

天基数据传输网络的多用户动态带宽分配技术

楚建祥¹, 黄 印¹, 王 崇², 曹云泽¹

(1.北京遥感设备研究所, 北京 100086;

2.航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100086)

摘 要: 航天器的测控、数据传输分为天基和地基两种方式, 其中天基的测控、数据传输因具有全球覆盖、随遇接入、实时信息回传等优势, 具有很广泛的应用前景, 同时对其多航天器的动态带宽分配提出了一定要求。在研究中高轨测控、数据传输星座网络架构和多址接入协议的基础上, 提出面向数据传输任务的星上多波束、多航天器用户、多任务优先级的动态带宽分配算法, 能很好地应用于中高轨星座按需、实时对多个用户的数据传输请求进行资源分配, 并可作为天基测控、数据传输接入网络的基础模型。

关键词: 中高轨星座; 测控数据传输; 多址接入; 动态带宽分配

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022046

Multi-Users Dynamic Bandwidth Allocation Technology of SDTN

CHU Jianxiang¹, HUANG Yin¹, WANG Chong², CAO Yunze¹

1. Beijing Remote Sensing Equipment Institute, Beijing 100086, China

2. Aerospace Science and Industry Space Engineering Development Co., Ltd, Beijing 100086, China

Abstract: The TT&C and data transmission of spacecraft are divided into two methods: space-based and ground-based. Among them, space-based method has the advantages of global coverage, access at any time, and real-time information return, and have a wide range of application prospects. But it also puts forward certain requirements for the dynamic bandwidth allocation of its multi-spacecraft. Based on the studied of medium-orbit TT&C, data transmission constellation network architecture and multiple access protocols, a dynamic bandwidth allocation algorithm for on-board multi-beam, multi-spacecraft users, and multi-task priorities for data transmission tasks was proposed. It was very suitable for the on-demand and real-time resource allocation of data transmission requests of multiple spacecraft in the mid-orbit constellation, and could be used as a multiple access protocol model for space-based measurement and control and data transmission access networks.

Keywords: medium-high orbit constellation, TT&C and data transmission, multiple access, dynamic bandwidth allocation

0 引言

随着商业航天的蓬勃发展, 低地球轨道上将聚集多类高分辨、中长波红外、相机等遥感卫星, 实现对地球重点地区的全天时、全天候和分钟级的重访, 在城市、生态、农业、林业、应急、海洋等领域开展业务化的遥感应用。2022年2月, 丝路天图首发星发射, 服务秦岭地区生态环境保护, 对重点地区进行常态化监测和应急响应。2022年2月, 巢湖一号SAR卫星发射, 具备区域多点目标的6小时应急成像能力。2022年4月, 道达星座首批4

星发射, 打造新一代低轨高分辨率遥感卫星, 满足国土资源普查、城市规划、灾害监测等行业领域需要。2022年4月, 安溪铁观音二号卫星发射, 可实现分辨率优于0.5 m、幅宽15 km的静态推扫影像, 为安溪县茶产业数字化建设赋予新动能等。低地球轨道卫星具备对地观测分辨率高的优势, 但是实现遥感数据信息的实时回传需要数百颗低轨小卫星组网运行才能够实现, 建设成本巨大, 因此通过在中地球轨道建设测控、数据传输通信星座, 实现对海量的遥感卫星、侦察飞机、平流层气球等

地表至1万千米轨道高度的航天器进行实时数据传输是非常有意义的。

天基测控、数据传输网络可以通过十多颗中高轨卫星组网运行,实现全球的无缝覆盖,满足地表至1万千米轨道高度的各类航天器的实时测控、数据传输等需要,其中每颗中高轨卫星下的多个航天器可以共享中高轨卫星的无线接入资源,且根据用户的服务等级协议(Service Level Agreement, SLA)动态获取分配带宽,满足差异化的数据传输需求。近年来,卫星天线技术的发展给星地网络融合领域带来了重大的变革,卫星数据传输天线波束可通过点波束、捷变、频分实现对多个航天器的同时跟踪,满足多个航天器同时传输数据,但是也给星上的动态带宽分配增加了复杂的维度。同时中高轨卫星距超低轨航天器的距离远,航天器的接入请求和带宽分配消息的传输往返时间(Round Trip Time, RTT)为百毫秒级别,导致中高轨卫星的接入转发带宽存在一定程度的空闲和浪费。因此需要研究面向数据传输任务的星上多波束、多航天器用户、多任务优先级的动态带宽分配算法,最大化地利用中高轨卫星的接入转发带宽资源,且降低航天器在波束间迁移的次数。

目前在星地融合网络多址接入及动态带宽分配方面的研究主要有以下几项。参考文献[1]提出了一种基于多频时分多址(MF-TDMA)的卫星时频资源分配算法,重点描述了卫星终端的需求预测及对星上资源分配算法模型,通过最优化权值提高带宽利用率,适用于空闲资源区或已经分配了部分资源的资源区。参考文献[2]提出了一种基于多频时分多址方案的多波束DRS系统,采用两阶段动态优化方法,将频率/时间块和功率的多目标优化分离开来,旨在快速收敛到最优解,同时满足资源分配的公平性,可以为分布式卫星星座提供多址接入能力,实现大容量数据传输。参考文献[3]提出了一种基于用户体验质量(QoE)感知的中继卫星带宽资源分配方法,建立基于多个地球静止轨道卫星协同接入模型,通过设置链路效能函数,其将低轨道用户卫星QoE满意度量化为链路反馈和链路成本,并用库恩-塔克方法求解,实现最大化系统效能和带宽公平分配。参考文献[4]提出了一种基于令牌桶的带宽分配改进方法。该方法在原有每一个优先级对应一个令牌桶的基础上,对不同优先级的业务设定不同的权值,以自适应业务速率的变化,通过业务权值的占用比例动态分配令牌资源。利用令牌桶嵌入漏桶机制实现对业务占用带宽的二次分配,根据业务优先级的高低对溢出的令牌实现依次填充,从而减少资源浪费。参考文献[5]提出了通用卫星下行链路系统多用户的联合功率和带宽分配模型,基于对偶分解

