

卫星互联网若干关键技术研究

张更新^{1,2}, 王运峰^{1,2}, 丁晓进^{2,3}, 洪涛^{1,2}, 刘子威^{1,2}, 张晨^{1,2}

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学卫星通信研究所, 江苏 南京 210003;
3. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 卫星互联网具备全球广域无缝覆盖能力, 是未来陆海空天一体化网络的重要组成部分。首先, 讨论了卫星互联网体系架构, 包括系统一般组成、组网方式、工作过程等, 研究了卫星互联网场景下的宽带和窄带业务模型建模方法, 以提取业务的空时分布不均特征; 然后, 分析了频谱共享中的星间同频干扰问题, 初步分析表明未来非地球同步轨道 (NGSO) 星座间会存在较严重的同频干扰, 探讨了低轨卫星波束成形设计和高轨卫星跳波束设计方案, 通过高效挖掘空间域资源, 可显著提升系统容量; 最后, 对卫星互联网领域的几个技术发展方向进行了展望。

关键词: 卫星互联网; 体系架构设计; 业务模型; 波束成形; 干扰分析

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021156

Research on several key technologies of satellite Internet

ZHANG Gengxin^{1,2}, WANG Yunfeng^{1,2}, DIGN Xiaojin^{2,3}, HONG Tao^{1,2}, LIU Ziwei^{1,2}, ZHANG Chen^{1,2}

1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Institute of Satellite Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
3. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Satellite Internet has the ability of global seamless coverage, which will be an important part of the future land-sea-air-space integrated network. Firstly, the architecture of satellite Internet was discussed, which included the general composition of the system, networking mode, working process, etc. Secondly, the methods of modeling broadband and narrowband traffic were proposed to extract the uneven space-time distribution characteristics of traffic for satellite Internet. Then, the co-frequency interference of spectrum-sharing was analyzed, showing that there would be more serious co-frequency interference among different non-geostationary satellite orbit (NGSO) constellations in the future. Next, the schemes of both beamforming design for low earth orbit satellite and beam-hopping design for high orbit satellite were explored, which could significantly improve the system capacity through efficient mining of space-domain resources. Finally, the development prospect of several technologies of satellite Internet were given.

Keywords: satellite Internet, architecture design, traffic model, beamforming, interference analysis

1 引言

卫星互联网是基于卫星通信的互联网, 它是利用人造地球卫星作为中继站向各类陆海空天用户提供宽带互联网接入等通信服务的新型网络。国家发展和改革委员会在 2020 年 4 月 20 日正式宣布将

卫星互联网与 5G、物联网、工业互联网一起列入新型基础设施建设范围, 这标志着我国卫星互联网建设正式提上议程^[1]。

早期提供卫星互联网服务主要通过地球静止轨道 (GEO, geostationary earth orbit) 卫星来实现, 经过几十年的发展, 以新一代高通量卫星 (HTS,

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91738201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91738201)

high throughput satellite) 为代表的 GEO 卫星通信 (GEO-HTS) 系统仍是提供卫星互联网的主力^[2]。与此同时, 以 O3b 系统为代表的中地球轨道 (MEO, medium earth orbit) 卫星通信系统和以第二代铱星系统 (Iridium NEXT)、一网系统 (OneWeb) 和星链系统 (StarLink) 等为代表的低地球轨道 (LEO, low earth orbit) 星座卫星通信系统在卫星互联网领域正发挥越来越重要的作用, 具有低时延、低成本、广覆盖、宽带化等优点, 代表着卫星通信的重要发展方向^[3]。

GEO-HTS 系统的单星覆盖范围广, 少量卫星即可实现全球覆盖。由于卫星数少且相对地面静止, 其组网和频率协调相对容易, 系统建设和维护成本较低, 但同时存在传输时延大、传播损耗高、不能覆盖南北极区等不足。提供互联网接入服务的代表性 GEO 卫星通信系统包括早期面向企业级用户的 IPSTAR、Spaceway-3 等, 以及后期快速发展的 HTS, 如美国 Viasat 系列、EchoStar 17、EchoStar 19 以及我国的中星 16 号、亚太 6D 等卫星。

O3b 星座系统是目前全球唯一一个成功投入商业运营的 MEO 卫星通信系统。第一代 O3b 星座有 20 颗卫星在轨运营, 可为亚非拉及中东地区提供互联网宽带接入。目前, 已计划发射第二代 22 颗 O3bmPOWER 卫星, 组成 42 颗卫星的中轨道卫星星座, 这些新增卫星将会兼用倾斜和赤道轨道, 把 O3b 星座覆盖范围从目前的南北纬 50° 之间扩展到地球两极, 成为一个真正的全球通信系统。

OneWeb 系统是美国 OneWeb 公司建设的宽带 LEO 卫星通信系统, 于 2020 年 7 月被英国政府和印度 Bharti 公司联合收购。根据其向 FCC 提出的申请, OneWeb 系统大致由三部分组成。第一部分由 648 颗工作于 Ku/Ka 频段的 LEO 卫星构成, 分布在轨道高度为 1 200 km、倾角为 87.9° 的 18 个轨道面上, 每个轨道面部署 40 颗 OneWeb 卫星, 星座容量达到 7 Tbit/s^[4]。第二部分将添加 1 280 颗 V 频段 MEO 卫星, 分布在轨道高度为 8 500 km、倾角为 45° 的中轨道上。2020 年 5 月 28 日, OneWeb 公司向 FCC 提交申请再次增加近 4.8 万颗卫星。目前, OneWeb 在轨卫星数量已达 110 颗。

StarLink 系统是美国太空探索 (SpaceX) 公司建设的一个低轨星座卫星通信系统, 能提供覆盖全球的高速互联网接入服务。目前, SpaceX 系统向 ITU

共申报了约 4.2 万颗卫星, 截至 2021 年 2 月 18 日, SpaceX 已经进行了 21 批卫星的发射, 总共发射了 1 145 颗卫星, 其中在轨 1 082 颗 (运行 1 004 颗) 卫星, 再入烧毁 63 颗卫星。

我国的低轨星座卫星通信系统建设也在进行中, 具有代表性的有航天科技集团的“鸿雁”系统、航天科工集团的“虹云”和“行云”系统, 以及中国电科主导的“天地一体化信息网络”工程等。这几个系统都是面向互联网接入而设计的且都完成了首颗卫星的发射。

然而, 大规模低轨互联网星座的爆炸式发展也引发了频率轨道资源的争夺^[5], 同时卫星互联网本身的大时空尺度、业务分布不均匀性等特点又会引起空时频资源利用的忙闲不均, 造成资源浪费, 这对网络体系架构的设计带来了严峻挑战^[6]。基于此, 本文首先梳理了卫星互联网的研究现状以及体系架构的组成要素, 分析了卫星互联网场景下的宽带和窄带业务模型, 以及由于采用星间频谱共享而造成的同频干扰问题; 然后重点研究了适合低轨卫星的波束成形技术、适合高轨卫星的跳波束技术, 分别提出了多星协作波束成形辅助的随机接入算法和业务驱动跳波束算法, 并对卫星互联网未来的几个主要技术发展方向进行了展望。

2 卫星互联网体系架构

2.1 卫星互联网一般组成

卫星互联网一般由空间段、地面段和用户段三部分组成, 如图 1 所示。空间段是指提供信息中继服务的卫星星座, 少则一颗卫星, 多则成千上万颗卫星, 这些卫星可以工作在 GEO、MEO 或 LEO 轨道, 也可以同时包括 2 种或 2 种以上轨道类型的卫星, 卫星之间可以有或没有星间链路。用户段是指供用户使用的手持机、便携站、机 (船、车) 载站等各种陆海空天通信终端。地面段一般包括卫星测控中心及相应的卫星测控网络、系统控制中心及各类信关站 (Gateway) 等, 其中卫星测控中心及相应的测控网络负责保持、监视和管理卫星的轨道位置和姿态, 控制卫星的星历表等; 系统控制中心负责处理用户登记、身份确认、计费和其他的网络管理功能等; 信关站负责呼叫处理、交换及与地面通信网的接口等。其他通信系统是指地面互联网、移动通信网或其他各种专用网络, 用户信息通过卫星中继, 经馈电链路连接到地面信关站, 然后接入地

