

多层卫星网络动态接入技术

李昀翰¹, 马建鹏¹, 何熊文^{2,3}, 张 顺¹, 李红艳¹

(1.西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710100;

2.清华大学, 北京 100084;

3.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要: 利用不同轨道卫星的特点组建更高效的多层卫星网络, 近年来成为卫星网络研究的热点。传统卫星网络接入方法已经难以满足多层卫星网络低时延、灵活随遇接入的需求, 设计高效的多层卫星网络随机动态接入协议迫在眉睫。首先对传统卫星网络接入技术进行总结, 梳理卫星网络随机接入协议的发展脉络; 然后针对地面站接入卫星以及多层卫星网络星间接入两种不同场景分别提出不同的低时延接入方法, 为未来多层卫星网络动态接入技术的发展提供参考。

关键词: 多层卫星网络; 低时延; 动态接入

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022005

Multilayer Satellite Network Dynamic Access Technology

LI Yunhan¹, MA Jianpeng¹, HE Xiongwen^{2,3}, ZHANG Shun¹, LI Hongyan¹

1.State Key Laboratory of Integrated Services Networks,Xidian University, Xi'an 710100, China

2.Tsinghua University, Beijing 100084, China

3.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Abstract: Using the characteristics of satellites in different orbits to build a more efficient multilayer satellite network has become a hotspot in satellite network research in recent years. Traditional satellite network access methods have been unable to meet the needs of multilayer satellite networks with low latency and flexible access, so it is urgent to design an efficient random dynamic access protocol for multilayer satellite networks. This paper first summarized the traditional satellite network access technology, clarified the development context of the satellite network random access protocol, and then proposed different low latency for the two different scenarios of ground station access to satellite and multilayer satellite network intersatellite access. The access method could provided a reference for the development of the dynamic access technology of the multilayer satellite network in the future.

Keywords: multilayer satellite network, low latency, dynamic access

0 引言

通信网络技术的不断发展一直深刻地影响着人们的生活。第五代移动通信技术已经逐渐成熟, 对第六代移动通信技术的研究已经提上日程。然而, 地面通信网络的覆盖范围十分有限, 通常只能服务经济发达、人口密度较大且基础设施相对完善的地区。对于人口较为稀少的偏远地区, 如深山、远洋、丛林等, 地面通信网

络很难为有需要的人员提供网络服务。卫星通信网络作为地面通信网络的补充和扩展, 具有覆盖范围广、灵活性高、抗干扰能力强等优点, 可以很好地补充地面通信网络在偏远地区的缺失^[1]。

卫星通信网络在多个领域均有重大价值, 国内外研究人员均对卫星通信网络的研究十分重视。美国SpaceX公司启动的卫星通信项目StarLink计划部署上万颗卫星组

收稿日期: 2022-01-06; **修回日期:** 2022-03-09

通信作者: 马建鹏, jpm@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61931017, No.61871455, No.61901329); 中国博士后创新人才支持计划 (No.BX20190265)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61931017, No.61871455, No.61901329), The China Postdoctoral Innovation Talent Support Program (No.BX20190265)

成“星链”网络,为地面用户提供网络服务^[2]。成立于2012年的英国卫星通信公司OneWeb计划通过发射超过600颗低轨卫星建成覆盖全球的高效通信网络,以便在发生自然灾害等时仍能为用户提供稳定的网络服务^[3]。我国于2021年在雄安成立了中国卫星网络集团有限公司,标志着我国将在未来全球卫星互联网的竞争中扮演重要角色。

卫星通信发展的初期,卫星网络通常是结构较为简单的单层网络。随着技术的不断发展,卫星网络进入以业务多样化、骨干传输可靠化、覆盖全球化为特征的时代,对卫星网络的研究开始向多层网络的方向发展^[4]。多层卫星网络即由低地球轨道(LEO)、中地球轨道(MEO)和地球静止轨道(GEO)等不同高度轨道卫星共同构建一个卫星网络。其中,位于高层飞行轨道的卫星称为高轨卫星,一般作为路由算法决策的中枢;位于低层飞行轨道的卫星称为低轨卫星,一般负责保障地面站点对卫星网络的接入;介于高层飞行轨道和低层飞行轨道之间的卫星称为中轨卫星,对地球表面完成全面覆盖^[4]。另外,还有一些同样运行在卫星轨道上的侦察卫星、气象卫星等需要接入卫星通信网络进行工作。多层卫星网络将不同功能的卫星划分为不同的层级相互配合工作,整个网络具有更加复杂多样的拓扑和功能,与传统单层卫星网络相比具有更高的稳定性、更大的吞吐量,可以更好地保证卫星系统为全球提供高质量的通信服务。

远距离广覆盖的多层卫星通信网络因其具有差异化的任务、泛在接入需求以及动态多样拓扑结构,需满足用户随时接入与退出,保障低时延的接入调度^[5]。在传统的随机接入技术基础上,为了突破其由过高的传输时延导致的接入效率低下问题^[6],需要提出一种适用对象更明确的,时延在一定限度内可以被保障的多层卫星随机接入机制。

为了同时保障未接入用户的灵活随遇接入需求和已接入用户的低时延传输要求,本文首先设计基于动态随机接入和固定轮询结合的低时延混合接入协议框架。为了保证窄波束微波、激光高速数据信道高效利用,对于通过宽波束已接入的用户,采用固定轮询的传输方式。然后基于多层卫星网络链路的特点,在低时延混合接入协议框架下,针对地面用户接入多层卫星设计符合其链路特征的接入协议。