方法在放宽时延约束的情况下推导出功率和带宽分配,然后引入时延违反参数满足松弛前的时延约束,实现了吞吐量和时延性能之间的良好平衡。以上文献均从各自应用需求描述了各自带宽分配模型,但是没有具体考虑数据传输应用下的多用户、多优先级、多波束的资源分配以及远距离下的往返时延问题,且上述算法计算量大,不适合资源受限的星上处理平台使用。

1 系统模型

1.1 天基测控数据传输网络

天基测控数据传输网络由中高轨卫星、地面站和航天器用户组成。中高轨卫星之间通过星间激光链路组网,实现天基骨干节点的互联互通,中高轨卫星和地面站之间采用激光链路实现大容量的汇聚数据实时落地。中高轨卫星和航天器之间采用双模接入网复合设计,其中全向测控网实现窄带遥测信息接入和遥控信息分发,窄波束数据传输链路实现海量遥感、探测和预警等信息的实时回传。天基测控数据传输网络(Space-Base TT&C and Data Transmission Network, STDN)场景示意如图1所示。

天基测控数据传输网络基于控制平面和数据平面的分离进行设计。航天器用户在首次接入时需要通过控制平面完成中高轨卫星和航天器用户之间的双向安全认证,产生会话密钥,在数据传输过程中通过会话密钥计算消息验证码(MAC),防止非法用户接入和攻击网络,以保障网络的安全性。中高轨卫星维护本卫星下归属的所有航天器用户的ID、位置、密钥等信息。当航天器用户在中高轨卫星之间切换时,中高轨卫星修改航天器用户的名址映射关系表,并在中高轨卫星之间通过广播进行全网的名址映射关系同步更新,满足航天器用户在STDN的移动性管理。

控制平面依托X频段全向测控体制实现,通过“码分+ALOHA”的体制实现广域航天器用户的随遇接入和控制消息上下行传输。参考文献[7]提供了一种基于码道划分的随机接入方案,与传统的纯ALOHA协议相比,其将原始的相同频率资源划分成 N 个码道,航天器用户在 $1 \sim N$ 个码道中随机选择一个扩频码进行控制信息传输,可以大大降低海量航天器用户的控制信息的碰撞概率和接入时延。通过控制平面实现对航天器用户的管理和维护,通过数据平面进行窄带的高速数据传输服务,航天器用户指向性发射,中高轨卫星指向性接收。数据传输链路体制既可以是Ka频段微波体制,也可以是高速激光通信体制,其目的均是实现海量遥感数据的实时回传。下文以Ka频段微波数据传输应用模式为例进行描述。

在STDN中航天器的数据传输多址接入是通过“空

分+时分”（或频分+时分）的方式实现多用户之间的隔离，合理共享无线资源。数据传输分系统由多个点波束通过空分复用堆叠而成。每个点波束均采用一个专用的频率，保证各个点波束之间信号相互隔离，不会产生干扰，且物理层采用OQPSK+LDPC 8/9波形，实现较高的传输系统功率利用率。多航天器反向数据传输系统的模型如图2所示。

中高轨卫星对其服务下的多个航天器进行动态数据传输带宽分配时，主要考虑以下几个因素：一是由于存在带宽资源请求与分配授权的交互，航天器的数据传输开始之前存在资源空闲，因此需要设计专用的填充策略

对信令交互空闲时间进行填充，保证带宽资源的高效利用；二是在带宽分配过程中考虑业务负载的动态变化，根据航天器的实际业务需求自适应地调节分配给航天器的数据传输带宽；三是根据用户业务多样性，用户SLA存在差异，保证高优先级的航天器优先分配带宽；四是在前后两次动态带宽分配中，对同一个航天器尽可能地分配相同的反向数据传输接入波束，防止航天器因频点切换和业务迁移而引入额外数据传输时延。以最大化航天器用户的带宽分配为目标，重点考虑空闲时间填充、按负载分配、按优先级分配和避免波束切换，目标函数描述由式（1）表示