面通信网。不同地面通信网要求信关站具有不同的网关功能。

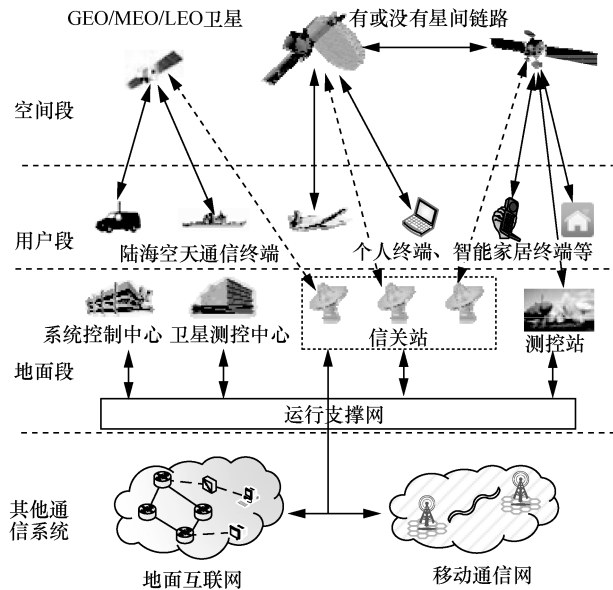


图 1 卫星互联网一般组成

2.2 卫星互联网的组网方式

卫星互联网的组网方式与卫星工作模式有关。当卫星采用透明转发工作模式时，用户终端只能通过卫星一跳与信关站建立连接，再经信关站连接到地面互联网。这种组网方式要求系统中设置非常多的信关站，各信关站可以独立工作，没有信关站覆盖的地方，用户终端无法接入互联网，如图 2 所示。

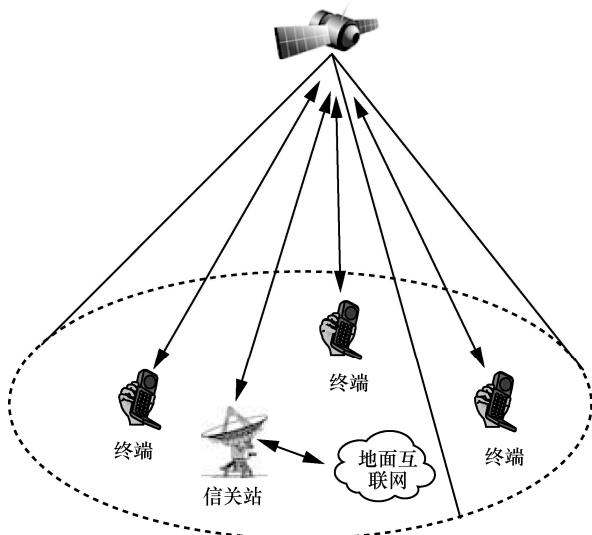


图 2 卫星透明转发工作模式时的组网方式

当卫星采用处理转发工作模式时，卫星具备星上处理和交换能力及星间通信能力。系统中不需要

部署很多的信关站，用户终端可通过多颗卫星的中继建立与信关站的连接，从而访问地面互联网，组网方式如图 3 所示。

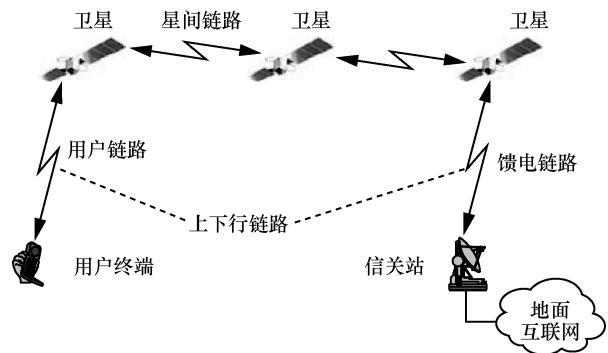


图 3 卫星处理转发工作模式时的组网方式

2.3 卫星互联网的工作过程

用户终端开机后首先进行注册申请，注册成功后，如果用户有通信要求，就通过控制信道申请建立连接；如果连接申请被接受，系统就通过控制信道向用户终端分配资源，包括使用的卫星和信关站标识码、上下行点波束号、时隙、频率或码字信息等；收到资源分配命令后用户终端即可建立连接；由于用户和卫星都可能是移动的，通信过程中还需要进行星间或波束间切换；连接结束后，用户终端释放信道，系统收回分配的网络资源。

2.4 高轨与低轨星座组网的对比

低轨星座与 GEO-HTS 代表着利用卫星通信提供互联网服务的 2 种实现思路：低轨星座通过发射数百上千颗小卫星，形成一个大規模星座来实现全球范围内的高容量；而 GEO-HTS 则通过发射超大型卫星在一个区域内形成数百上千个点波束来实现高容量。表 1 给出了代表性 GEO-HTS 系统（美国 ViaSat-3）和低轨星座系统（OneWeb 和 StarLink）在工作频率、频谱效率、单星容量等方面的对比^[7]。低轨卫星通常是小卫星，其波束数目和单星容量远低于 GEO-HTS，但由于 GEO-HTS 系统通常只由一颗或有限的几颗卫星组成，而低轨星座系统通常由大量的卫星组成，如 OneWeb 系统第一期包括 648 颗卫星，StarLink 系统第一期则包括 4 425 颗卫星，因此，低轨星座系统的总容量要比 GEO-HTS 系统高很多。

相比 GEO-HTS 系统，低轨星座系统在传输时延、路径损耗、入轨成本方面有优势。具体来说，GEO-HTS 系统往返时延约为 480 ms，而低轨星座

表 1 不同卫星波束参数对比

类别	卫星/星座	下行带宽/GHz	频谱效率/(bit·s·Hz) ⁻¹	波束数	频率复用因子	单星容量/(Gbit·s ⁻¹)
低轨星座	OneWeb	2	2.4	16	2	9.6
	StarLink	2	2.7	8	4	21.6
GEO-HTS	Viasat-3	3.5	1.1	1 000	250	1 000

系统一般只需 30 ms 左右，GEO-HTS 系统的路径损耗约为 210 dB，低轨星座系统只需 180 dB 左右；另外，低轨卫星单位质量入轨成本大概只有 GEO-HTS 的 1/10~1/5。但是在卫星寿命、地面终端和容量利用效率等方面，低轨星座系统的性能就不如 GEO-HTS 系统，GEO-HTS 系统的使用寿命一般为 15 年，而低轨星座系统受大气阻力等影响使用寿命为 5~8 年；同时低轨卫星的地面终端必须使用自动跟踪天线，制造成本高，并且地球表面 70% 以上为海洋和荒野等无人区域，低轨卫星全球覆盖的特点造成系统容量利用效率较低，反观 GEO-HTS 系统，其可通过对覆盖区域进行预先设计，容量利用效率较高。

2.5 基于 SDN 的柔性体系架构设计

实现卫星通信系统与地面通信系统的融合是通信网的发展趋势，基于此，本文借鉴地面 5G/B5G 网络体系架构的设计思想，设计了一个天地融合卫星互联网柔性体系架构，如图 4 所示。按照卫星互联网一般组成，该架构同样包括空间段、用户段和地面段 3 个部分。与传统体系架构不同的是，为实现天地融合，其用户终端可以是一种多模态终端，支持多种空口波形，能够根据可用链路自主选择与各类卫星节点或地面基站进行通信。该融合架构中地面核心网利用 SDN、NFV 技术实现控制面和数据面的分离、软硬件解耦，完成融合网络的资源调度和管理控制^[8]。