1 卫星网络接入技术发展现状

1.1 卫星网络接入技术分类

卫星网络接入控制协议一般按照无线信道分配方式进行划分,可分成两种模式:固定分配型及动态分配

型。其中固定分配型MAC协议又可以分为时分多址接入(TDMA)^[7]、频分多址接入(FDMA)^[8]和码分多址接入(CDMA)^[9]等。动态分配型协议由竞争型接入、预约型接入和轮询型接入构成。

在固定多址协议中,TDMA模式为每个用户站点分配完整的频率带宽,分配给各个站点不同的时间来使用无线带宽;每个用户在分配好的时隙发送自己需要传输的数据。这种方式对整个系统时间同步的要求较高。FDMA模式将整个带宽切分成数个子带,给各个用户分配不同的子带,令其能同时利用不同的频段发送信息。CDMA模式不需要在时间域和频率域进行不同划分,给各个用户使用相同的信道并分配不同的伪随机码序列,在接收端再用相互正交的码字解出属于自己的信息。

现有的国内外卫星网络大多采用固定分配类的多址接入协议。例如美国的全球星系统使用的是CDMA多址接入方式^[10]。美国铱星网络移动通信系统则采用TDMA与FDMA混合多址接入方式^[11]。我国的北斗导航卫星以及美国全球卫星导航定位系统(GPS)都采用CDMA的多址接入方式^[12]。这几种接入方式均为固定多址接入。

1.2 卫星网络随机接入技术发展

随着通信系统中接入技术的发展,随机接入技术被视作一种有效的接入方案。卫星网络中的随机多址接入技术主要基于最早提出的ALOHA接入协议^[13]。ALOHA接入协议的主要思想是所有节点都要向接收方发送一个数据包,如果发生冲突,接收方可以通过检查解码包的CRC字段来检测,所有涉及的冲突用户都会被认为丢失。此时,根据是否启用重新传输有两种不同的处理方式。若没有重新传输,数据包被声明丢失,节点用户不会采取进一步的行动;若重新传输,则接收方将发生冲突的通知反馈给相关用户,其等待随机时间后,再重新传输冲突数据包。为降低数据产生冲突的可能性,在ALOHA的基础上添加同步的概念,即时隙ALOHA(Slotted ALOHA, SA)。SA用时钟来统一用户的数据发送。它将时间分为离散的时隙,用户每次必须等到下一个时隙才能开始发送数据,从而避免用户发送数据的随意性^[13]。相对于ALOHA,SA将碰撞脆弱期由两个包的持续时间降低到一个包的持续时间,即只有在同一时隙中开始的数据包才会导致冲突。

虽然SA降低数据冲突的概率,但冲突的数据包需要被重新传输,这就加大了在卫星间数据包传输的时延代价。DSA(Diversity Slotted ALOHA)通过在时隙ALOHA的基础上将每个分组都复制若干份,并将这个复制分组和原分组一起发送出去,只要存在至少一个分组

被成功接收,该分组即被认为发送成功。这极大提高了数据包成功传输的概率^[14]。与SA相比,DSA可以在系统负载较低时获得较大的增益,但当系统负载较高时,其性能远低于SA。针对这一特点人们进一步提出了CRDSA (Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA)^[15]。在DSA的基础上,CRDSA在接收端结合干扰消除技术,进一步提升系统的吞吐量。CRDSA系统中的分组固定只复制一份,原始分组与复制的分组互称为“双胞胎分组”。双胞胎分组在一帧中分别随机选择不同的时隙发送,之间保存着指向彼此所在时隙的指针。由于每个分组都有校验字段,因此接收端在收到一帧中的所有分组后,能够找到那些可以成功恢复的分组,并找到它们的双胞胎分组所在的时隙,重构双胞胎分组,消除双胞胎分组在这些时隙上的影响;然后重新检测是否有新的分组可以被恢复,循环往复,直至没有双胞胎分组需要消除,也没有分组可以被恢复。根据分组复制的数目不同,分别有CRDSA++与IRSA (Irregular Repetition Slotted ALOHA),CRDSA++中分组复制次数不限,可以为两次、三次等,IRSA允许每个用户随机选择自己的复制次数,这些改变允许分组个数适应不同的系统负载以及时隙数^[16-17]。后续的MF-CRDSA (Multi-Frequency CRDSA)接入技术在CRDSA的基础上设定每个终端只在TDMA帧持续时间的小部分时间内进行传输。MF-CRDSA解决了在卫星通信中TDMA需要比FDMA/CDMA高很多倍的峰值功率传输这一问题,降低对终端峰值功率的需求。

CSA (Coded Slotted ALOHA)是在IRSA的基础上被提出来的^[18],是IRSA的一般化与扩展。不同于IRSA,CSA接入方案不再是直接把用户产生的数据包复制多份然后在一帧中不同的时隙发送,而是在数据包发送前先将原始数据包切分为 k 个小片段,并采用 (n,k) 线性分组码对其进行编码,然后将编码后的数据包在一帧中的 n 个时隙发送出去。在接收端,采用干扰相消技术,以及线性分组码的最大后验概率译码来实现对数据包的恢复。CSA在系统吞吐量方面实现巨大提升。多用户共享接入(MUSA)技术是在同一资源块中根据不同用户使用的不同码序列进行检测,从而区分用户发送信息,属于码域非正交技术,并且一般都在下行链路使用此多址技术^[19]。用户在进行发射前,需要随机对每个用户分配一个码序列并进行相应扩频,将多个用户扩频后的数据进行叠加,选择以时频资源划分的某个资源单元进行发送,这样显著提高资源的复用能力。信号在发送过程中会受到信道和噪声的影响,在接收端可根据信道信息及相应用户的码序列,将同一资源单元的用户信息用串行干扰消除检测出