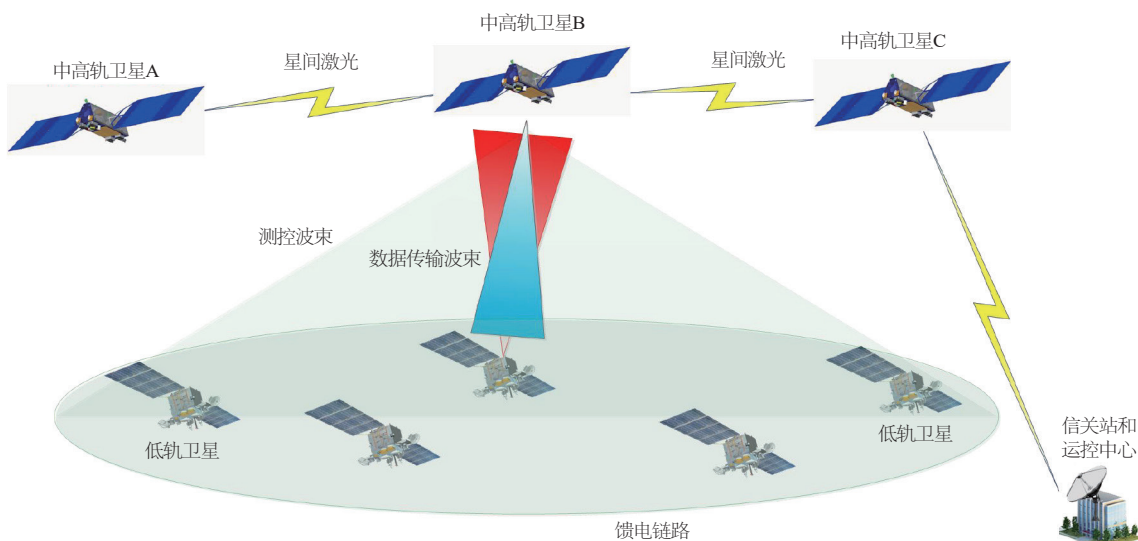


图1 天基测控数据传输网络场景示意

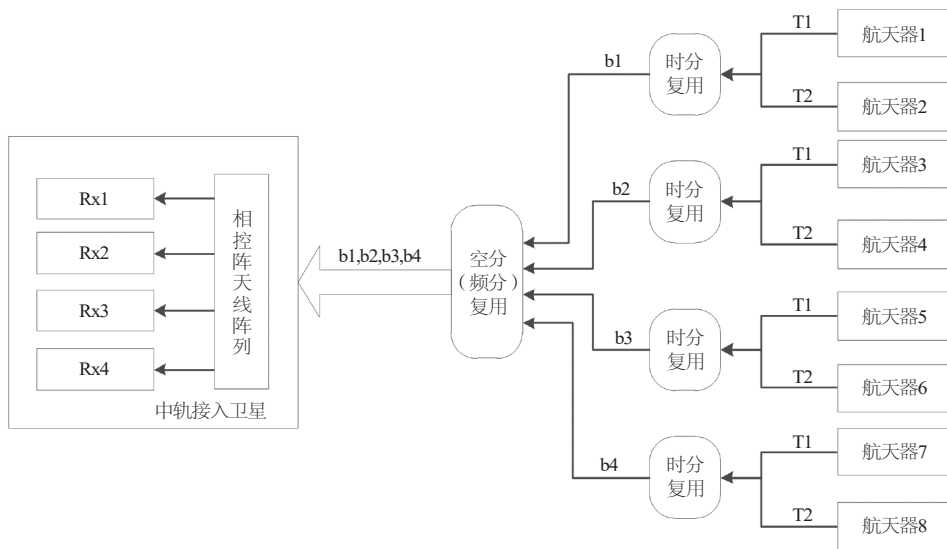


图2 多航天器反向数据传输系统的模型

$$\max \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N G_i^{k,j} \quad (1)$$

式中, M 表示中高轨卫星数据传输接收波束数量, N 表示用户航天器数量, k 表示第 k 个带宽分配周期, i 表示第 i 个航天器用户, j 表示中高轨卫星第 j 个反向数据传输的接收波束, G 表示分配给用户的授权带宽。

1.2 空闲时间填充机制

在STDN中, 航天器用户通过测控分系统实现上行数据带宽资源请求(U-REQ), 通过测控分系统获取上行带宽分配授权(U-GRT), 然后通过数据传输分系统完成宽带数据的传输。信令的往返时间为 RTT_i , 带宽分配算法的执行时间为 T_c , 一次带宽分配的周期时间为 T_p , 则有效带宽利用率为 $(T_p - RTT_i)/T_p$, 当 RTT_i/T_p 越大时, 数据传输带宽利用率越低。周期性带宽分配过程如图3所示。

当数据传输需求较低时, 中高轨卫星的转发带宽资源足够所有的航天器用户使用, 此时空闲时间对数据传输任务性能的影响较小。但是随着数据传输需求逐渐提高, 中高轨卫星的转发带宽资源不能完全满足航天器用户的使用时, 就需要对空闲时间进行有效利用, 因此根据不同数据传输负载需求设计不同的空闲时间填充策略。

(1) 在线填充方式

当数据传输需求量较低时, 采用在线填充方式, 即当接收到一个航天器用户的带宽分配请求时, 立即对这个航天器进行带宽分配, 而不需要等待其他所有航天器的请求。假设中高轨卫星在 $t_{end}^{k,j}$ 时刻接收第 k 个分配周期中最后一个航天器用户的传输数据, 则经过一段时间测控链路的资源预约后, 中高轨卫星可以在 $t_{begin}^{k+1,j}$ 时刻接收

第 $k+1$ 个分配周期中第一个航天器用户的传输数据, 因此数据传输转发带宽的空闲时间由式(2)表示

$$t_{idle}^{k+1} = t_{begin}^{k+1,j} - t_{end}^{k,j} = RTT_i + T_c \quad (2)$$

如果较高SLA的航天器用户在 t 时刻有新增数据传输需求, 该航天器用户就会向中高轨卫星发送U-REQ请求; 中高轨卫星接收到带宽请求消息后对其进行在线的资源分配, 并将分配结果通过U-GRT消息应答给航天器用户。可计算中高轨卫星接收到该航天器用户的传输数据的时间由式(3)和式(4)表示

$$t_{begin_fill}^{k+1,j} = \min\{t + RTT_i + T_c, \forall i \in (1, 2, \dots, N)\} \quad (3)$$

$$t_{end_fill}^{k+1,j} = t_{begin_fill}^{k+1,j} + T_{data_transmission} \quad (4)$$

