

# 一种网络化卫星测控系统多址接入算法研究

富霭琳<sup>1</sup>, 郭 凯<sup>1</sup>, 于 勇<sup>1</sup>, 梁卫清<sup>2</sup>, 张增科<sup>2</sup>, 于晓黎<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 中国人民解放军 63618 部队 库尔勒 841000)

**摘要:** 大规模低轨卫星星座的出现, 对地面测控系统提出了更高的要求, 这使得网络化测控技术成为了各国研究的重点技术。本文针对低轨卫星网络化测控系统的接入问题进行了研究。首先, 概述了传统低轨卫星星座发展历程及多址接入技术需求背景; 然后, 在分析传统 CSMA (Carrier Sense Multiple Access, 载波侦听多路访问) 与 TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址) 接入技术性能的基础上, 提出了一种自适应接入方案, 使得网络化测控系统在负载量较高或较低时都具有良好的网络性能。本文通过仿真验证了自适应接入技术在系统时延、吞吐量以及信道利用率上的优越性。

**关键词:** 网络化测控系统; 多址接入技术; 自适应接入技术; OPNET 仿真

中图分类号: V556; TN915.03 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)03-0016-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20221227002

引用格式: 富霭琳, 郭凯, 于勇, 等. 一种网络化卫星测控系统多址接入算法研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 16–23.

## Research on multiple access algorithm of network satellite TT&C system

FU Ailin<sup>1</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, YU Yong<sup>1</sup>, LIANG Weiqing<sup>2</sup>, ZHANG Zengke<sup>2</sup>, YU Xiaoli<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. People's Liberation Army of China 63618, Korla 841000, China)

**Abstract:** The appearance of large-scale low earth orbit satellite constellation puts forward better requirements for the ground TT&C system. So many countries focus on measurement and network system. In this paper, the access problem of satellite TT&C network system is studied. Firstly, the development history of traditional low orbit satellite constellation and the demand background of multiple access technology are summarized. Then, based on the analysis of traditional access such as CSMA and TDMA, an adaptive access scheme is proposed, which makes the measurement and control system have nice performance when the load is high or low. In this paper, the advantages of the adaptive access scheme in system delay, throughput and channel utilization are verified by simulation.

**Keywords:** TT&C System; Multiple access; Adaptive access; OPNET simulation

**Citation:** FU Ailin, GUO Kai, YU Yong, et al. Research on multiple access algorithm of network satellite TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 16–23.

## 引 言

航天技术的迅猛发展给人类世界带来了显著影响。近年来, 以商业运载火箭、商业卫星为代表的商业航天在全球范围内异军突起, 已经成为世界航天活动高速发展的主要驱动力和重要发展领域。快速发展的微小卫星技术和低成本运载技术大幅降低了进入太空和利用太空的成本, 引发了全球范围的轨道革命, 带来了卫星领域的深度

变革和应用创新。

国际上, 以 SpaceX 为代表的商业航天公司在新一代大规模卫星星座的建设上先声夺人。2015 年 1 月, 马斯克宣布 SpaceX 计划建设一个由 4.2 万颗卫星组成的“星链”网络, 提供全球范围内的互联网服务。在国内, 中国提出了“鸿雁星座”、“虹云工程”、“九天微星”以及“银河航天”等大型低轨星座系统。2020 年 9 月, 中国正式向国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)

提交了中国低轨卫星的轨道和频率申请资料,申请的两个星座代号分别为GW-A59和GW-2,总计星座数量为12 992颗,从此我国迈入了巨型星座时代<sup>[1]</sup>。

传统测控网通常需要针对各个航天器制定独立的测控计划,再发布到各个测控站,由测控站执行具体的测控任务。这种测控流程使用方式缺乏灵活性。随着在轨航天器数目的增多,航天测控任务的规划将更加复杂。同时,传统的航天测控计划流程制定、实施周期相对较长,无法满足未来快速进入空间的航天器的测控需求。随着发射卫星数量的增加,在轨运行的卫星数量和种类增长,地面测控资源逐渐紧张,需要对航天测控技术做出改进与创新<sup>[2]</sup>,来确保大规模卫星星座的测控任务顺利完成。

目前,一种较为可行的大规模低轨卫星测控方案是采用网络化测控系统<sup>[3]</sup>,由单个地面站对多颗进入可视范围内的卫星进行自主测控。卫星根据自身测控需求向地面站发起测控请求,地面站接收到卫星的测控请求后,自主分配测控资源。当卫星离开地面站可视范围后,自动断开连接,直到卫星进入下一个地面站的可视范围并再次完成接入。网络化测控系统不依靠中心进行规划,而是自行调度测控资源,可实现测控资源的灵活分配,是解决测控资源紧张的重要途径<sup>[4]</sup>。近年来,网络化遥测系统标准被纳入IRIG 1069<sup>[5]</sup>。