来。同属于码域非正交多址技术的还有稀疏码多址接入技术(SCMA)^[20],该技术将数据扩到多个资源块上。一般SCMA码序列具有稀疏性,即通过扩频后部分资源块上的信息为零。MUSA需要产生低互相关性复数域星座式短序列多元码,而SCMA需要设计码本,用户在随机接入过程中随机选择码本,根据用户分配的码本将发送数据映射为码字即进行扩频操作,然后经过稀疏扩频的信息叠加在一起在同一资源单元传输。该码本的稀疏码字体现用户扩频的时候并没有把信息扩到所有的资源块上,只是扩到部分资源块上。这样可以使接收端进行多用户检测时复杂度降低,并且相较于MUSA,用户间的干扰相应减少。

SSA (Spread Spectrum ALOHA)是在SA随机多址技术的基础上,与DS/SS-CDMA结合的扩频时隙ALOHA技术。直接序列扩频(DS-SS)多址是CDMA最常见的形式,每个用户被分配一个特定的编码序列,该编码序列在载波上调制,并在其上调制数据^[21]。用户可以异步传输,即使使用相同的传播编码序列,也可以接收数据。当采用强大的物理层前向纠错和低阶调制时,SSA协议在相同的丢包率目标和等功率接入条件下提供了比时隙ALOHA高得多的吞吐量能力。与时隙ALOHA不同的是,随着MAC负载的增加,SSA的丢包率呈陡增趋势。因此,SSA可以在接近吞吐量特性峰值的负载下运行。E-SSA (Enhanced Spread Spectrum ALOHA)的创新之处在于利用迭代SIC方法设计的数据包检测器,由于采用更合适的网关数字信号处理,与传统SSA相比,E-SSA在稳健性和绝对吞吐量方面显著增强^[22]。ME-SSA (Minimum Mean Square Error plus E-SSA)可在包功率不平衡程度较低时进一步提高频谱效率^[23]。其主要改变是在扩展之前,使用QPSK调制而不是E-SSA中使用的BPSK,且在SIC之前在网关解调器中引入一个多级近似的最小均方误差(MMSE)滤波器。

以上均为基于同步的随机接入技术,而在最近几年,随机多址接入方法的大部分研究都集中在时隙场景。CRDSA的概念中首先加入异步的场景,即争用解决方案ALOHA (Contention Resolution ALOHA, CRA)^[24]。在CRA接入技术中移除时隙,但帧格式被保留,允许用户在帧内传输它们的副本,除了避免自干扰之外没有任何限制。类似于时隙CRDSA,其在接收端使用串联干扰消除来提高性能。所有数据包都需在时隙边界内到达,而所有相互复制的数据包到达时都在同一个CRDSA帧内。相比于CRDSA,CRA降低数据包发送端的复杂度。ECRA是CRA的扩展。ECRA中接收端接收所有未受干扰的数据包后为相关的用户创建一个新的组合包^[25]。如果所有副本中

用户包均受到一定程度干扰,则利用干扰级别最低的副本符号创建组合包,这进一步提升接入性能。

ACRDA去掉CRA中仍然存在的帧结构,彻底变为异步场景^[26]。在时隙RA中,对于给定的接收端,时隙和帧的边界是根据给定接收端的时间线来定义的。采用时隙同步机制来控制每个用户节点定时,使突发数据包在预期边界内到达接收端。在ACRDA中,时隙和帧边界不是在接收端的时间线上全局定义的,而是本地定义的,并且在用户之间是完全异步的,其解码器使用一个基于窗口的过程来执行SIC。与CRA相比,ACRDA提供更好的吞吐量性能,降低解调器复杂性和传输时延,允许对共享介质的真正异步访问。

一些学者提出一种基于预约的随机接入技术R-ALOHA (Reservation ALOHA)^[27]。在R-ALOHA中,当一个信息发送端想要发送一段长报文信息时,其首先会对通信网络中的信道资源进行预约申请;信道资源管理中心收到请求后,会分配给该信息发送端一段连续的信道资源(连续多个帧内固定位置的多个信道时隙),使其可以一次性发送一段连续的数据分组。R-ALOHA解决SA中传送长报文信息时,需要将一段信息打散分割成在每个时隙内传送的数据分组,且每一个数据分组在传送的过程中由于碰撞重发、随机时延等情况造成传送时延过大的问题。

综上所述,卫星动态多址接入协议的发展历程如图1所示。基于最原始的ALOHA技术而提出的时隙ALOHA技术减少不同用户间碰撞脆弱期,从而降低接入碰撞的概率,但其在冲突后的重新传输,在卫星通信场景下仍会造成较大的接入时延。DSA通过将每个分组复制多份

到每个时隙降低重新传输的概率,但却难以应对系统负载较高的情况。在其基础上提出的CRDSA,在接收端引入干扰消除技术,限制每个分组复制次数,进一步提升吞吐量。CRDSA++让负载与分组的复制次数相适应,可以更加高效地利用无线资源。之后被提出的CSA技术把简单的复制分组改为通过不同码本编码解码的方式,使得系统吞吐量又获得巨大提升。CRA以及ACRDA则是在CRDSA的基础上引入异步场景。SSA是在SA基础上结合直接序列扩频技术。R-ALOHA使用基于预约的随机多址技术解决SA发送长报文需打散发送的问题。