如果满足 $t_{begin_fill}^{k+1,j} \geq t_{end}^{k,j} + t_{idle}^{k+1,j}$ 条件, 则说明中高轨卫星在空闲时间内接收不到该航天器用户的数据, 在线填充失败; 如果满足 $t_{begin_fill}^{k+1,j} < t_{end}^{k,j} + t_{idle}^{k+1,j}$ 条件, 则说明中高轨卫星在空闲时间内可以接收到该航天器的数据, 在线填充成功。在线填充过程中需要经过 $RTT_i + T_c$ 的时间航天器用户数据才能到达中高轨卫星, 因此距离中高轨卫星越近的航天器用户在线填充成功的可能性越高。

(2) 预分配填充方式

当数据传输需求量较高时, 采用预分配填充方式, 即在一个分配周期结束前就对下一个周期高SLA用户的带宽进行预分配, 以充分利用两次数据传输周期之间的空闲时间。如果要对空闲时间 $t_{idle}^{k+1,j}$ 进行填充, 那么高SLA的用户至少在 $t_{end}^{k,j} - RTT_i/2$ 时刻开始传输填充数据, 则中高轨卫星需要在 $t_{end}^{k,j} - RTT_i$ 时刻发送空闲时间的带宽授权消息, 可计算中高轨卫星接收到高SLA用户带宽请求消息的最晚时间由式(5)表示

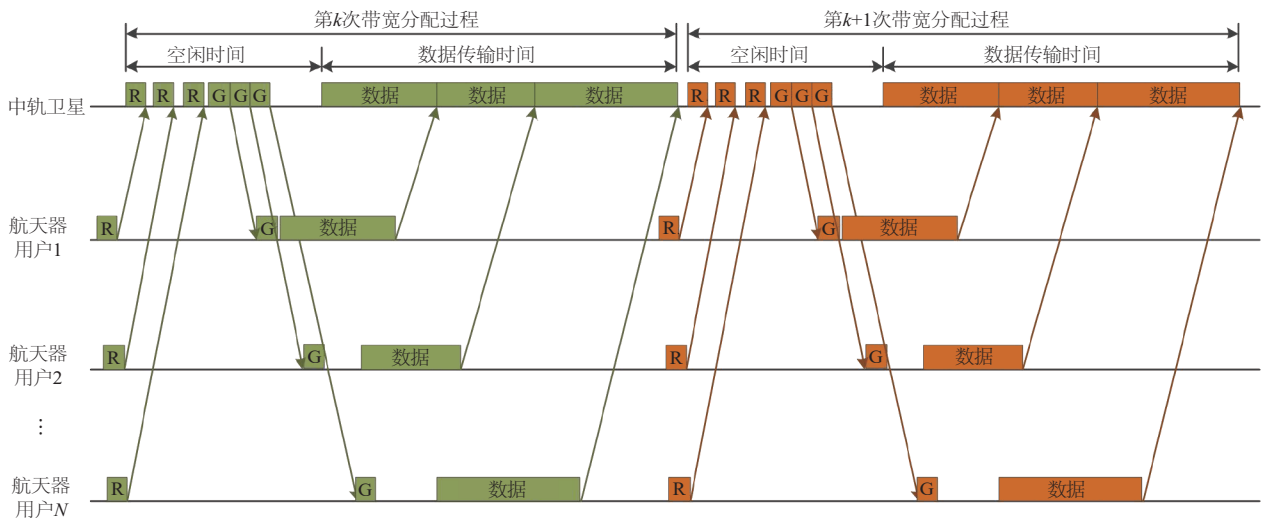


图3 周期性带宽分配过程

$$t_{\text{pre}}^{k+1,j} = \max\{t_{\text{end}}^{k,j} - \text{RTT}_i - T_c, \forall i \in (1, 2, \dots, N)\} \quad (5)$$

假设中高轨卫星在 $t_{\text{pre}}^{k+1,j}$ 时刻前接收到的带宽请求 U-REQ 消息数量为 P ，且每个航天器用户请求带宽对应的传输时间为 $\{t_{\text{pre}}^{k+1,1,j}, t_{\text{pre}}^{k+1,2,j}, t_{\text{pre}}^{k+1,3,j}, \dots, t_{\text{pre}}^{k+1,p,j}\}$ ，总的预分配时间由式(6)表示

$$t_{\text{pre}}^{k+1,j} = \sum_{p=1}^P t_{\text{pre}}^{k+1,p,j} \quad (6)$$

如果满足 $t_{\text{pre}}^{k+1,j} < t_{\text{idle}}^{k+1,j}$ 条件，则说明预分配的带宽所需传输时间小于空闲时间，填充成功，但是没有将空闲时间完全有效利用；如果满足 $t_{\text{pre}}^{k+1,j} \geq t_{\text{idle}}^{k+1,j}$ 条件，则说明预分配的带宽所需的传输时间大于或等于空闲时间，此时空闲时间完全利用，但是部分航天器用户的服务未完全满足，因此在分配带宽时需要按照 SLA 对航天器用户进行排序，从高到低依次对航天器用户的请求带宽进行预分配。

1.3 自适应优先级带宽分配

根据航天器遥测、侦察、评估等任务不同，将数据传输业务的优先级定义为4类，分别为时间敏感业务（Time-Sensitive Traffic, TT）、确保带宽业务（Assured-Bandwidth Traffic, AT）、非确保带宽业务（Non-Assured Bandwidth Traffic, NT）和尽力而为业务（Best-Effort, BT）。其中 TT 业务对时延非常敏感，需要定期分配固定的预约带宽，以实时将数据快速转发给地面应用中心。AT 业务对时延有一定要求，但是可以容忍一定的时延，需要根据具体的业务进行负载分配，如果有剩余带宽可以作为后续动态带宽使用。NT 业务对时延不敏感，但是仍需要少量的保证带宽，同时参与剩余带宽的动态分配。BT 业务处于最低的优先级，对时延不敏感，也不需要带宽保证，只参与剩余带宽的动态分配。考虑到中高轨卫星和不同的航天器用户之间通信速率与用户终端的天线口径相关，数据传输速率 R_i 存在差异性，因此本文定义带宽为占用中高轨卫星接收转发的时间长度，即每个航天器的带宽需求为需传输的数据负载量与通信速率的比值，计算公式为 $B_i^k = \text{Load}_i^k / R_i^k$ ，其中 Load_i^k 为第 k 次带宽分配时航天器用户需传输的数据负载量。