作为网络化测控系统中的关键技术,多址接入技术用于给每个卫星节点的信号赋予不同的特征,用来区分不同的用户卫星,使得多个卫星可以同时共享一个地面站测控信道资源。目前,多址接入被广泛应用在地面无线网络、卫星通信系统等场景,针对卫星测控网络中的应用研究仍处于起步阶段。常用的多址接入协议可以分为三类:竞争类、非竞争类和混合类接入协议。竞争类协议中,各节点自主访问信道,当发送数据包发生碰撞时,节点按照退避策略随机退避,公平竞争信道资源。目前,在低轨卫星通信系统中比较常用的接入协议——传统ALOHA(世界上最早的无线电计算机通信网)多址接入协议的理论最大吞吐量仅为0.184帧,而改进的时隙ALOHA(Slotted-ALOHA, S-ALOHA)多址接入协议的理论最大吞吐量为0.368帧<sup>[6]</sup>,在实际的低轨卫星系统中,系统的吞吐量远远达不到理论最大值,在用户需求

较多的系统中,现有的随机多址接入协议远远不能满足低轨卫星通信系统的用户需求。竞争类多址协议在充分考虑竞争公平性和合理分配信道资源的情况下具有较低的算法复杂度<sup>[7]</sup>。

相比之下,非竞争类的协议中,各节点按照协议占有固定的信道资源,因此不会发生冲突,从而保证网络拥塞时的最差时延。但当节点数量少时,部分时间内信道将会处于空闲状态,这使得网络性能较差,平均时延较高。典型的非竞争类协议包括TDMA协议、CDMA协议以及FDMA协议。

混合类协议结合了竞争类和非竞争类协议的优点,可以在动态的星间网络中实现较好的网络性能,成为了近些年来卫星网络接入协议领域的研究热点。例如,Chen B等人提出了一种LDMA(Load Division Multiple Access,负载划分多址接入)协议,这种协议适用于网络竞争水平发生变化的低轨卫星网络<sup>[8]</sup>。Injong Rhee等人提出了一种针对无线传感器网络的混合类MAC(Multiple Access Control,多路访问控制)协议:Z-MAC协议<sup>[9]</sup>。

本文提出了一种适用于大规模低轨卫星星座网络化测控系统的自适应CSMA/TDMA混合协议。CSMA协议能够充分利用信道,TDMA协议允许无碰撞传输。基于CSMA/TDMA的自适应接入协议可以充分发挥多址接入技术的优势,提高网络性能。

## 1 网络化卫星测控系统

### 1.1 网络化测控系统发展与现状

航天测控系统最早兴起于19世纪初,是随着导弹试验靶场的建设而发展起来的。此后,随着航天技术的需要而迅速发展,取得了一系列的成果。随着互联网技术的逐渐发展,美国意识到了网络技术在测控领域内的应用。2004年9月,CTEIP(Central Test and Evaluation Investment Program,中央试验与评价投资项目)管理者得出结论,网络化改进遥测系统能够满足MRTFB(Major Range and Test Facility Base,主要范围及试验设备基地)的工程需求。同年10月,启动了iNET(integrated Network Enhanced Telemetry,增强遥测综合网)项目开发计划。以美国靶场iNET系统为例,网络遥测和点对点遥测系统连接在一起。点对点遥测系统仅发送需要高实时性传输的数据,以便将

点对点遥测系统的数据链带宽降到最小, 大部分数据通过网络遥测传输<sup>[10]</sup>, 这种集成体现了“一体化”的概念。

近年来, 以计算机网络为核心的网络化测控技术与网络化数据共享得到越来越多的应用, 尤其是在航空航天等国防科技领域。新一代控制系统软件以网络为中心实现各种复杂的分布式应用。随着测控任务日趋复杂以及大范围多目标测控要求的日益增多, 组建远程测控、网络化测控系统非常必要。我国已在“十三五”规划中将“天地一体化信息网络”纳入“科技创新 2030 重大项目”<sup>[11]</sup>, 同时, 卫星互联网首次被明确列入新基建信息基础设施范围, 与 5G 网络、物联网并列, 体现了国家对空天地一体化网络建设的高度重视<sup>[12]</sup>。