以往对于卫星接入方法的研究主要基于单层卫星网络场景,对多层卫星网络的接入策略研究较少。在多层卫星网络系统中,除了地面站对低轨卫星的接入,还需考虑不同高度轨道卫星之间的接入方法^[28]。由于处于不同高度轨道的卫星运行速度不同,整个多层卫星网络的拓扑处在不断的变化中,需要卫星之间能够实现灵活的动态接入才能最大程度地实现多层网络的功能。因此在未来对多层卫星网络的动态接入方法的研究是很有必要的。

2 多层卫星网络动态接入

卫星通信系统主要包括两类节点:多层卫星网络以及地面节点,其拓扑关系如图2所示。多层卫星网络在不同高度轨道中部署卫星组网,与传统单层卫星相比具有更复杂的拓扑结构、更强的抗干扰能力以及更多样化的功能。多层卫星网络一般包括高轨卫星、中轨卫星、低轨卫星。一般由中高轨卫星负责数据包的交换和转发,低轨卫星负责不同用户业务的接入^[29]。其中,用户可能

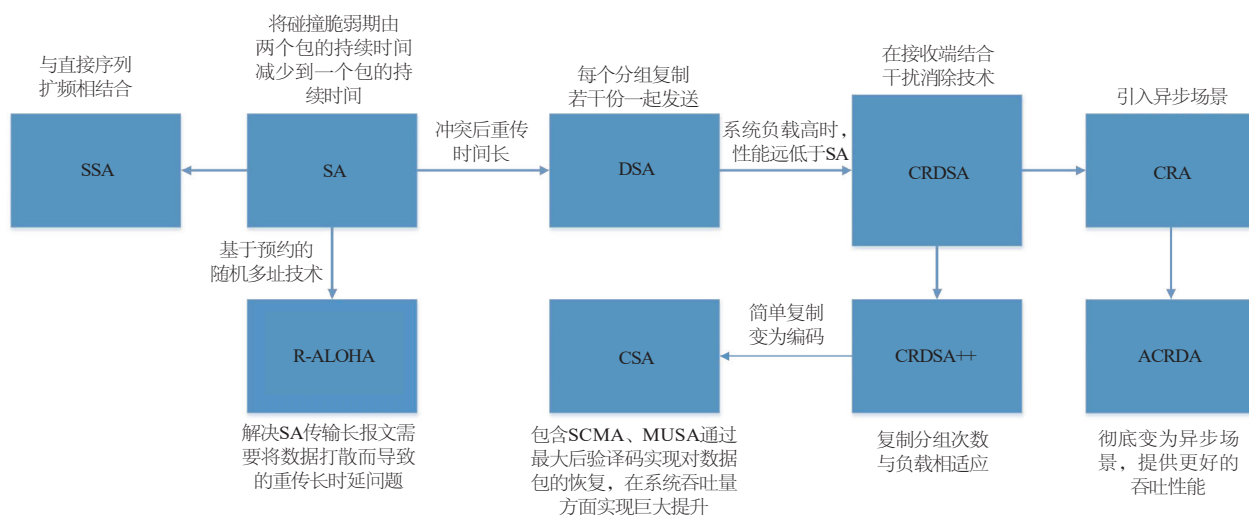


图1 卫星动态多址接入协议的发展历程

包括地面用户站和空中业务卫星。传统的单层卫星网络动态接入一般只需考虑地面用户接入卫星，而多层卫星网络动态接入需要同时考虑卫星间的接入。针对单层卫星网络与两种不同的多址接入场景需设计不同的接入方法。

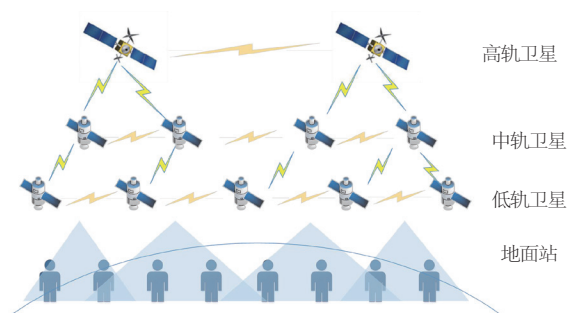


图2 网络拓扑关系

2.1 地面站与卫星网络接入协议设计

为了同时保障未接入用户的灵活随遇接入需求和已接入用户的低时延传输要求，本文设计了基于动态随机接入和固定轮询的接入协议框架。协议将整个传输过程划分为随机接入时段和上下行轮询传输时段。在随机接入时段中，用户间采用传统的冲突避免方式通过宽波束竞争传输预约信息，而后成功预约资源的用户将于上行传输区中分配的相应微波、激光链路资源处进行数据传输，该预约传输的方式在长时延的卫星通信场景中有效地保障长业务类型的数据传输。

如图3所示，卫星在随机接入时段的开始发出下行广播Beacon帧，用户接收到该指示信息后随即在随机接入区中以传统的竞争方式进行预约资源传输。当随机接入时段过程结束后，卫星进行下行广播将预约状态发送到用户端，成功预约资源的用户将于上行传输区中固定的资源处进行数据传输，接收端将对所有上行传输数据做统一应答。以类似的方式进行下行传输调度，由卫星为每个用户分配下行传输的无线资源。随后卫星在分配好的信道资源处进行下行数据传输。用户成功接收数据后对卫星进行应答。卫星收到应答，确认下行数据已被正

