, China: IEEE, 2013: 453-460.
- [21] DANG D N M, LE H T, KANG H S, et al. Multi-channel MAC protocol with directional antennas in wireless ad hoc networks[C]//Proceedings of the International Conference on Information Networking. Cambodia: IEEE, 2015: 81-86.
- [22] HOWLADER A, AHMED K M, RAHMAN M O. Distributed multi-radio multi-channel communication using directional MAC for IoT-based wireless networks[C]//Proceedings of the International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2019: 1-6.
- [23] YI S, PEI Y, KALYANARAMAN S. On the capacity improvement of ad hoc wireless networks using directional antennas[C]//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM, 2003: 108-116.
- [24] MA R T B, MISRA V, RUBENSTEIN D. An analysis of generalized slotted-Aloha protocols[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(3): 936-949.
- [25] NELSON R, KLEINROCK L. Spatial TDMA: A collision-free multihop channel access protocol[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1985, 33(9): 934-944.
- [26] CAIN J B, BILLHARTZ T, FOORE L, et al. A link scheduling and ad hoc networking approach using directional antennas[C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference. Boston, USA: IEEE, 2003: 643-648.
- [27] SRIDHAR B, CHEN N Y, RODIONOVA O, et al. Strategic planning of efficient oceanic flights: NASA-20190027238[R]. [S.l.]: NASA, 2019.
- [28] MEDINA D, HOFFMANN F, ROSSETTO F, et al. A geographic routing strategy for North Atlantic in-flight internet access via airborne mesh networking[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(4): 1231-1244.