假设 TT 业务的最大保障带宽设置为 $\max(\text{TB1})$ ，AT 业务的最大保障带宽设置为 $\max(\text{TB2})$ ，NT 业务的最大保障带宽设置为 $\max(\text{TB3})$ ，BT 业务无最大保障带宽。最大保障带宽的取值需满足式(7)和式(8)

$$N[\max(\text{TB1}) + \max(\text{TB2})] \leq B_{\text{total}}^k \quad (7)$$

$$\max(\text{TB2}) \gg \max(\text{TB3}) \quad (8)$$

假设在第 k 次分配周期中 N 个航天器用户的 TT 业务带

宽请求列表为 $\{B_{1,\text{tt}}^k, B_{2,\text{tt}}^k, B_{3,\text{tt}}^k, \dots, B_{N,\text{tt}}^k\}$ ，AT 业务带宽请求列表为 $\{B_{1,\text{at}}^k, B_{2,\text{at}}^k, B_{3,\text{at}}^k, \dots, B_{N,\text{at}}^k\}$ ，NT 业务带宽请求列表为 $\{B_{1,\text{nt}}^k, B_{2,\text{nt}}^k, B_{3,\text{nt}}^k, \dots, B_{N,\text{nt}}^k\}$ ，BT 业务带宽请求列表为 $\{B_{1,\text{bt}}^k, B_{2,\text{bt}}^k, B_{3,\text{bt}}^k, \dots, B_{N,\text{bt}}^k\}$ 。自适应优先级带宽分配的处理流程如下。

第一步：对 TT 业务进行固定带宽分配，每个航天器用户 TT 业务的授权带宽按式(9)计算

$$G_{i,\text{tt}}^k = \max(\text{TB1}) \quad (9)$$

第二步：对 AT 业务进行确保带宽分配，每个航天器用户 AT 业务的授权带宽按式(10)计算

$$G_{i,\text{at}}^k = \min\{B_{i,\text{at}}^k, \max(\text{TB2})\} \quad (10)$$

第三步：授权 TT 业务固定带宽和 AT 业务确保带宽分配后，中高轨卫星的接入转发剩余带宽按式(11)计算

$$B_{\text{residue1}}^k = B_{\text{total}}^k - \sum_{i=1}^N G_{i,\text{tt}}^k - \sum_{i=1}^N G_{i,\text{at}}^k \quad (11)$$

第四步：如果满足 $B_{\text{residue1}}^k = 0$ 条件，则每个航天器用户的 NT 业务授权带宽 $G_{i,\text{nt}}^k = 0$ ，每个航天器的 BT 业务的授权带宽 $G_{i,\text{bt}}^k = 0$ ；否则，对 NT 业务进行确保带宽和非确保带宽分配，每个航天器用户 NT 业务的授权带宽按式(12)计算

$$G_{i,\text{nt}}^k = \min\left\{B_{i,\text{nt}}^k, \max(\text{TB3}), \frac{B_{i,\text{nt}}^k}{\sum_{i=1}^N B_{i,\text{nt}}^k} B_{\text{residue1}}^k\right\} \quad (12)$$

第五步：授权 TT 业务固定带宽、AT 业务确保带宽和 NT 业务带宽后，中高轨卫星的接入转发剩余带宽按式(13)计算

$$B_{\text{residue2}}^k = B_{\text{total}}^k - \sum_{i=1}^N G_{i,\text{tt}}^k - \sum_{i=1}^N G_{i,\text{at}}^k - \sum_{i=1}^N G_{i,\text{nt}}^k \quad (13)$$

第六步：对 BT 业务进行尽力而为带宽分配，每个航天器用户 BT 业务的尽力而为带宽按式(14)计算

$$G_{i,\text{bt}}^k = \begin{cases} \frac{B_{i,\text{bt}}^k}{\sum_{i=1}^N B_{i,\text{bt}}^k} B_{\text{residue2}}^k, & \sum_{i=1}^N B_{i,\text{bt}}^k > B_{\text{residue2}}^k \\ B_{i,\text{bt}}^k, & \sum_{i=1}^N B_{i,\text{bt}}^k \leq B_{\text{residue2}}^k \end{cases} \quad (14)$$

第七步：在第 k 次带宽分配过程中，每个航天器用户的总授权带宽可以按式(15)计算

$$G_i^k = G_{i,\text{tt}}^k + G_{i,\text{at}}^k + G_{i,\text{nt}}^k + G_{i,\text{bt}}^k \quad (15)$$

自适应优先级带宽分配采用离线方式进行，在一个分配周期中收集所有航天器用户的资源需求，并分配授权带宽。航天器用户通过 U-REQ 消息携带请求用户 EID、用户位置、TT 业务量、AT 业务量、NT 业务量、BT 业务量和 U-REQ 发送时刻；中高轨卫星根据接收到