常接收，标志着一个传输周期的结束。

在卫星地面站通信的过程中，地面终端设备通常分布在不同的区域，而卫星相对于地面所处位置较高，所以可在同一时刻对下方多个地面站进行覆盖，如图4所示。部分地面站需要传输对时延以及可靠性要求较高的业务，要设计低时延高可靠的MAC协议。

地面站接入卫星的过程中，地面站向卫星发送请求帧，在收到卫星的回复帧后，开始数据传输的流程。如果在发送请求帧后的固定时间内地面站未收到卫星发送的回复帧，则认定本次接入失败，需等到下一次随机接入时段重新发送接入请求。卫星通信系统数据传输时延较长，频繁的信息交互将导致过长的接入时延，来自不同用户的数据包碰撞后导致的接入失败会造成较大的时延。

为了适应卫星通信场景下的高接入时延，本文设计了一种基于非正交的增强型混合接入协议，该接入协议中不同用户的接入请求数据可随机选择时隙和频段发送，即使不同用户的数据包在同一频段发生重叠也可以通过稀疏码字在接收端解出，实现同时接入。如图5所示，在传统ALOHA协议下，用户1和用户4将发生冲突，用户6将与用户7发生冲突，最终成功接入的只有用户2、用户3和用户5。而在非正交的接入协议下，如图6所示，即使用户1和用户4、用户6和用户7在各自频段发生冲突，它们仍能同时接入卫星网络。

为了实现在接入阶段尽可能满足更多的用户接入近地卫星网络，本文选择基于稀疏码多址接入技术（SCMA）。SCMA的基本思想是通过稀疏码本扩频方式将准备发送的比特流映射为多维码字非正交叠加发送，通过频域复用实现更多同频段用户的同时接入。由于码字具有稀疏特性，近地卫星网络能够以较高的性能解码消除复用频域资源用户间的干扰，利用有限的无线资源完成更多地面站用户的接入，进而提高系统吞吐量^[30]。