## 1.2 网络化卫星测控系统构想

面对大规模低轨卫星系统的测控需求, 网络化测控系统通过多星自适应多址接入、多个测控站接力覆盖等手段实现对卫星的灵活测控。

多个测控站分别布设在规划好的点位, 各站负责指定空域内的卫星测控任务, 完成以测控站为中心的一定范围内的空域覆盖; 多个测控站覆盖的空域相互拼接、交叠, 形成对测控空域的网络化、无缝覆盖, 目标不论出现在区域的任何位置, 均具备和至少一个测控站之间建立无线链路的条件。而随着相控阵多波束天线技术的发展, 单个测控站可同时为多个卫星用户提供高增益信道链路, 进一步提高了网络化测控系统的技术可行性。

考虑到天馈等物理层资源的实现, 网络化测控系统可考虑以下两类方案:

① 基于全向天线的接入信道和基于高增益天线的业务信道测控站和卫星之间的无线信道分为接入信道和业务信道。测控站采用全向天线完成对相应空域的全时、全覆盖, 提供接入信道。接入信道用于卫星用户和测控站之间传输上下行接入控制信号, 完成用户接入后, 由测控站为卫星分配业务信道。测控站采用定向高增益天线提供对指定目标的业务信道, 用于传输遥控指令、遥测信息和数传数据。

② 基于定向高增益天线波束拼接覆盖的无线信道。地面站采用固定多波束拼接方案, 利用数字多波束技术, 形成多个独立的高增益波束, 分别指向固定空域, 完成以测控站为中心的一定范

围内的同时全空域覆盖。固定多波束拼接方案中, 参与合成的天线单元越多, 形成的波束增益越大, 系统作用距离越远; 同时, 波束宽度越小, 覆盖全空域需要的波束数量越多, 测控站的处理压力也越大。因此, 进行固定多波束拼接方案设计, 需综合考虑空域大小、卫星轨道特性、地面处理能力等多种因素, 进行综合权衡。

在该方案中, 卫星用户可直接在同一个高增益无线信道中完成多址接入和业务数据传输, 无需再进行信道切换。

本文将基于第②种系统构想, 假定地面系统采用基于定向高增益天线波束拼接覆盖的无线信道, 在此基础上重点开展卫星接入地面信道的多址接入协议研究。

## 2 网络化卫星测控系统的自适应接入算法

### 2.1 星地网络信道接入模型

#### 2.1.1 接入流程概述

网络化测控系统由航天器测控终端、天基测控卫星、地基测控站和测控管理中心组成, 形成天地一体化的测控网络。本文的场景是大规模低轨卫星星座网络化测控系统, 针对多颗卫星同时进入地面站可视范围内的情况进行研究, 因此需要对系统进行简化。系统组成包括: 一个地面站和若干颗低轨卫星。网络化测控系统借鉴蜂窝移动网络的随机接入机制, 将卫星、测控站分别看作移动终端和基站, 在测控网中引入多址接入技术, 在全空域波束覆盖范围条件下, 只要航天器进入波束范围就能接入测控网络进行测控。

地面站周期性地向其可视范围内的空域发送接入广播帧, 低轨卫星接收到广播信号后, 将自身的 ID、健康状态、业务申请信息等打包成接入帧, 并下发给地面站, 地面站捕获到该下行信号即完成接入过程。完成接入后, 卫星继续周期性地向地面站汇报自己的状态, 并判断是否进行节点切换或离网。当卫星根据星地相对仰角做出离网判据时, 向地面站发送离网申请帧, 退出在网状态。

上述流程中, 地面站上行发送接入广播帧不存在多址问题。多颗卫星下行发送接入帧以及离网申请帧时, 地面站如何有效区分来自各个卫星的信号, 是多址技术需要解决的难点。

自适应接入算法根据系统负载情况进行自适应调整, 在负载较大和负载较小的情况下都能保

证系统具有良好的吞吐量特性和时延特性。因此,本文通过采用自适应接入算法,以最优性能完成多址信号的捕获。

### 2.1.2 接入节点多址管理分析

在网络化测控系统中,需要实现较大的吞吐量和较小的接入时延。一般而言,CSMA协议适用于传输负载较小的情况,TDMA协议相反。自适应接入协议结合两种协议的优势,合理切换协议模式,使得系统的吞吐量最大,而整体时延控制在阈值以下。以上就是自适应接入算法的研究目标。

实际场景下,造成地面站传输负载压力的原因主要有两个:初入站卫星接入申请帧和在网状态下卫星的周期汇报帧。本文的网络化测控系统主要考虑接周期性汇报帧对地面站造成的负载压力。考虑到地面站多路并行捕获能力,假设地面站具备平均每秒可以完成7路卫星信号的高概率捕获处理能力。每颗卫星要传输的数据包到达速率服从参数为 $\lambda$ 的泊松分布,具体到达时间间隔的概率和到达时间间隔的平均长度如下<sup>[13]</sup>:

$$P_i = \lambda e^{-\lambda}; M_i = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