的U-REQ消息中的用户位置,计算用户上行传输速率和各类业务的带宽需求,并执行自适用优先级带宽分配算法为每个航天器用户分配授权带宽;中高轨卫星通过U-GRT消息携带目标用户EID、中高轨卫星位置、分配的点波束号(或频率号)、数据开始传输时刻、数据传输时间长度和U-GRT发送时刻;航天器用户根据位置和时间信息进行校时,保持自身时间和中高轨卫星时间同步,根据分配的点波束号(或频率号)完成发射频率配置,然后在规定的数据开始传输时刻将波束指向中高轨卫星,持续传输数据到授权带宽使用完毕;与此同时,中高轨卫星根据授权带宽分配表在指定的时刻将对应的点波束指向授权接入的航天器用户,完成数据传输信息的反向接入转发。任何一个航天器用户的数据开始传输时刻和数据传输时间长度按式(16)和式(17)计算

$$t_{i,start}^{k,j} = \begin{cases} t_{current} + RTT_i/2 + \sum_{x=1}^{i-1} G_x^k, & t_{current} + RTT_i/2 \geq t_{end}^{k-1,j} \\ t_{end}^{k-1,j} + \sum_{x=1}^{i-1} G_x^k, & t_{current} + RTT_i/2 < t_{end}^{k-1,j} \end{cases} \quad (16)$$

$$t_{i,length}^{k,j} = G_i^k \quad (17)$$

式中, $t_{current} + RTT_i/2$ 表示预期航天器用户接收到U-GRT消息的时间, $t_{end}^{k+1,j}$ 表示上一次带宽分配周期的数据传输结束时间。

1.4 星上波束分配策略

空闲时间填充机制和自适用优先级带宽分配可以完成时间域无线资源的有效利用,但同时考虑到中高轨卫星具备星上多波束处理功能,星上带宽资源分配将更为复杂。如果充分利用多波束并行数据传输的优势,可以成倍提升中高轨卫星的数据传输接入转发处理带宽,因此提出一种兼顾最小业务迁移和负载均衡的星上波束分配策略,实现数据传输业务负载在各个波束下的均匀分布,以及尽可能地避免航天器用户在各个波束之间进行业务迁移。

星上波束分配过程基于历史波束优先和最早空闲优先进行选择。在第 k 次带宽分配时,根据第 $k-1$ 次带宽分配结果,第 i 个航天器用户优先选择历史波束 j ,如果满足 $t_{i,start}^{k,j} + G_i^k \leq t_{end}^{k,j}$ 条件,则说明波束分配成功;否则说明波束 j 上的负载已经饱和,需要将航天器用户 i 迁移到其他波束上。当出现业务迁移时,比较当前分配结果中各个波束的最早空闲时间,按式(18)计算

$$t_{end_early}^k = \min\{t_{end}^{k,j}, \forall j \in (1, 2, \dots, M)\} \quad (18)$$

最后,选择最早空闲的波束分配给需要进行业务迁

移的航天器用户,如果该波束剩余带宽无法满足该航天器要求,则按式(19)进一步计算

$$\min\{G_i^k\} \geq t_{end_early}^{k,j} + G_i^k - t_{end}^{k,j}, \forall i \in (1, 2, U^j) \quad (19)$$

如果满足 $G_i^k < G_i^k$ 条件,则将第 i 个航天器用户从第 j 个波束迁移出,同时将第 i 个航天器用户分配给第 j' 个波束,按照式(18)重新计算更新后的最早空闲时间。选择最早空闲的波束分配给新迁移出的航天器用户 i' ,如果仍不能满足 $t_{i',start}^{k,j'} + G_{i'}^k \leq t_{end}^{k,j'}$ 要求,则按照式(19)继续迭代计算,迁移出带宽更小的航天器用户。如果不满足 $G_{i'}^k < G_i^k$ 条件,则选择次早空闲的波束按照式(19)迭代计算,直到所有航天器用户均获得对应的授权带宽,完成星上波束资源的分配过程。

2 仿真分析

基于如图1所示的天基测控数据传输网络拓扑结构,采用OPNET仿真软件对中高轨卫星节点、航天器用户节点进行建模。构建专用通道用于实现数据带宽资源请求和数据带宽分配授权的交互,设计航天器用户行为模型和业务模型,以及中高轨卫星的动态带宽分配模型和波束指向调度信道模型。设置中高轨卫星高度均为10 000 km,航天器用户节点高度500 km,中高轨卫星接收波束数量为2~8个,航天器用户数32个,数据传输链路带宽8 Mbit/s;TT业务产生间隔和数据量大小均服从常数分布;AT业务产生间隔服从常数分布,数据量大小服从均匀分布;NT业务产生间隔服从指数分布,数据量大小服从均匀分布;BT业务产生间隔和数据量大小均服从指数分布;带宽分配周期为1 s。仿真目标为验证天基数据传输网络中采用本文设计的多用户动态带宽分配算法时对4种不同优先级业务提供的服务保障能力。

(1) 设置中高轨卫星具有4个数据传输接收波束,通过调节航天器用户的业务负载量,仿真比较4种优先级业务通过天基数据传输接入的传输时延和数据传输成功率,如图4和图5所示。其中,数据传输时延是指数据从产生到传输给中高轨卫星接入转发的时间,主要取决于数据在传输过程等待授权带宽分配的时间;数据传输成功率是指在单次的带宽分配过程中授权带宽与需求带宽的比值,即能够及时传输的数据量占等待传输数据量的比值,表征了带宽利用率。

通过图4可以看出随着业务负载量的增加,各类业务的传输时间均逐渐增大,但是具有最高优先级的TT业务由于分配固定的授权带宽,其在负载增大后传输时延依然能够保持一个较小的数值;最低优先级的BT业务由于尽力而为地分配带宽,其传输时延随业务负载量增加而增加