在本文所提出的协议中，将频率域和时间域分为若干时隙。在随机接入阶段，将每个请求包复制若干份并随机选择时隙资源进行发送。如图7所示，由于每个包采

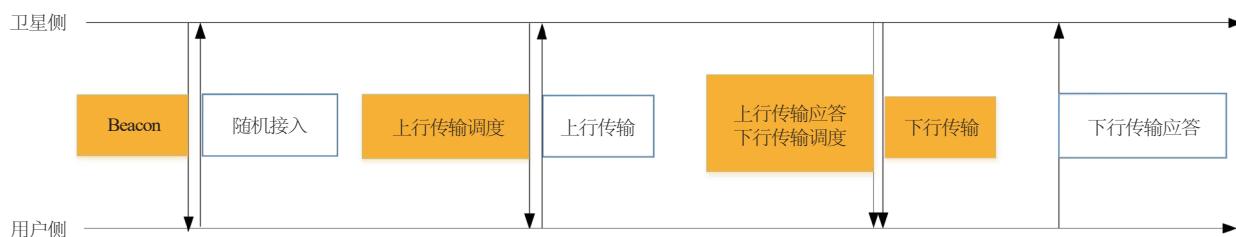


图3 卫星数据通信流程示意

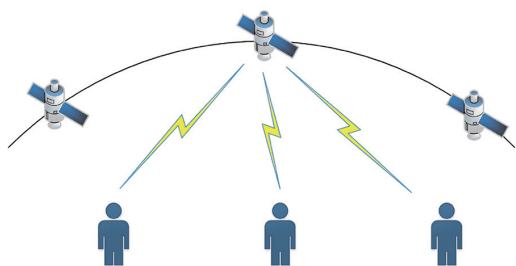


图4 卫星覆盖地面站的接入场景

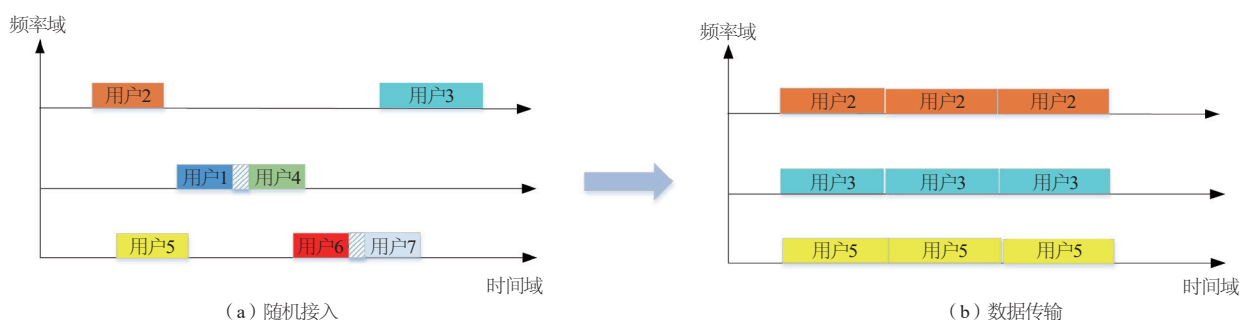


图5 基于传统ALOHA协议的接入与传输

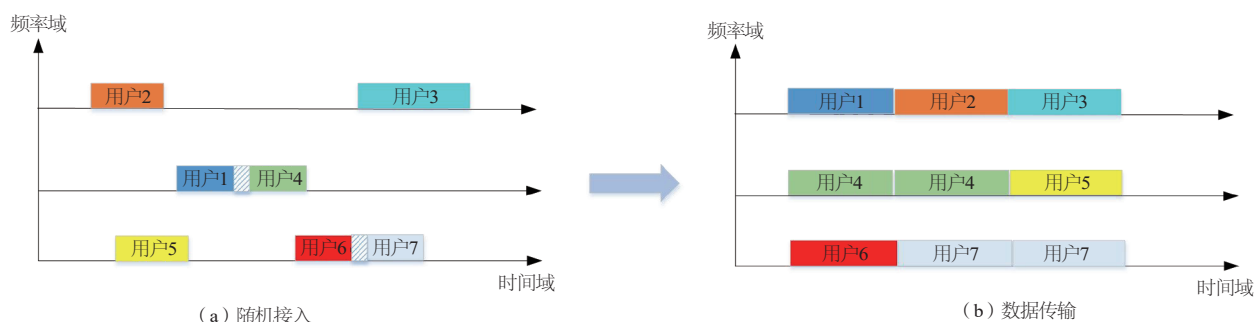


图6 基于非正交协议的接入与传输

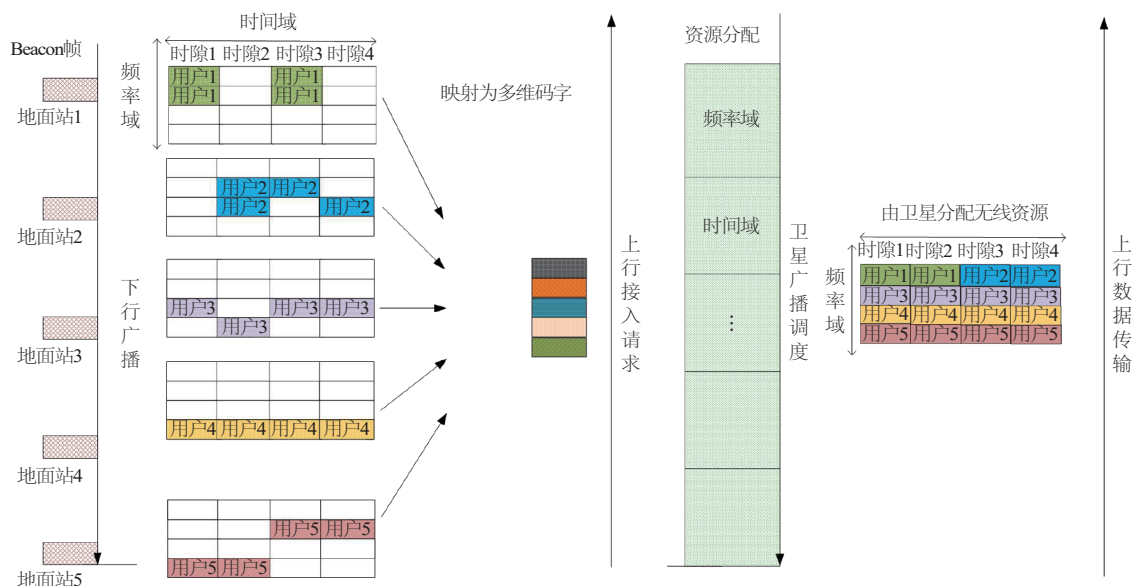


图7 基于稀疏码分多址接入的增强型接入协议示意

用随机选择时隙的方式进行发送，因此会出现两个甚至两个以上的包选择同一时隙的情况。发送端通过稀疏码码字映射的方式，以过载的方式复用频谱资源，尽可能实现更多站点同时接入卫星网络。

地面站与卫星接入流程如图8所示，卫星下行广播 Beacon 帧，触发地面站上报数据请求，地面站随机竞争时隙和频率资源上行请求资源。卫星根据收到的接入请

求分配码字与时频资源给各个接入成功的地面站，将相关信息发送上行数据调度帧到各个地面站并开启数据传输。数据传输完成后卫星下发ACK回应到各个地面站并开启下行传输过程。卫星在下行传输周期再将下行传输相关内容如接收端站点、分配码字时隙等信息一并下发到各个接收节点，完成接入后开启数据传输，结束后由地面站发送响应帧到卫星。具体步骤如下。

(1) 卫星下行广播Beacon帧，携带卫星ID、码字相关信息。

(2) 地面站感知到触发帧，若需请求资源，采用基于稀疏码分多址接入的增强型接入技术，随机选择时间、频率域资源及所用码字，发送竞争请求。接收端将会采用基于置信度传播的消息传递等方法将叠加的数据解码出来，并下行广播对各用户的资源分配。

(3) 地面站在被分配的资源中传输信息。

(4) 卫星广播ACK对地面站数据帧进行回应，地面站查询有无关于自己的回应，若有，则传输成功，若无，则下一时刻再次申请；同时卫星进行下行数据传输的调度，地面站同时查询在下一个下行传输周期有无自己需要接收的数据。