## 2.2 自适应接入协议算法

根据分析,网络化测控系统需要在CSMA和TDMA协议之间进行切换,在保证平均时延处于最大时延阈值范围内的情况下,使系统吞吐量最大化。因此,首先需要对系统吞吐量和平均实验进行分析。

### 2.2.1 CSMA协议分析

根据文献[14]中提出的Bianchi模型,802.11网络采用的标准的CSMA/CA接入机制,网络的平均时延 $E[D_{\text{CSMA}}]$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} E[D_{\text{CSMA}}] &= E[X] \cdot E[t_{\text{slot}}] \\ E[X] &= \frac{(1-2p) \cdot (W+1) + pW \cdot (1-(2p)^r)}{2 \cdot (1-2p) \cdot (1-p)} \\ E[t_{\text{slot}}] &= (1-P_{\text{tr}})\tau + P_{\text{sc}} P_{\text{tr}} T_{\text{sc}} + P_{\text{tr}}(1-P_{\text{sc}})T_{\text{c}} \\ T_{\text{sc}} &= t_{\text{RTS}} + 3t_{\text{SIFS}} + T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{ACK}} + 4\alpha + h + E[T_{\text{p}}] \\ T_{\text{c}} &= T_{\text{RTS}} + t_{\text{DIFS}} + \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

802.11协议采用4种不同的帧间间隔,包括短帧间隔(SIFS)、PCF帧间间隔(PIFS)、DCF帧间间隔(DIFS)和扩展帧间间隔(EIFS);控制帧主要包括RTS帧、CTS帧和ACK帧。其中,RTS帧用于获得信道的控制权,CTS帧用于响应RTS帧,ACK帧用于肯定确认。802.11协议采用二进制退

避算法进行随机退避, $E[X]$ 为成功传输一次数据包时,节点需要等待的平均时隙数量, $p$ 为发生碰撞的概率, $W$ 是最小竞争长度, $r$ 为最大的退避阶数, $E[t_{\text{slot}}]$ 为时隙的平均长度, $P_{\text{tr}}$ 为一个时隙内至少有一个节点准备发送数据包的概率, $\tau$ 是节点发送数据包的概率, $T_{\text{c}}$ 为发生一次碰撞所需要的总时间, $T_{\text{sc}}$ 为数据包成功传输的总时间, $T_{\text{RTS}}$ 、 $T_{\text{CTS}}$ 、 $T_{\text{ACK}}$ 分别为RTS帧、CTS帧、ACK帧的传输时间, $\alpha$ 为电磁波传输延迟, $h$ 为物理层头部的传输时间, $E[T_{\text{p}}]$ 为数据包的平均传输时间。标准802.11协议中SIFS定义为10 $\mu\text{s}$ 、DIFS定义为50 $\mu\text{s}$ 。星间协议考虑到卫星与地面间距离远超过地面上300m有效通信距离,需要进行一些更改。

吞吐量方面,当数据包到达速率服从均值为 $\lambda_i$ 的泊松分布时,节点成功传输数据包的概率为:

$$P_{\text{sc}}(i) = \frac{\lambda_i n (1 - \lambda_i)^{n-1}}{1 - (1 - \lambda_i)^n} \quad (3)$$

因此系统的吞吐量为:

$$\begin{aligned} H_{\text{CSMA}} &= \sum_{i=1}^M G(i) P_{\text{sc}}(i) \\ G(i) &= \frac{\lambda_i n}{M} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $G(i)$ 为第 $i$ 个时隙的传输负载。

### 2.2.2 TDMA协议

TDMA协议采用M/G/1排队模型,每颗卫星按照地面站分配的时隙传输数据,直到完成数据包的传输。本文假设每次传输的数据包大小相同,每颗卫星都有数据传输,传输失败仅与碰撞有关。

根据文献[15]的分析,可得:

$$E[D_{\text{TDMA}}] = \delta + \frac{n\delta}{2} + \frac{n\delta N[H_{\text{TDMA}}]}{2(1-N[H_{\text{TDMA}}])} + R \quad (5)$$

其中, $N[H_{\text{TDMA}}]$ 为TDMA的归一化吞吐量, $R$ 为传播时延,即接入节点到网络覆盖最远端间距离的往返时间, $\delta$ 为传输时延,在本系统中可以认为是一个时隙的时间长度, $\delta$ 、 $R$ 与数据包的传输速率和传输距离有关。