数据面功能主要完成业务信息的传输和交换，并通过天地融合数据网关接入地面核心网。控制面功能主要负责网络业务的实时控制，保障业务数据的高效交换，同时上报全网状态信息至管理面并接收管理面的管理策略。考虑到空间段卫星节点需要负责用户寻址、用户接入控制、调度、管控方式等功能，将核心网的接入与移动性管理功能（AMF, access and mobility management function）和会话管理功能（SMF, session management function）这 2 个功能节点延伸到卫星控制平面。管理面对卫星状态、地面节点状态、网络状态、路由、安全、业务、资源等方面进行管理，将管理指令下发至控制面和

数据面。地面段管控设备和地面核心网通过天地融合控制网关进行命令交互。

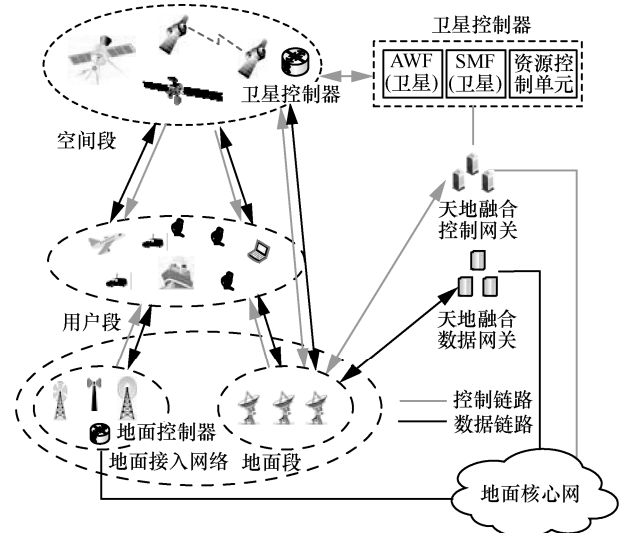


图 4 天地融合卫星互联网柔性体系架构

在逻辑功能上对整体架构进行划分，分为感知层、功能层和应用层，如图 5 所示。其中，感知层利用底层硬件资源，分析卫星互联网的业务模型和干扰场景，所获得的数据资源为上层各项功能的实现提供支撑。功能层作为整体系统架构的核心部分，对卫星互联网系统进行管理与控制，主要完成资源调度、组网协议、干扰协调等功能。本文以卫星资源调度为例，提出针对低轨卫星的空时频资源的高效利用技术和针对高轨卫星的跳波束技术。功能层所生成的资源调度策略都会提交到图 4 中的卫星控制器和地面控制器，由其进行天地融合网络的具体资源分配操作。限于篇幅，SDN 架构设计^[8]、资源控制器的优化部署^[9]和资源管理^[10]等方面未深入展开。应用层主要分为宽带互联业务和窄带物联网业务，利用功能层相关决策的部署，满足其网络服务需求。

整个系统架构采用模块化设计模式，通过“功能组件”的组合，构建满足不同应用场景需求的专用逻辑网络。在不改变底层物理设备的前提下，通过功能层下发控制指令指导底层设备支撑卫星互

联网不同业务，实现整体网络的集中管理、资源按需分配和负载均衡。

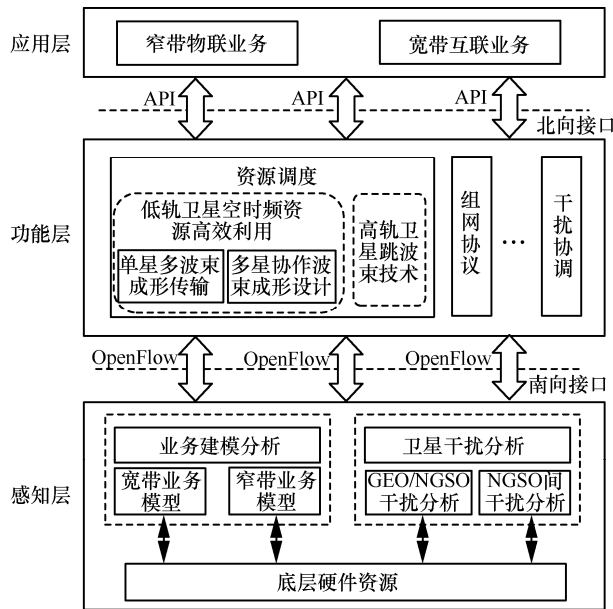


图 5 天地融合卫星互联网逻辑功能架构

3 卫星互联网业务模型

卫星互联网覆盖范围广、终端数量多、QoS 差异大。对于低轨卫星通信系统，由于卫星的高动态，在一个轨道周期内星下点要在海洋与陆地、山区与平原、城市与农村之间进行多次转换，卫星业务量表现出很强的突发性。研究卫星互联网业务量的分布规律，对于天地融合卫星互联网体系架构设计具有重要意义。下面，分别针对宽带业务模型和窄带业务模型进行建模研究。

3.1 宽带业务模型

卫星互联网宽带业务主要是指人与人（H2H, human to human）之间通信产生的语音或数据业务，因此其业务模型主要取决于人口密度和时间这 2 个因素，其原因在于：1) H2H 通信的业务分布与人口密度或 GDP 呈显著的正相关；2) H2H 业务的通信时段具有较强的周期性。由此，可从业务空间分布和时间变化 2 个维度对卫星互联网宽带业务进行建模。

1) 业务空间分布建模

对波束覆盖区域按照经纬度进行网格划分，以我国为例，可对波束覆盖范围按经度每隔 1.5°、纬度每隔 1.25°划分为 559 个网格。业务量强度^[11]计算式为

$$\rho(i) = \sum_{j=1}^n (\lambda_{i,j} T_{i,j} \sum_i n_{i,j}) \quad (1)$$

其中， $\rho(i)$ 表示第 i 个网格的业务量强度， $\lambda_{i,j}$ 表示第 i 个网格中第 j 种业务平均到达率， $T_{i,j}$ 表示第 i 个网格中第 j 种业务平均服务时长， $n_{i,j}$ 表示第 i 个网格内的第 j 种业务用户数量。假设各省份内的用户均匀分布，因此可以通过面积比计算每个网格内的用户数量，具体计算式为

$$n_{i,j} = \frac{A_{i,k}}{\sum_i A_{i,k}} N_{i,j,k} \quad (2)$$

其中， $N_{i,j,k}$ 表示第 i 个网格所在省份 k 的第 j 种业务用户数量， $A_{i,k}$ 表示省份 k 的第 i 个网格面积。各省份的用户数量的计算式为

$$N = GPM P_r T_p \quad (3)$$

其中，GPM 表示区域经济发展程度， P_r 表示卫星服务的普及程度， T_p 为卫星服务在通信业务中的市场占有率。以上参数可根据《中国统计年鉴-2019》^[12] 等获得。

另一方面，单个网格面积计算式为

$$A \approx l_a l_b = R_E^2 \frac{\pi}{120} \frac{\pi}{144} \cos(\theta_c) = R_E^2 \frac{\pi^2}{17280} \cos(\theta_c) \quad (4)$$

其中， l_a 表示每个网格沿经度方向长度， l_b 表示每个网格沿纬度方向长度， θ_c 表示每个网格中心纬度值， R_E 表示地球半径。综上，可求得各波束覆盖范围内的网格业务强度之和，并参考不同业务所需的带宽、速率等，最终可得业务量的空间分布模型。

2) 时间变化模型

业务量不仅具有区域差异性，还存在随时间的周期变化性。为分析业务量变化受时间因素的影响，描述其在一天之内的相对变化情况，文献[13]提出了一个归一化业务量时间加权因子，在一天之内（24 h），根据人们日常的活动规律，在不同的时间段，给业务量分配一个时间加权系数作为业务量的时间变化模型。