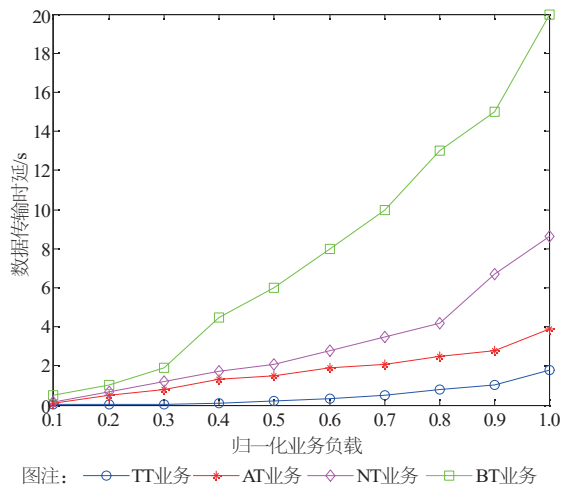


图4 不同业务数据的传输时延性能

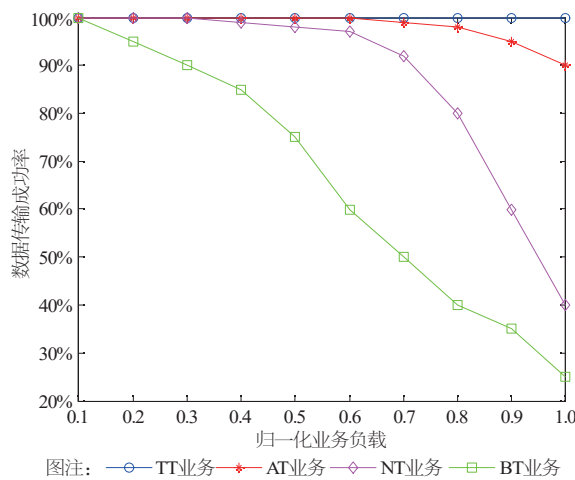


图5 不同业务数据的数据传输成功率

的最明显；次高优先级的AT业务和次低优先级的NT业务介于TT业务和BT业务之间，且AT业务由于存在比NT业务更大的保障带宽，AT业务传输时延性能优于NT业务，且随着业务负载量的增加，优势也越来越明显。

通过图5可以看出随着业务负载的增加，具有最高优先级的TT业务由于分配固定的授权带宽，其在带宽分配时授权带宽总能满足其需求值，传输成功率100%；最低优先级的BT业务由于尽力而为地分配带宽，随着业务负载量的增加，分配给BT业务的授权带宽变小，导致其传输成功率逐渐下降；次高优先级的AT业务和次低优先级的NT业务介于TT业务和BT业务之间，AT业务由于存在比NT业务更大的保障带宽，其数据传输率优于NT业务，且随着业务负载量的增加，优势越来越明显。

(2) 设置中高轨卫星具有恒定的业务负载量，通过

调节中高轨卫星具有的接收转发波束的数量，仿真比较4种优先级业务通过天基数据传输接入的传输时延和数据传输成功率，如图6和图7所示。

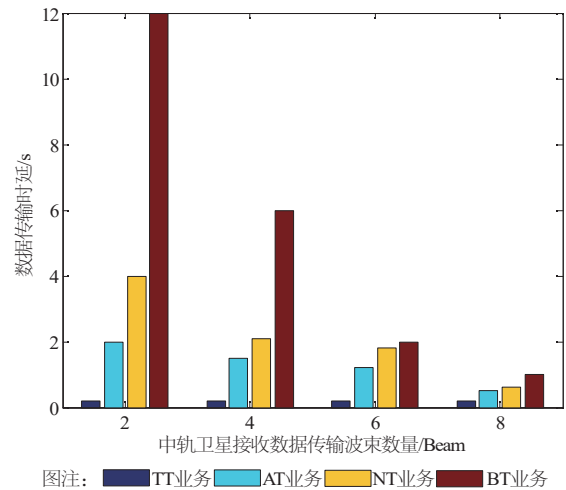


图6 不同业务数据的传输时延性能

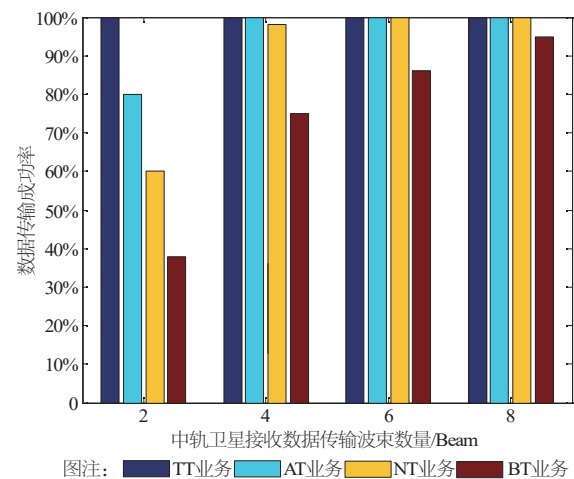


图7 不同业务数据的数据传输成功率

通过图6可以看出随着星上可分配的波束数量的增加，各类业务的传输时延均逐渐降低，但是具有最高优先级的TT业务由于分配固定的授权带宽，其在不同波束数量下几乎不被影响；最低优先级的BT业务由于尽力而为地分配带宽，其传输时延随波束数量的增加有比较明显的降低；次高优先级的AT业务和次低优先级的NT业务介于TT业务和BT业务之间，且AT业务由于存在比NT业务更大的保障带宽，其传输时延性能优于NT业务，且随着接收波束数量的增加，两者之间的差距逐渐缩小。