吞吐量方面,由于各节点按照分配的时隙进行数据包传输,不存在数据包发生碰撞的情况,而本文假设传输失败仅与碰撞有关,因此节点成功传输数据包的概率 $P_{\text{sc}}(i)$ 为1。

### 2.2.3 自适应接入算法

根据上述分析,需要保证在平均时延小于能够忍受的最大时延阈值的情况下,系统仍具有较

大的吞吐量。因此，自适应接入算法的流程如图 1 所示。

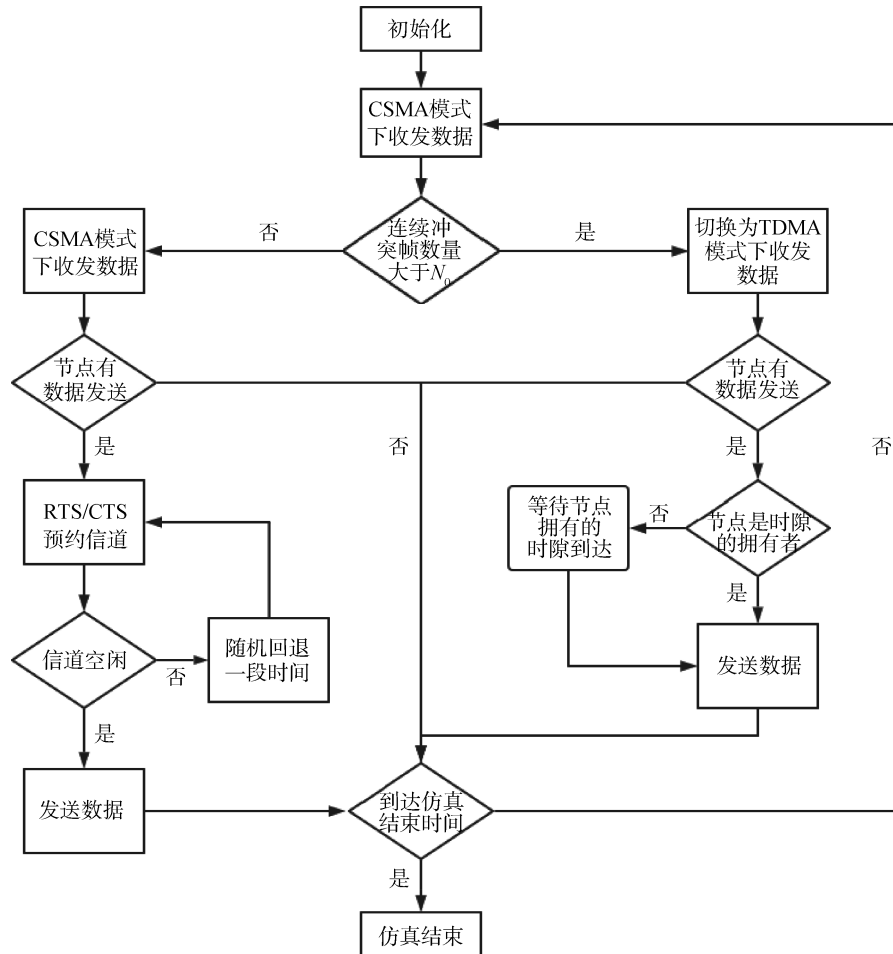


图 1 自适应接入协议流程

Fig. 1 Adaptive access protocol flow

首先为节点分配时隙。假设时隙数量超过需要接入的卫星数量，即如果需要接入的节点数量个数最多为  $N$  个，则为这个系统分配的时隙数量为  $N$ 。如果此时接入的节点数量小于  $N$ ，则再次为节点分配时隙直到  $N$  个时隙全部用完，占有这个时隙的节点称为主节点。系统默认工作在 CSMA 模式下，利用侦听过程中收到的帧来设置 NAV 计时器，从而避免冲突。若 NAV 计时器不为零，则信道忙碌，不发送信号；若 NAV 计时器为 0，则认为信道空闲，节点进行随机退避后再次检测信道状态。802.11 协议采用二进制指数退避机制，具体过程为：首先，在竞争窗口随机选择一个时隙，退避时间为  $n_{\text{Random}} \times t_{\text{Slot}}$ ，其中  $n_{\text{Random}}$  为处于  $[0, CW]$  区间内的领用平均分布获得的一个伪随机数， $CW$  处于  $[CW_{\text{min}}, CW_{\text{max}}]$  之间，初始值为  $CW_{\text{min}}$ 。每当重传计数器累