将时间加权因子与业务需求峰值加权，便可得到业务量时间变化模型，本文以一个 GEO 卫星点波束为例，仿真其业务量随时间变化的情况，如图 6 所示。

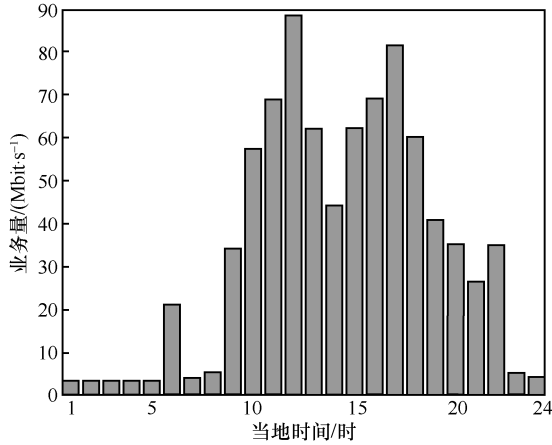


图 6 一个 GEO 卫星点波束内业务量随时间变化示意

3.2 窄带业务模型

窄带业务以物联网业务作为典型代表进行分析。考虑物联网业务时空二维分布不均，探索物联网海量接入业务空时随机变化的特征，初步设计了如图 7 所示的空时二维业务模型产生方法。空间维度模型从不同地理区域的终端部署密度出发获得终端位置，用来刻画终端空间维度随机分布特征，具体步骤如下^[14]。



图 7 窄带业务空时二维模型产生方法

1) 设 $Z(x, y)$ 为目标区域的物联网终端部署密度，其中 y 和 x 通过相应的仿射变换对应于实际的地理经纬度坐标，计算归一化的二维节点概率密度函数

$$p_{x,y}(x, y) = \frac{Z(x, y)}{\sum_x \sum_y Z(x, y)}$$

2) 计算 X 的边缘累积概率分布函数

$$F_X(x) = \sum_0^x \left(\sum_y p_{x,y}(x, y) \right)$$

3) 采用一维逆变化采样方法，利用上述分布函数生成 X 轴上的一个随机数 $x' = F_X^{-1}(U_1)$ ，其中， U_1 表示一个服从均匀分布的随机数。

4) 将 $Z(x, y)$ 中的第 x' 行提取出来，记为 $Z(y|x')$ ，计算给定 X' 条件下 Y 的累积条件概率分

$$布函数 F_{Y|X'}(y|x') = \sum_0^y \frac{Z(y|x')}{\sum Z(y|x')}$$

5) 类似地，获得 Y 轴上的一个随机数 $y' = F_{Y|X'}^{-1}(U_2)$ ，将生成的 x' 和 y' 通过仿射变化转换成实际的纬度坐标 λ 和经度坐标 ϕ ： $\lambda = x' \lambda_{step} + \lambda_{start}$ 和 $\phi = y' \phi_{step} + \phi_{start}$ ，其中， λ_{start} 和 ϕ_{start} 分别表示纬度和经度最小的参考坐标， λ_{step} 和 ϕ_{step} 分别表示纬度和经度的划分间隔。

物联网业务主要分为周期驱动型和事件驱动型 2 种业务，分别具有平稳和突发特性。对于周期驱动型业务，当节点数超过一定数量时，可认为在高终端密度下，异步同周期业务源叠加在时间维度可近似为泊松过程。对于事件驱动型业务，异步非同周期业务源聚合可根据业务种类及到达强度，将其分为多个异步同周期业务源叠加，得到具有不同强度的多个叠加泊松过程^[15]。根据泊松过程的可加性，单个区域内的叠加业务强度可通过各类不同强度的叠加过程近似得到。此外，考虑事件驱动业务造成的突发流量具有激增或锐减特性，在时间维度可通过贝塔分布或中断式泊松分布进行建模。

本文以一个采用 walker 构型的低轨星座为例，分别用 2 种业务量产生方法仿真星座中某一颗卫星的集总业务量随时间变化的情况，如图 8 所示。从图 8 可以发现，单星集总业务量随时间发生剧烈变化，具有显著的高峰均比特征。

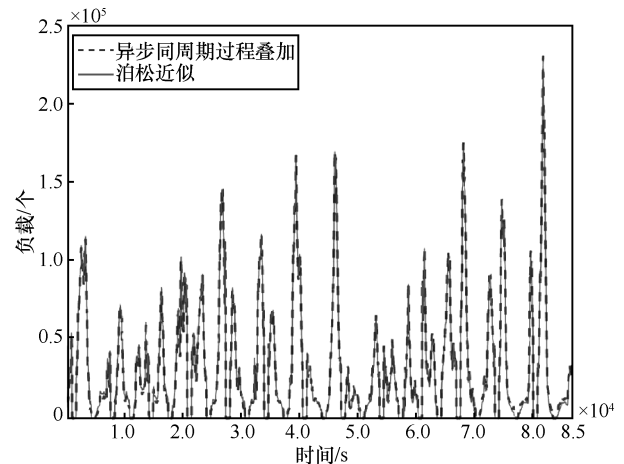


图 8 2 种业务量产生方法下单颗低轨卫星集总业务量随时间变化的情况

4 星间频谱干扰分析

随着非静止轨道卫星星座的飞速发展，对于星地/星间频率兼容性研究已从 GEO 与 NGSO 间拓展至 NGSO 星座间。依靠卫星载荷与信号处理技术的发展，通信卫星平台和地面站的特点都在发生变化，星上的有源数字相控阵将成为主要发展趋势、信关站必将支持多星连续跟踪、终端形态也将延伸至个人移动、车辆、舰船、飞行器等等动中通终端和固定站点。同时，由于频率轨位资源紧张，典型 NGSO 系统间工作频段存在重叠（如表 2 所示），开展新的频率兼容性分析势在必行。

本节将简要介绍同频干扰场景、GEO 与 NGSO 星座间以及 NGSO 星座间的频率兼容性分析过程与结果。

4.1 同频干扰场景分析

相较于 GEO 卫星的干扰环境静态、干扰呈现周期性等特点，低轨星座间的同频干扰场景具有特殊性。根据表 2 给出的代表性低轨星座系统用频情况，在低轨星座系统用户链路间、馈电链路间和用户与馈电链路间均可能存在干扰，下面，着重梳理 NGSO 星座间干扰场景，GEO 可看作其简化形式。

1) 馈电链路间干扰。卫星与信关站工作于凝视方式，且波束连续跟踪通信对端。同时，由于卫星星座规模大，信关站大多具备多幅收发天线，能够同时服务可视范围内的多颗 NGSO 卫星。当不同系统的信关站距离较近时，各自星座内卫星的相对运动造成波束指向时变。因此，对馈电链路间干扰场景来说，信关站可看作一个波束指向时变的广义多波束平台，集总干扰复杂。

2) 用户链路间干扰。NGSO 星座的用户链路大多采用多点波束的方式实现服务区域的覆盖，波束调度方式有固定指向型、凝视型和灵活指向型，实现复杂度逐渐增加。而用户端可分为固定站点、动中通终端和移动通信终端等多种，其中固定站点和

动中通终端能力较强，能够提供指向性波束，可凝视通信卫星，而移动通信终端受体积等实际因素限制，大多以弱指向性天线作为收发天线。因此，用户链路间干扰是最复杂的物理干扰场景，对于下行干扰，需要考虑不同卫星系统间频段、多色复用、卫星下行多波束体制、动态性、地面终端类型等因素，而上行干扰需要考虑地面终端类型、分布、数量以及卫星的动态性，是典型的集总干扰场景。

3) 用户链路与馈电链路间干扰。用户链路与馈电链路间的干扰可以看作 2 个多波束平台间的干扰。其场景特点需要考虑卫星与地面间的相对运动，以及多波束的变化。这一场景可以看作用户链路间干扰的一种简化情况。