(5) 卫星在分配的时间和频率域资源下行传输数据信息，同时指示站点发送ACK回应的频率时隙。

(6) 地面站根据指示对卫星下行数据进行回应。

(7) 地面站可根据历史信息优先抢占合适的资源，以提高成功率。

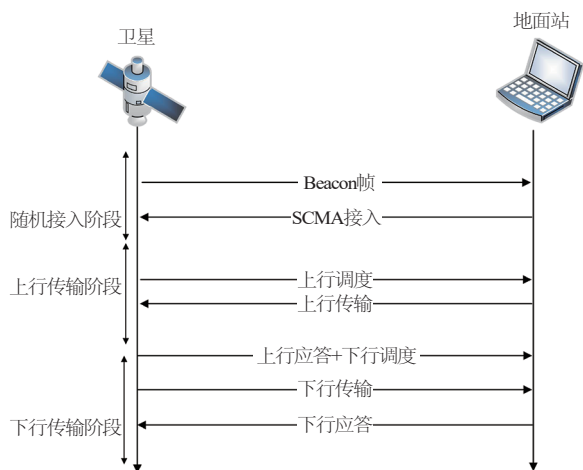


图8 地面站与卫星接入流程

2.2 多层网络内卫星间接入协议

在多层卫星网络的场景下，对卫星间动态接入协议的研究是很有必要的。星间接入包括通信星与用户星以及通信星与通信星之间的接入。在进行星间数据传输时，多层卫星网络一般会采用宽波束完成星间的接入，采用窄波束、激光等定性高速链路完成通信。由于多层卫星网络的结构组成和功能较为复杂多样且不同高度轨道的卫星运行速度不同，卫星拓扑可能会随时间的推移或任务的进行不断变化。而卫星网络需要随着卫星拓扑的变化随时建立新的星间链路保障卫星之间的通信，这对卫星动态接入其他卫星的能力有很高要求。不仅如此，除通信卫星以外，多层卫星网络中还有许多其他种类的业务卫星需要接入通信卫星进行工作，例如遥感卫星、气象卫星等。当有新的任务需要完成时，它们需要根据业务的要求动态接入通信卫星，完成遥感、气象数据的传输等工作。为了满足以上两点需要，需要在多层卫星网络的场景下设计低时延保障的高效星间动态接入协议。

与传统地面网络不同，卫星节点在相互建立链接之前可获知较为准确的网络拓扑构型。这意味着依据先验知识可定位多层卫星网络中任意两个卫星节点的相对位置。卫星节点的这一特性可用于指导微波/激光等星间高效链路的建立，更快速地完成多层卫星网络星间接入过程。

如图9所示，首先各个卫星可以通过本地已知的网络拓扑预测目标卫星大致位置并通过宽波束指向目标卫星，用宽波束进行星间接入的信令交互，完成星间的接入过程，然后建立窄波束/激光通信链路进行星间数据通信。

2.3 免授权接入方法

近些年工业界提出的非正交多址接入的变体主要基于调度和授权的场景，这种方法的缺点是信令的开销过大。在卫星通信的场景下节点之间的链路较长，传统随机接入的授权过程会严重降低站点接入的效率。

多层卫星网络的随机接入阶段可采用基于免授权思想的接入方法来最大程度减少卫星通信接入过程中由于信令交互产生的时延，提高卫星与地面站信息交互的效率。基于免授权的多址接入，即站点上行传输数据时不再需要卫星的授权过程，在用户收到卫星发送的带有上行无线资源设置的相关信息的Beacon帧后，可直接与卫

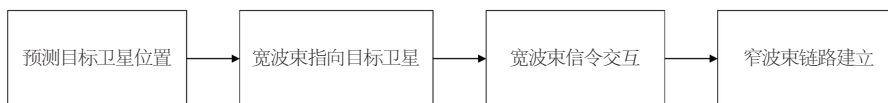


图9 卫星网络星间接入流程

星网络进行信息交互。

免授权的上行无线资源分配通常有两种方式,第一种是由卫星预先配置,第二种是各个用户自身随机选择^[31]。如果多个用户同时选择相同的时隙和频段发送数据到卫星,仍然有可能发生冲突,且在免授权的情况下,不同用户发生冲突的概率将大大提高。在这种情况下,为了避免冲突通常会选择非正交的方式令不同的用户复用同一个时频资源来避免无授权情况下可能产生的冲突。例如SCMA利用稀疏码字使得不同用户可以在一定程度上复用时频资源,降低冲突的概率。

综上,可采用免授权的方法省去卫星和用户之间建立链接的各种授权过程,改用Beacon帧下发卫星关于无线资源设置的相关信息,用户直接上行发送数据到卫星,并采用非正交的模式避免冲突。这样可以大大降低接入过程中授权信令造成的时延并尽可能减少潜在的冲突。

参考文献:

- [1] DE SANCTIS M, CIANCA E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1): 113-123.
- [2] 周韬. 国外低轨卫星星座发展分析[J]. 科学与信息化, 2020(2): 198.
ZHOU T. Analysis on the development of foreign low-orbit satellite constellations[J]. Technology and Informatization, 2020(2): 198.
- [3] 李喆, 孙冀伟, 尚炜, 等. 国外主要低轨互联网卫星星座进展及启示[J]. 中国航天, 2020(7): 48-51.
LI Z, SUN J W, SHANG W, et al. The progresses and inspirations of international major satellite Internet service LEO constellations[J]. Aerospace China, 2020(7): 48-51.
- [4] 吴永辉, 马冲, 潘巍, 等. 多层卫星网络研究概述[J]. 数字通信世界, 2009(6): 40-42.
WU Y H, MA C, PAN W, et al. Overview of multilayer satellite network research[J]. Digital Communication World, 2009(6): 40-42.
- [5] 王星宇, 李勇军, 赵尚弘. 空间信息网络多址接入技术研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(21): 8-16.
WANG X Y, LI Y J, ZHAO S H. Research on multiple access technologies for space information network[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(21): 8-16.
- [6] 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.
- [7] KATO S, MORIKURA M, KUBOTA S, et al. A TDMA satellite communication system for ISDN services-offset QPSK burst modem coupled with high coding gain FEC[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '91: Countdown to the New Millennium. Piscataway: IEEE Press, 1991: 1533-1540.
- [8] MYUNG H G, LIM J, GOODMAN D J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(3): 30-38.
- [9] ILCEV S D. Space division multiple access (SDMA) applicable for mobile satellite communications[C]//Proceedings of 2011 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS). Piscataway: IEEE Press, 2011: 693-696.
- [10] DIETRICH F J, METZEN P, MONTE P. The Globalstar cellular satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 935-942.
- [11] LEOPOLD R J. Low-earth orbit global cellular communications network[C]//Proceedings of ICC 91 International Conference on Communications Conference Record. Piscataway: IEEE Press, 1991: 1108-1111.
- [12] 冯素园. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国新通信, 2016, 18(12): 104.
FENG S Y. Preliminary evaluation of basic navigation and positioning performance of Beidou regional satellite navigation system [J]. China New Telecommunications, 2016, 18(12): 104.
- [13] 李建东, 盛敏, 李红艳. 通信网络基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
LI J D, SHENG M, LI H Y. Communication network fundamentals[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [14] 张海潮. 高负载卫星网络多址接入技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
ZHANG H C. Research on multiple access technology of high load satellite network[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [15] MENGALI A, DE GAUDENZI R, ARAPOGLOU P D. Enhancing the physical layer of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4295-4308.
- [16] DEL RIO HERRERO O, DE GAUDENZI R. A high-performance MAC protocol for consumer broadband satellite systems[C]//Proceedings of IET Conference Publications. [S.l.: s.n.], 2009.
- [17] GHANBARINEJAD M, SCHLEGEL C. Irregular repetition slotted ALOHA with multiuser detection[C]//Proceedings of 2013 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Piscataway: IEEE Press, 2013: 201-205.
- [18] PAOLINI E, LIVA G, CHIANI M. Coded slotted ALOHA: a graph-based method for uncoordinated multiple access[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(12): 6815-6832.

- [19] 袁志锋, 郁光辉, 李卫敏. 面向5G的MUSA多用户共享接入[J]. 电信网技术, 2015(5): 28-31.
YUAN Z F, YU G H, LI W M. Multi-user shared access for 5G wireless networks[J]. Telecommunications Network Technology, 2015(5): 28-31.
- [20] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access[C]//Proceedings of 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 332-336.
- [21] 孙诗东, 聂景楠, 傅传荣. 多码道扩频多址ALOHA系统吞吐性能分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(6): 25-29.
SUN S D, NIE J N, FU C R. Performance analysis of throughput for multiple code-channel spread spectrum multiple access ALOHA systems[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 5(6): 25-29.
- [22] REICHMAN A. Enhanced Spread Spectrum Aloha (E-SSA), an emerging satellite return link messaging scheme[C]//Proceedings of 2014 IEEE 28th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [23] GALLINARO G, ALAGHA N, DE GAUDENZI R, et al. ME-SSA: an advanced random access for the satellite return channel[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 856-861.
- [24] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. Enhancing capture effect over LEO satellite within the framework of contention resolution ALOHA[C]//Wireless and Satellite Systems. [S.l.: s.n.], 2019.
- [25] CLAZZER, FEDERICO, KISSLING, CHRISTIAN. Enhanced Contention Resolution Aloha - ECRA[C]//Proceedings of 2013 9th International ITG Conference on Systems, Communication and Coding. [S.l.: s.n.], 2013:1-6.
- [26] KRONDORF M, GOBLIRSCH M, DE GAUDENZI R, et al. Towards the implementation of advanced random access schemes for satellite IoT[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(2): 177-199.
- [27] YANG S, REFAI H H, MA X M. Analysis of R-ALOHA system in a mobile wireless environment[C]//Proceedings of 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2005: 404-408.
- [28] 王亚. 多层空间网络的接入与切换技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
WANG Y. Research on access and handover technology of multilayer space network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [29] 张华涛, 孙富春, 徐帆江. 分层卫星网络中的接入策略研究[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(5): 1121-1124.
ZHANG H T, SUN F C, XU F J. Studies on access strategy of layered satellite networks[J]. Computer Engineering and Design, 2005, 26(5): 1121-1124.
- [30] ZHANG S Q, XU X Q, LU L, et al. Sparse code multiple access: an energy efficient uplink approach for 5G wireless systems[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4782-4787.
- [31] SHAHAB M B, ABBAS R, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Grant-free non-orthogonal multiple access for IoT: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(3): 1805-183.

[作者简介]



李昀翰 (1995-), 男, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为空间信息网络低轨接入、下一代无线局域网。



马建鹏 (1990-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为毫米波大规模MIMO网络、空间信息网络、下一代无线局域网、特种通信网络的物理层和链路层理论与工程应用等。



何熊文 (1982-), 男, 国际空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 航天器接口业务领域副主席, 中国空间技术研究院主任研究员, 主要研究方向为空间数据系统、综合电子系统、空间和星内一体化网络。



张顺 (1985-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波大规模MIMO智能组网、空间信息网络、新一代短距无线通信、智能超表面辅助组网技术以及无线组网验证平台等。



李红艳 (1966-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间信息网络、时变图及时变网络组网技术、时间确定性网络、无线移动自组织网络、下一代无线局域网, 5G密集网络资源管控技术等。