加，竞争窗口转移到下一个 2 的指数倍数，即取值每次按照 2 的指数倍减 1 递增。选择退避时间后，启动退避计数器，当退避计数器完成计数后，退出随机退避阶段。

退避机制能够一定程度上避免冲突，从而降低系统时延、提高吞吐量。而本文通过自适应协议，使系统在高负载情况下的表现类似于 TDMA 协议，固定分配时隙提高信道利用率。因此本文对退避阶段进行简化，退避计数器启动后产生一个退避时间，同时计时器开始自减，最先减到 0 的节点率先完成退避阶段，进入发送流程。

信道空闲且节点完成退避后仍为空闲状态时，表示节点竞争信道成功，准备发送数据。发送 RTS 帧，启动 CTS 超时计数器，进入等待 CTS 状态。接收到 CTS 信号后，发送 DATA，同时启动 ACK

超时计数器,进入等待ACK状态。节点正确接收到目的节点发送的ACK信息后,若节点没有要继续发送的数据,则信道进入空闲状态,若仍有数据要发送,则需要重新竞争信道。

若连续冲突帧多于 $N_0$ 个,则认为系统工作在高负载情况,根据2.2.2章节的分析,TDMA协议在高负载的情况下能够使系统具有较高的吞吐量和较低的系统时延。因此一旦连续冲突帧的数量大于 $N_0$ 个,系统发送通知切换到TDMA模式,根据预先分配好的时隙固定发送数据。

### 3 仿真与分析

#### 3.1 仿真参数设置

对地面站与7颗低轨卫星的接入情况进行仿真分析,星地链路的最大距离为1 196 km,频率为114.3 MHz,信道传输速率为2 Mb/s,数据包大小为1 000 b。考虑到信号处理和传播时延,定义时隙为10 ms,SIFS为5 ms,DIFS为25 ms, $CW_{min}$ 为7, $CW_{max}$ 为256。下面针对不同业务量的系统吞吐量、MAC时延和信道利用率进行OPNET仿真。仿真期间,地面站节点负责收集吞吐量信息、统计协议的信道利用率,卫星节点各自收集MAC时延信息。仿真时间为300 s,所统计的结果均为多次仿真统计的平均结果。系统采用理想信道模型,不考虑噪声、误码率的影响,丢包现象只由数据冲突和接收时间超过超时计数器造成,不考虑发起业务概率和成功申请信道概率。自适应协议切换条件只与连续冲突帧数量有关, $N_0$ 取5。发生切换后立刻重刷协议,重新计算连续冲突帧数。

#### 3.2 仿真结果

##### 3.2.1 轻度负载

轻度负载情况下,业务量大小为exponential(10)(指数函数, $e^{10}$ ),自适应协议(Self-adaption)与TDMA协议、CSMA协议吞吐量与信道利用率性能对比如图2、图3所示,其中,蓝色为自适应协议(my\_sa),红色为TDMA协议(my\_tdma),绿色为CSMA(my\_csma)协议。可以看出,轻度负载下,自适应协议的吞吐量和信道利用率均大于TDMA协议,比CSMA协议稍高。原因在于自适应协议在轻度负载情况下类似CSMA协议模式,节点在任意时刻都可以竞争信道,提高了信道利用率,降低系统时延,同时由于优先竞争的原则,自适应协议的碰撞概率小于CSMA协议,吞吐量