4.2 GEO 与 NGSO 星座间频率兼容性分析

本节主要针对 GEO 和典型 NGSO 系统之间的干扰情况进行分析。以铱星系统（Iridium）上行链路为例^[16]，其工作在 L 频段，主要提供窄带移动业务。空间段由 66 颗 LEO 卫星组成，卫星分布在 6 个轨道面上，每个轨道面上部署 11 颗卫星，LEO 卫星轨道高度为 780 km，轨道倾角为 86.4°，当波束边缘通信仰角为 8°时，可实现对全球的无缝覆盖。GEO 卫星系统由 3 颗 GEO 卫星组成，可实现对中低纬度地区的无缝覆盖。

图 9 和图 10 分别为一天范围内上行链路中 GEO 和 LEO 卫星接收到的信号质量变化情况。可以看到，由于频率较低，波束较宽，受到干扰的影响很大。其中，由于 GEO 卫星覆盖范围广，GEO 卫星接收到的信号质量下降了约 30 dB，且一直遭受干扰；LEO 卫星也受到干扰的影响，除了南北极区，信号质量也下降了 20 dB 左右。由此可以看出，LEO 由于全球覆盖，且窄带应用波束较宽，导致干扰在所有时间范围内均存在，因此必须要采用多维联合的干扰规避措施。

4.3 NGSO 星座间频率兼容性分析

本节以 Starlink 对 OneWeb 星座的下行用户链

表 2 几个代表性低轨星座系统用频情况

星座	用户上行/GHz	馈电上行/GHz	用户下行/GHz	馈电下行/GHz
OneWeb	12.75~14.5	27.5~30.0	10.7~12.7	17.8~20.2
Starlink	14.0~14.5	27.5~30.0	10.7~12.7	17.8~19.3
Telesat	27.5~30.0	—	17.8~20.2	—
Kuiper	27.5~30.0	—	17.7~18.6、18.8~20.2	—

路干扰为例^[17], 分析 NGSO 星座间频率兼容性情况。OneWeb 用户波束采用 16 个高椭圆波束, 覆盖 1 100 km² 的正方形区域, Starlink 采用灵活波束, 四色复用, 建模为 4 个同频波束。同时, 由于 Starlink 采用灵活波束, 在对热点地区进行仿真时, 将灵活波束视为短时间内的凝视波束。波束示意如图 11 所示。地面用户考虑多个用户, 建模为均匀分布在 119°E~120°E、29°N~30°N 内的 40 个不同的用户终端。星座参数按照真实系统参数设置。

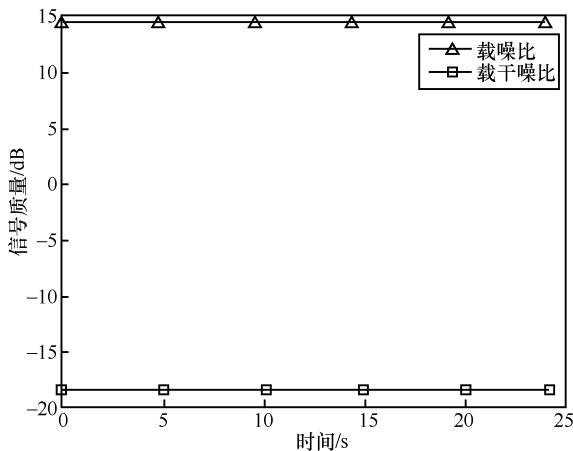


图 9 GEO 卫星信号质量

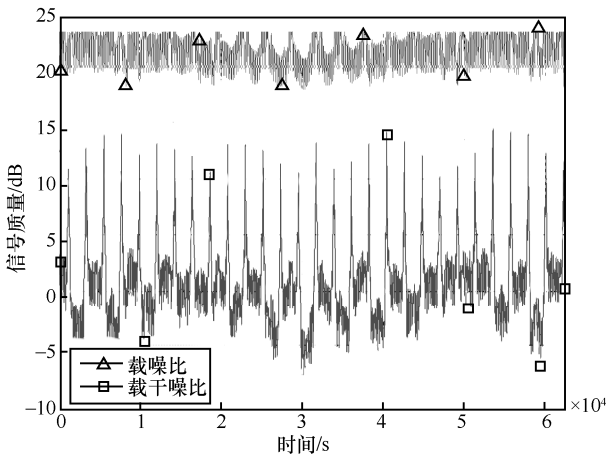
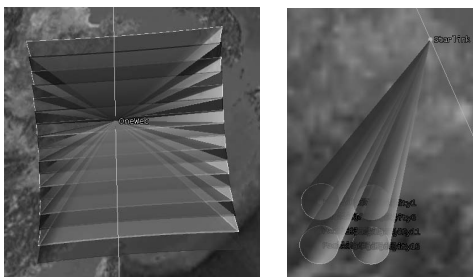


图 10 LEO 星座信号质量



(a) OneWeb (b) Starlink
图 11 OneWeb 用户波束与 Starlink 用户波束建模

载干噪比累积分布曲线如图 12 所示。从图 12 可以进一步得到干扰发生的概率为 99.8%, 系统的可用时间百分比为 73.3%。

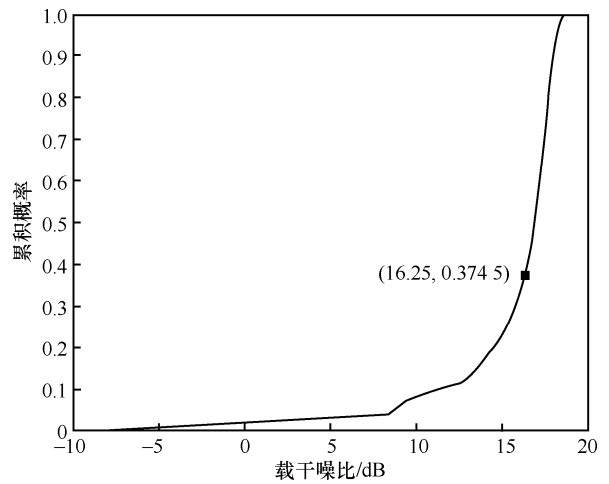


图 12 载干噪比累积分布曲线

对有效功率通量密度 (EPFD, effective power flux density) 超过限值的时间百分比进行统计, 可以得到如图 13 所示的时间百分比曲线。

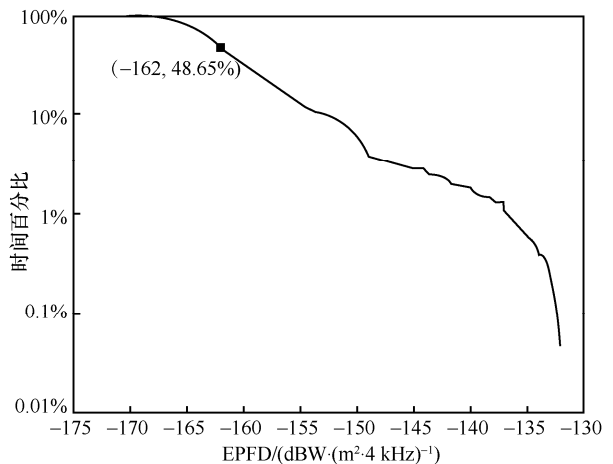


图 13 地面受干扰用户的 EPFD 值曲线

当 EPFD 的限值设置为 $-162 \text{ dBW} \cdot (\text{m}^2 \cdot 4 \text{ kHz})^{-1}$ 时, 对应的超过限值的时间占比为 24%, 要大于馈电链路间的干扰场景。

基于上述对用户链路间指标的分析可以看到, 未来 NGSO 星座间同频干扰十分严重, 同时由于地面用户分布的全球性和不确定性, 无法通过空间隔离来减缓干扰, 需要在星座申报阶段进行更详细的频率兼容性分析, 并在系统设计时考虑稳健的抗同频干扰手段。

5 低轨卫星空间域资源高效利用技术

多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 系统是提升地面 4G/5G 网络容量的主要手段, 但卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道, 并不能取得理想的分集增益, 只能探索提升 MIMO 系统空间复用增益的方法。传统卫星通信中的波束成形技术就提供了这样的空间复用解决方案, 但需要借鉴 5G 网络大规模 MIMO 的设计理念来研究分别利用同一颗卫星的天线阵列 (星内) 和不同卫星天线间协作组阵 (星间) 进行波束成形设计, 实现单星和多星覆盖区域内空域资源的高效分割复用, 从而实现波束间的负载均衡和系统容量提升, 并解决传统固定多点波束系统在多星覆盖区内多址干扰严重、影响系统容量的问题。