通过图7可以看出随着星上可分配的波束数量的增加，具有最高优先级的TT业务由于分配固定的授权带宽，其在带宽分配时授权带宽总能满足其需求值，传输

成功率100%；最低优先级的BT业务由于尽力而为地分配带宽，随着中高轨卫星波束数量的增加，可分配给BT业务的授权带宽变大，因此其传输成功率逐渐提高；次高优先级的AT业务和次低优先级的NT业务介于TT业务和BT业务之间，且AT业务由于存在比NT业务更大的保障带宽，其数据传输成功率优于NT业务，且随着接收波束数量的增加，两者之间的差距逐渐缩小。

综上所述，本文仿真验证了不同业务负载和不同波束数量下，多用户动态带宽分配算法对高优先级业务始终具有良好的服务保障能力，同时又尽力而为地最大化保障了低优先级业务的传输带宽。

参考文献：

- [1] 于佳, 宗鹏. 多终端在星上多频时分多址系统中的分配[J]. 中国空间科学技术, 2013, 33(1): 75-83.
YU J, ZONG P. Novel resource allocation scheme based on multi-satellite terminals in MF-TDMA satellite systems[J]. Chinese Space Science and Technology, 2013, 33(1): 75-83.
- [2] WANG X Y, LI Y J, ZHAO S H, et al. A tradeoff resource allocation based on MF-TDMA scheme in the multibeam data relay satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(3): 200-212.
- [3] 王星宇, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于QoE感知的中继卫星带宽资源分配方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(19): 147-152.
WANG X Y, LI Y J, ZHAO S H, et al. Research on QoE-aware bandwidth allocation method for data relay systems[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(19): 147-152.
- [4] 刘治国, 史二鑫, 马悦. 基于动态令牌桶的卫星网络带宽分配方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(2): 93-97, 103.
LIU Z G, SHI E X, MA Y. Bandwidth allocation method in satellite network based on dynamic token bucket[J]. Computer Engineering, 2016, 42(2): 93-97, 103.
- [5] JI Z, WANG Y Z, FENG W, et al. Delay-aware power and bandwidth allocation for multiuser satellite downlinks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 1951-1954.
- [6] 潘甦, 曹跑跑, 刘胜美. 一种多无线电系统中基于公平性和精细化带宽分配的资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 399-404.
PAN S, CAO P P, LIU S M. A resource allocation algorithm based on proportional fairness and refined bandwidth allocation for multi-radio systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2): 399-404.
- [7] 邱琳, 陈舒怡, 孟维晓. 低轨卫星物联网随机码分多址技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 549-556.
- [8] QIU L, CHEN S Y, MENG W X. Random code channel access technology for low-orbit satellite IoT[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 549-556.
- [9] 朱骏, 廖晓谈, 张秀梅. 关于低轨卫星物联网多址接入应用研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(3): 14-15.
ZHU J, LIAO X T, ZHANG X M. Research on the application of low-orbit satellite IoT multiple access[J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(3): 14-15.
- [10] 刘瑞, 郭克锋, 郭蕴欣, 等. 基于非正交多址接入的认知星地融合中继网络性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S1): 83-89.
LIU R, GUO K F, GUO Y X, et al. Performance of NOMA-based integrated satellite-terrestrial relay networks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S1): 83-89.
- [11] 刘晔, 马纯清, 殷明哲, 等. 基于民航业务需求的VSAT网络多址接入技术分析[J]. 信息与电脑(理论版), 2019(4): 184-185.
LIU Y, MA C Q, YIN M Z, et al. Analysis of VSAT network multiple access technology based on civil aviation business requirements[J]. China Computer & Communication, 2019(4): 184-185.
- [12] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [13] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [14] MORELL A, SECO-GRANADOS G, VÁZQUEZ-CASTRO M Á. Cross-layer design of dynamic bandwidth allocation in DVB-RCS[J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(1): 62-73.
- [15] ANASTASOPOULOS M P, TALEB T, COTTIS P G, et al. Feedback suppression in multicast satellite networks using game theory[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(4): 657-666.
- [16] LIU Y, LE L I, LIU H B, et al. Adaptive bandwidth allocation strategy for satellite communication[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). [S.l.:s.n.], 2019.
- [17] JIA M, ZHANG X M, GU X M, et al. Interbeam interference constrained resource allocation for shared spectrum multibeam satellite communication systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6052-6059.

- [17] WANG L, ZHANG C, QU D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]// Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 925-929.
- [18] 胡圆圆, 宋高俊. Ka频段下多波束卫星通信的资源分配[J]. 通信技术, 2013, 46(10): 22-25.
- HU Y Y, SONG G J. Resource Allocation of ka band multi-beam satellite communication[J]. Communications Technology, 2013, 46(10): 22-25.
- [19] JUNG D H, SHIN M S, RYU J G. Fairness-based superframe design and resource allocation for dynamic rate adaptation in DVB-RCS2 satellite systems[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11): 2046-2049.
- [20] DENG B Y, JIANG C X, KUANG L L, et al. Resource allocation of multibeam communication satellite systems in sparse networks[J]. ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2019: 1-6.
- [21] WANG H, LIU A J, PAN X F, et al. Optimization of power allocation for multiusers in multi-spot-beam satellite communication systems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014: 1-10.

[作者简介]



楚建祥（1990-），男，硕士，工程师，主要研究为星上处理与交换、星间网络路由协议等。



黄印（1987-），男，硕士，副主任，高级工程师，主要研究方向为天基宽带通信、卫星波束指向与跟踪等。



王崇（1981-），男，博士，副部长，研究员，主要研究方向为卫星互联网、低轨卫星互联网等。



曹云泽（1995-），男，硕士，助理工程师，主要研究方向为星上处理与星间路由、在轨软件重构等。