更高。

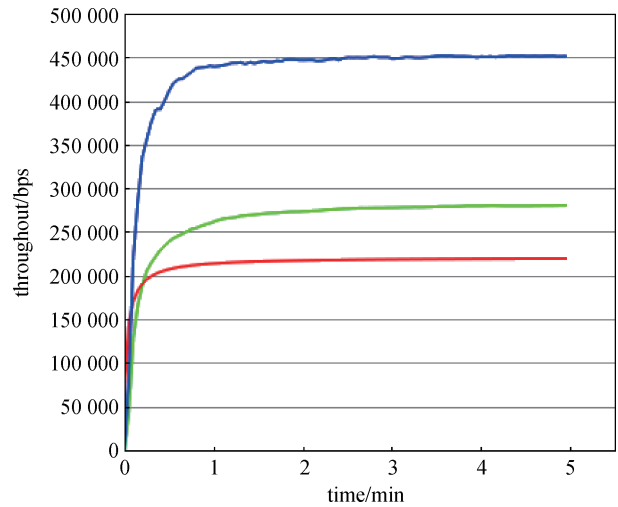


图2 轻度负载下吞吐量性能对比

Fig. 2 Throughput performance comparison under light load

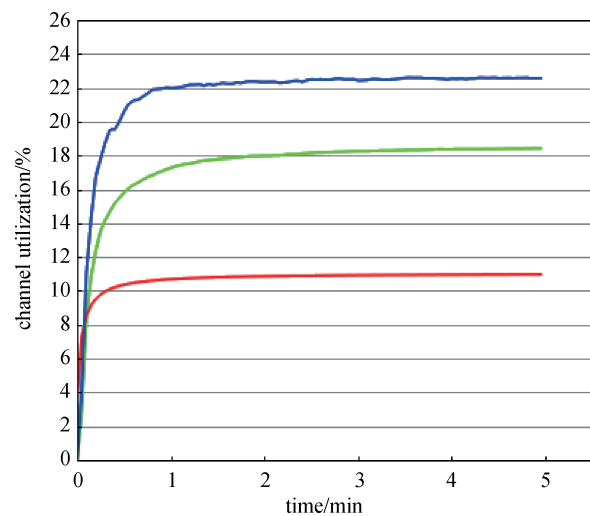


图3 轻度负载下信道利用率对比

Fig. 3 Channel utilization performance comparison under light load

时延方面,自适应协议的时延特性优于TDMA协议,但略劣于CSMA协议。轻度负载情况下,TDMA协议需要等待较长的时间,在分配好的时隙内发送数据,因此时延特性劣于CSMA协议。此时自适应协议表现类似CSMA协议,但由于RTS/CTS预约信道机制,导致排队时延增加。

轻度负载条件下各参数如表1所示。

##### 3.2.2 高度负载

高度负载情况下,业务量大小为exponential

表 1 轻度负载条件下系统性能

Table 1 System performance comparison under light load

load		
协议	吞吐量	信道利用率
自适应	451 kbps	22.6%
CSMA	280 kbps	18.4%
TDMA	219 kbps	11.0%

(1), 自适应协议与 TDMA 协议、CSMA 协议吞吐量与信道利用率性能对比如图 4、图 5 所示, 其中, 蓝色为自适应协议(my\_sa), 绿色为 CSMA(my\_csma) 协议, 红色为 TDMA 协议(my\_tdma)。可以看出, 高度负载下, 自适应协议的吞吐量和信道利用率均大于 CSMA 协议, 比 TDMA 协议稍高。原因在于自适应协议在高度负载情况下类似 TDMA 协议模式, 节点在预先分配好的时隙内发送数据, 同时由于优先竞争的原则, 空闲帧较多时协议切换为 CSMA 模式, 提高了信道利用率。

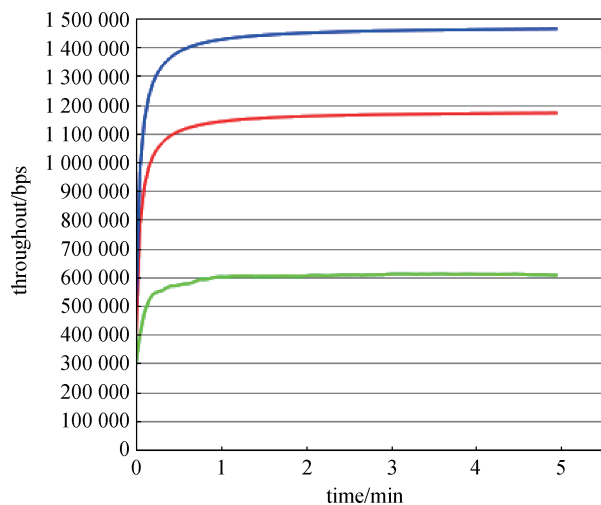


图 4 高度负载下吞吐量性能对比

Fig. 4 Throughput performance comparison under high load

时延方面, 自适应协议的时延特性优于 TDMA 协议和 CSMA 协议。高负载情况下, CSMA 协议的冲突概率较高, 时延特性劣于 TDMA 协议。此时自适应协议表现类似 TDMA 协议, 具有良好的时延特性。

高度负载条件下三种协议的性能如表 2 所示。

#### 4 结束语

本文在介绍了发展网络化测控系统的必要性

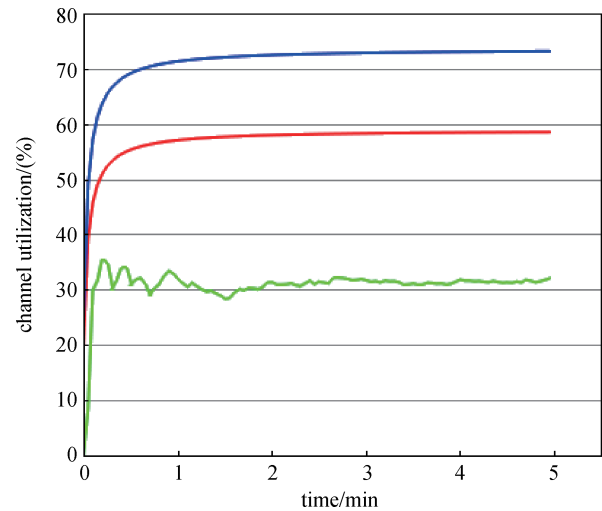


图 5 高度负载下信道利用率对比

Fig. 5 Channel utilization performance comparison under light load

表 2 高度负载条件下系统性能

Table 2 System performance comparison under high load

load		
协议	吞吐量	信道利用率
自适应	1 463 kbps	73.17%
CSMA	611 kbps	32.05%
TDMA	1 170 kbps	58.54%