5.1 面向负载均衡的单星多波束成形传输

针对单星多波束场景下多波束空间域资源的高效利用问题, 本文根据不同区域地理特征, 如海洋、沙漠、山区、平原等进行栅格划分并采用机器学习的方法提取区域化的信道信息^[18]。在单星多波束场景下研究星上多波束成形传输, 通过控制波束的数量、指向以及成形将多波束覆盖范围内的激活用户数尽量均匀地分配在不同的波束中, 降低同一波束内终端的碰撞概率。

假设星载阵列天线产生 7 个波束 $F_i(\varphi, \theta)$, $i=1,2,\dots,7$, 覆盖一定的地理面积 $S = \sum_{s=1}^7 s_i$, 波束间的总交叠面积用 S_l 表示, 每个波束范围内激活用户的总业务量用 $B_i, i=1,2,\dots,7$ 表示。某个时刻由于

激活用户数的增长, 波束 $F_1(\varphi, \theta)$ 区域内时频资源紧张, 而邻近的波束 (用 $F_i(\varphi, \theta), i=2,\dots,7$ 表示) 中有 n 个波束由于用户数量少, 波束覆盖范围内时频资源得不到充分的利用。本文采用星载阵列天线通过增加/减少子阵的方式来控制波束覆盖范围, 设计加权向量的相位实现波束指向的控制, 充分发挥星上多波束相控阵载荷波束数量可控制、波束指向可变、波束能成形的优势均衡不同波束内业务量, 如图 14 所示。

本文建立式(5)所示的优化问题来控制单星多波束成形设计

$$\begin{aligned} \min_{F_i(\varphi, \theta)} & \left[\max(B_i^m) - \min(B_i^m) \right], i=1,2,\dots,7 \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{i=1}^7 s_i^m = S \\ & \text{C2: } S_l^m \leq S_l \\ & \text{C3: } D_i^m \leq D, i=1,2,\dots,7 \\ & \text{C4: } (\varphi_{i0}^m, \theta_{i0}^m) \leq K(2^n) \\ & \text{C5: } \sum_{j \neq i, j=1}^7 I_{i,j}^m \leq \text{mll} \end{aligned} \tag{5}$$

其中, m 表示第 m 次波束参数控制, D_i^m 表示第 i 个波束调整波束大小需要的阵列口径, D 表示星载阵列天线总口径上限约束, $(\varphi_{i0}^m, \theta_{i0}^m)$ 表示第 i 个波束的第 m 次调整波束指向, $K(2^n)$ 表示包含 n bit 数字式相位控制器的波束指向最小精度, mll 表示最高干扰门限。式(5)中目标函数表示均衡不同波束内的业务量; 约束 C1 表示多波束覆盖地面总面积的约束, 约束 C2 表示多波束交叠区大小上限的约束,

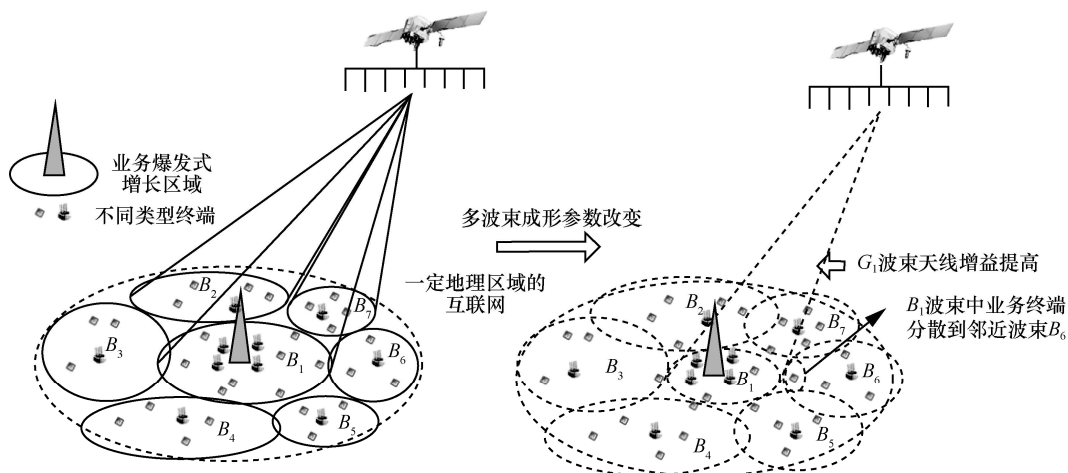


图 14 单星多波束空间域资源分割技术示意

约束 C3 表示覆盖大小参数的调节不能超过星载阵列天线的分辨率（口径约束），约束 C4 表示星载阵列天线主瓣指向调整的最小精度约束，约束 C5 表示调整波束参数后的波束旁瓣对于其他波束的干扰上限约束。在低轨卫星高动态下，对式(5)优化问题进行迭代求解以形成适合当前卫星覆盖范围内业务特征的多波束成形参数。

5.2 面向多址干扰抑制的多星协作波束成形设计

针对传统卫星通信系统共视区内多址干扰严重问题，本文研究多星协作波束成形方法，将共视多星构造为稀疏分布阵列，挖掘星间联合处理增益，抑制多址干扰，提升系统容量。多星空间域资源高效利用场景如图 15 所示。在多星多波束场景下，利用多星覆盖的空间域资源，设计多星协作波束成形辅助的随机接入（CBA, cooperative beamforming aided ALOHA）方案，方案包括前导码检测、数据分组竞争检测、多星协作波束成形、协作串行干扰消除 4 个步骤，能消除共视区内多址干扰，提高系统吞吐量。

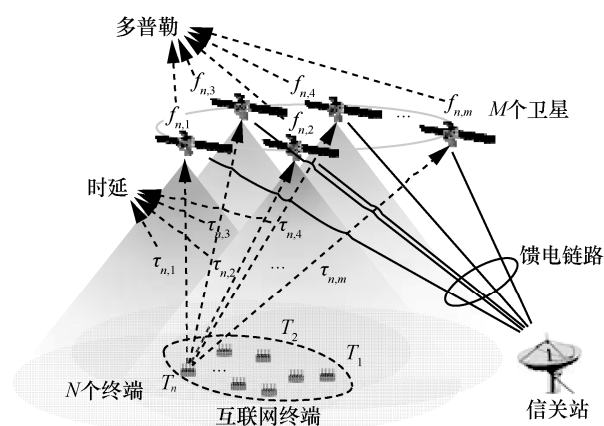


图 15 多星空间域资源高效利用场景

假设数据在一个接收窗口内到达卫星的概率服从参数为 λ 的泊松分布，假设每个数据分组的长度固定且其传输时间为 T_0 ，则系统归一化负载可以表示为^[19]

$$G = \frac{\lambda}{G_p M} \quad (6)$$

其中， $G_p = (1/|b|)$ ， ℓ 表示调制阶数； M 表示系统中接收卫星的个数。

CBA 方案具体步骤如下。

步骤 1 前导码检测。 信关站利用数据分组前导码的相关性检测多星接收信号中未发生碰撞的数据分组前导码，并利用未发生碰撞的前导码完成

数据分组的时频同步和信道估计功能，时频同步确保参加协作处理的数据分组来自同一终端，信道估计为步骤 3 中协作波束成形优化问题提供期望方向约束。

步骤 2 数据分组竞争检测。 对未发生碰撞前导码所在数据分组进行循环冗余校验（CRC, cyclic redundancy check），根据 CRC 结果，可将竞争类型分为以下 3 种情况：1) 所有协作接收机处的 CRC 结果均正确，即该数据分组未发生碰撞，则按照时间序列继续捕获下一个数据分组，并返回步骤 1；2) 至少有一个接收机成功接收数据分组，其他协作接收机未成功接收，则根据传统多星异步协同 ALOHA（ACA, asynchronous cooperative ALOHA）方案^[20]进行串行干扰消除解调数据分组，并返回步骤 1；3) 所有接收机都未能成功接收数据分组，则根据步骤 1 前导码检测的结果，进入步骤 3。