后, 针对多星、多任务测控问题的解决方案——多址接入方案进行了研究, 概述了常用的多址接入协议, 并提出了一种适用于网络化测控系统的自适应类多址接入方案, 最后通过仿真验证了自适应类多址接入技术在时延、吞吐量、信道利用率方面的优越性能, 证实了自适应多址接入技术对网络化测控系统研究有积极作用。

#### 参考文献

- [1] 康国栋, 张楠, 王崇, 等. 面向大规模星座的多波束测控天线及应用[J]. 空间电子技术, 2021, 18(2): 72-78.  
KANG Guodong, ZHANG Nan, WANG Chong, et al. Multiple-beam TT&C antenna and its application for large scale satellite constellation[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(2): 72-78.
- [2] 李艳华, 李凉海, 谌明, 等. 现代航天遥测技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2018.
- [3] 李怀健, 韦彦伯, 杜小菁. 低轨星座与低轨卫星导航算法发展现状[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 57-66.  
LI Huaijian, WEI Yanbo, DU Xiaojing, et al. Develop-

- ment of LEO constellation and LEO satellite navigation algorithm[J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 57-66.
- [4] 罗迪. 卫星通信[M]. 郑宝玉, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [5] 陈雨迪, 刘燕都, 焦义文. 从 IRIG106 看遥测网络标准 TmNS 发展[J]. 遥测遥控, 2019, 40(6): 14-21.  
CHEN Yudi, LIU Yandu, JIAO Yiwen. Viewing the development of telemetry network standard from IRIG 106[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(6): 14-21.
- [6] 黄长文, 朱立东. 低轨卫星系统扩频 ALOHA 多址接入性能分析[C]//第十三届卫星通信学术年会论文集, 2017: 86-93.
- [7] CHEN B, YU L. Design and implementation of LDMA for low earth orbit satellite formation network[C]//2011 IFIP 9th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, IEEE, 2011: 409-413.
- [8] 张瑞杰, 彭琳琳, 付林罡, 等. 海上无人船自组网随机接入仿真研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 29-35.  
ZHANG Ruijie, PENG Linlin, FU Lingang, et al. Random access technique for unmanned surface vehicle ad-hoc network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 29-35.
- [9] RADHAKRISHNAN R, EDMONSON W W, AFGHAH F, et al. Optimal multiple access protocol for inter-satellite communication in small satellite systems[C]//4S Small Satellite Systems and Services Symposium, 2014.
- [10] 郭琦, 刘敏. 我国未来测控设备资源重组系统建设构想[J]. 电讯技术, 2010, 50(2): 111-114.  
GUO Qi, LIU Min. System construction conception for future China's TT&C equipment reconstruction[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(2): 111-114.
- [11] 中国电科电子科学研究院. 电科院科技创新盘点之天地一体化信息网络[EB/OL]. (2018-12-27)[2022-12-10]. <https://www.sciping.com/23739.html>.
- [12] 蒋东霖. 测控网络多用户接入技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [13] 闫朝星, 付林罡, 谌明, 等. 天地信息网络协议融合技术综述[J]. 遥测遥控, 2020, 41(6): 30-38.  
YAN Chaoxing, FU Lingang, CHEN Ming, et al. Overview of space-ground information network integration techniques[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(6): 30-38.
- [14] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3): 535-547.
- [15] 朱子行, 梁俊, 赵辉. 基于 TDMA 的临近空间通信网 MAC 层协议仿真[J]. 电讯技术, 2009, 49(6): 19-22.  
ZHU Zihang, LIANG Jun, ZHAO Hui. Simulation of MAC protocol in TDMA-based near space communication network[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(6): 19-22.

#### [作者简介]

富霖琳 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为航天测控通信。

郭凯 1982年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信。

于勇 1971年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达总体技术、雷达信号处理技术。

梁卫清 1986年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为航天测控和无线通信。

张增科 1985年生, 大专, 工程师, 主要研究方向为卫航天测控和装备保障。

于晓黎 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天遥测遥控。

(本文编辑: 傅杰)