步骤 3 多星协作波束成形。 根据步骤 1 中前导码检测结果，采用基于 LCMV 准则的多星协作波束成形，波束成形器中约束前导码未发生碰撞的期望数据分组功率，同时抑制干扰和噪声，数学表达式为

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0) = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为前导码未碰撞数据分组的导向矢量， \mathbf{R}_{xx} 为多星接收信号的协方差矩阵。对于式(7)，可以采用拉格朗日法求解最优加权

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) \quad (8)$$

经过多星协作波束成形器后期期望解调数据分组的信干噪比用 γ 表示，设信号成功接收的解调门限为 $\bar{\gamma}_{\text{th}}$ ，若 $\gamma \geq \bar{\gamma}_{\text{th}}$ ，则成功接收数据分组，采用干扰消除的方法去除已正确解调数据分组，回到步骤 1；若 $\gamma < \bar{\gamma}_{\text{th}}$ ，则接收失败。

步骤 4 协作串行干扰消除。 如果步骤 2 或步骤 3 中有数据分组被成功解调，则采用多星协作的方式进行多星间的串行干扰消除方式解调数据分组。

吞吐量和数据分组丢失率是衡量随机接入系统性能的重要指标，图 16 给出了 CBA 方案、ACA 方案^[19]和 CRDSA（contention resolution diversity slotted ALOHA）方案^[20]的仿真性能对比。其中归一化负载 G 如式(6)所示，系统吞吐量可以表示为 $T(G) = G[1 - \text{PLR}(G)]$ ，其中， $\text{PLR}(G)$ 表示在负载为 G 时的系统数据分组丢失率。

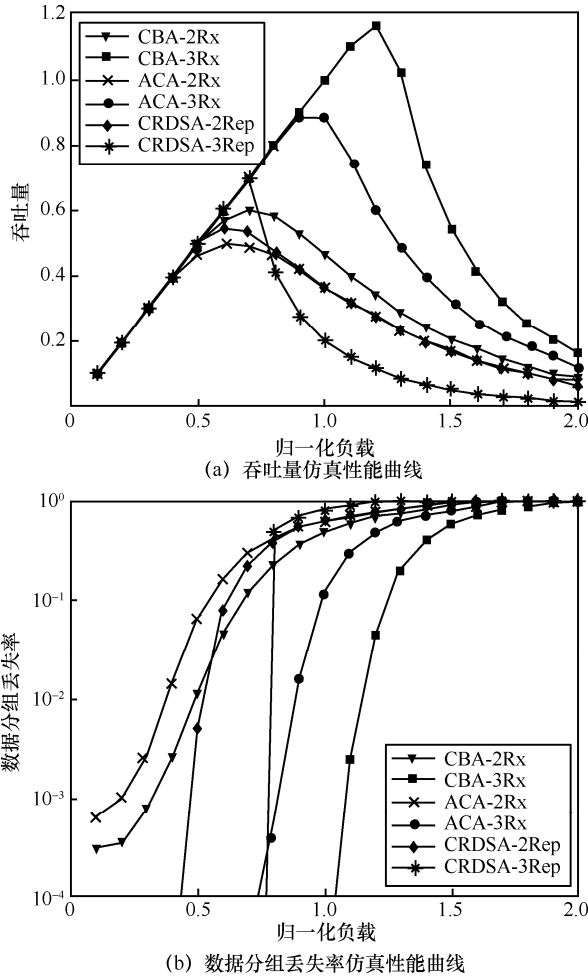


图 16 CBA 算法随机接入仿真性能

图 16 中，Rx 表示接收机个数，Rep 表示发送的数据分组副本个数。从图 16 可以看到，在相同条件下，CBA 方案相比于 ACA 方案，在吞吐量性能上提升了约 16%，具有更好的吞吐量和数据分组丢失率性能，能有效缓解 ACA 方案在高负载条件下的“死锁”问题，同时 CBA 方案没有引入额外的数据分组副本，在高负载场景下比 CRDSA 方案具有更好的性能，更适合未来卫星互联网场景。

6 高轨跳波束技术

针对 HTS-GEO 系统，卫星互联网业务分布的空间不均匀性和时变会导致各波束频繁出现“忙闲不均”的现象，不能满足多样化任务的按需覆盖和高效传输需求，造成通信资源的浪费。

与传统的多波束卫星通信系统相比，跳波束技术能够更好地满足业务需求不均衡的应用场景，被认为是高通量卫星的关键技术^[21]。为此，需要对跳

波束技术进行研究，本文给出了一种业务驱动的跳波束资源分配算法。在资源受限的条件下，为了使系统吞吐量尽可能满足用户需求，建立如下资源分配的目标函数^[22]

$$\begin{aligned} & \max \prod_{i=1}^M \left(\frac{R_i}{\bar{R}_i} \right)^{\omega_i} \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M N_i \leq N_c W \\ & \quad \quad \sum_i T_{ij} = N_c \end{aligned} \quad (9)$$

其中， ω_i 为各波位的权重，当各波位权重相同时，该目标函数为公平目标函数，当权重不同时，该目标函数为权重目标函数，本文采用公平目标函数来求解； M 为总波束数； R_i 为系统提供给波位 i 的容量； \bar{R}_i 为波位 i 需求的容量； N_i 为系统分配给波位 i 的时隙数； N_c 为波束簇的数目； T_{ij} 为时隙分配矩阵的元素，取值为 0 或 1，当 $T_{ij}=1$ 时，表示 j 时隙波位 i 被波束照射。对目标函数进行对数运算后该问题转化为一个凸优化问题，该目标函数转化后为

$$\max \sum_{i=1}^M \omega_i \text{lb} \left(\frac{R_i}{\bar{R}_i} \right) \quad (10)$$

该凸优化问题可用拉格朗日函数求解，其中 γ_i 表示波位 i 的信噪比，可得时隙数目的分配结果为

$$N_i = \frac{\omega_i \bar{R}_i W}{\text{lb}(1 + \gamma_i)} \frac{N_c W}{\sum_{j=1}^M \frac{\omega_j \bar{R}_j W}{\text{lb}(1 + \gamma_j)}} \quad (11)$$

算法性能验证以资源受限的 Ka 波段 GEO 卫星通信系统下行链路为仿真场景，工作频率为 30 GHz，共 $M=21$ 个波束，平均分为 3 个簇，每簇 7 个波束。其他关键的仿真参数如表 3 所示。

图 17 给出了 3 种资源分配算法的系统吞吐量仿真结果对比。其中，多波束均分算法是指均分信道带宽等星上资源，非业务驱动跳波束算法是按照波位顺序轮流访问各波位，各波位驻留时间相同。业务驱动跳波束算法的服务时长由式(11)计算得到的时隙数目决定，同时引入了同频复用距离来规避干扰。从图 17 中可以看出，业务驱动跳波束算法可以显著提高系统的吞吐量性能，从仿真结果看，业务驱动跳波束算法相对传统多波束均分算法能提升 65.74% 的吞吐量。

表 3 仿真主要参数

参数	取值
总带宽/MHz	300
窗口长度	256
总功率/W	300
卫星高度/km	35 786
波束半径/km	300
天线发射增益/dB	45
天线接收增益/dB	50
自由空间损耗/dB	210
雨衰/dB	12
信噪比/dB	20
总需求量/(Gbit·s ⁻¹)	10
权重	2

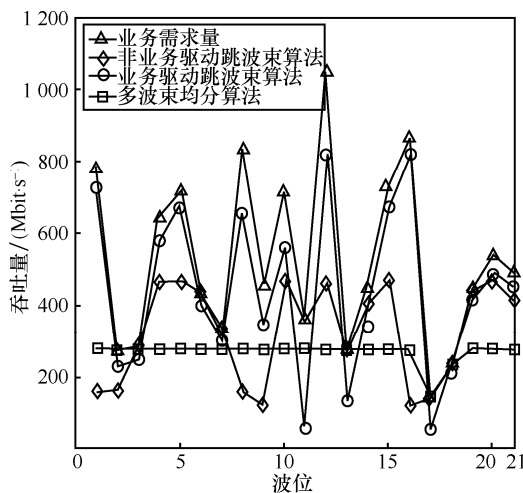


图 17 3 种资源分配算法的系统吞吐量仿真结果对比

7 未来的研究展望

尽管对卫星互联网的研究已经开展了很多年,但由于其大时空尺度、动态性强、拓扑结构复杂、业务种类繁多等特点,导致在体系架构、空域资源利用、组网协议和干扰协调等方面仍存在较大的挑战。

7.1 天地一体化体系架构

未来的空天地一体化通信网络,是以地面网络为依托、以天基网络为拓展的立体分层、融合协作的网络,各星座卫星(包括高、中、低轨)和地面节点共同形成多重覆盖^[23]。这样一个系统具有网络异质异构、空间节点高度动态、拓扑结构时变、极大的时空尺度、空间节点资源受限和卫星广播传输

链路易受攻击等特点,这些特点对网络架构、星地融合通信体制以及星间组网协议等方面的设计提出了更高的要求。

7.2 空时频分割复用技术

卫星互联网业务具有空时二维不均及突发性强的特征,不同区域内终端数量和业务 QoS 需求差异性大,导致业务繁忙区域网络资源紧张,而业务空闲区域网络资源又得不到充分利用。卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道,采用地面 5G 网络中多天线收发的空时编码技术并不能取得理想的分集增益,星地间长传播时延导致难以获得完美的实时信道信息,低轨卫星的在轨高速运动和终端的随机移动又造成统计信道信息准确度低、生存周期短。传统固定多点波束卫星通信系统跨波束资源调度能力弱,并且在多星覆盖区内存在严重的多址干扰,不能满足海量终端随机接入对系统容量和资源调度能力的需求^[24]。为此,需要基于信道与业务复杂随机特征研究空时频多域资源的分割复用,以进一步提升系统容量。

7.3 组网协议

TCP/IP 是地面互联网采用的通信协议,但在空间数据传输领域则主要采用国际空间数据系统咨询委员会 (CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems) 协议体系,而在深空通信及一些大时延应用领域采用的是延迟容忍网络 (DTN, delay tolerant network) 协议体系。作为卫星互联网,为便于与地面互联网的融合,采用 TCP/IP 可能是一种比较合适的选择。但由于卫星网络的特殊性,必须要解决 TCP/IP 在链路大时延和频繁通断场景下的低效率工作问题。此外,路由协议也是一个需要重点关注的方面,它是决定星座网络部署和传输性能的关键因素,与传统卫星通信系统主要采用单层星座不同,目前在建的大规模星座主要采用多层星座或混合轨道星座,其网络拓扑变化连续频繁发生且无规律性,会造成数据传输过程中路由频繁发生变化,进而带来难以承受的重路由开销。因此,需要研究高效、稳健的路由方法以应对持续、随机、高动态性的拓扑变化以及业务流分布不均带来的网络拥塞和负载均衡问题。

7.4 干扰协调技术

由于频谱资源严重不足,需要实现卫星通信系统与地面无线通信系统之间、卫星通信系统之间(如 GEO 系统与 LEO 系统、LEO 系统与 LEO 系统)

的频谱共享问题。由于 LEO 卫星的轨道运动, 其干扰场景非常复杂, 需要针对时变空变的干扰特性研究专门的频谱共享与干扰协调技术。目前可用的实现方法主要有 2 类, 一是使用认知无线电技术, 自动检测周围无线电环境, 智能调整系统参数, 在不对原有业务用户造成干扰的前提下, 从时间、空间、频率等多维度利用空闲的频谱资源; 二是通过完善的数据库进行动态频谱共享, 通过查询数据库来获得一定区域内空闲频谱的情况, 从而使用相应频谱资源。

8 结束语

本文重点针对卫星互联网体系架构、业务特征建模、频谱共享下的星间同频干扰、低轨卫星波束成形和高轨卫星跳波束等内容展开了研究, 研究结果表明, 卫星互联网业务具有明显的空时分布不均特征, 且未来 NGSO 星座间同频干扰十分严重, 难以通过空间隔离来减缓干扰, 需要从系统设计和频率协调等方面开展工作以减缓干扰, 基于业务分布进行空域资源高效利用, 能够提升系统吞吐量。最后对卫星互联网未来可能的技术发展方向进行了探讨, 希望对相关人员的研究工作能够有所帮助。

参考文献:

- [1] 2020 年中国卫星应用十大事件[J]. 卫星应用, 2021(1): 20-22.
Top ten events of China's satellite applications in 2020[J]. Satellite Application, 2021(1): 20-22.
- [2] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.
SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of GEO and LEO broadband satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 505-510.
- [3] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [4] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [5] Federal Communication Commission. Sharing among NGSO FSS space stations[S]. Electronic Code of Federal Regulations, 2017, 47CFR 25.261.
- [6] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [7] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1155-1162.
ZOU M, ZHAO Z J, WEI F. Research on the development prospect of emerging low earth orbit satellite communication constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(12): 1155-1162.
- [8] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 29-35.
- [9] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 221-232.
- [10] DENG B Y, JIANG C X, YAO H P, et al. The next generation heterogeneous satellite communication networks: integration of resource management and deep reinforcement learning[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 105-111.
- [11] HU Y F, SHERIFF R E, DEL RE E, et al. Satellite-UMTS traffic dimensioning and resource management technique analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1329-1341.
- [12] Statistics Bureau of the people's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [13] HU X, LIU S J, WANG Y P, et al. Deep reinforcement learning-based beam Hopping algorithm in multibeam satellite systems[J]. IET Communications, 2019, 13(16): 2485-2491.
- [14] BUCH S D, BERA S C, SARKAR S. A novel random user generation technique for multibeam satellite applications[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 447-450.
- [15] 程一凡, 曲至诚, 张更新. 低轨卫星星座物联网业务量建模[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1050-1056.
CHENG Y F, QU Z C, ZHANG G X. Traffic modeling for low earth orbit satellite constellation Internet of Things[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(4): 1050-1056.
- [16] 秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 等. 基于铱星机会信号的定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1691-1699.
QIN H L, TAN Z Z, CONG L, et al. Positioning technology based on IRIDIUM signals of opportunity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1691-1699.
- [17] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(9): 833-840.
JIN J, LI Y Q, ZHANG C, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(9): 833-840.
- [18] SALARI A, SHIRVANIMOGHADDAM M, SHAHAB M B, et al. Clustering-based joint channel estimation and signal detection for grant-free NOMA[C]//2020 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

- [19] LI P X, HE Y Z, CUI G F, et al. Asynchronous cooperative aloha for multi-receiver satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1321-1324.
- [20] GAUDENZI R D, HERRERO O, ACAR G, et al. Asynchronous contention resolution diversity ALOHA: making CRDSA truly asynchronous[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6193-6206.
- [21] FENECH H, SONYA A, TOMATIS A, et al. Eutelsat quantum: a game changer[C]//33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition. Reston: AIAA, 2015, doi.org/10.2514/6.2015-4318.
- [22] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 21-26.
TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation for beam-hopping satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 21-26.
- [23] 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. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [24] CHEN S Z, SUN S H, XU G X, et al. Beam-space multiplexing: practice, theory, and trends, from 4G TD-LTE, 5G, to 6G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 162-172.

[作者简介]



张更新(1967-), 男, 浙江平湖人, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络等。

王运峰(1986-), 男, 山东滕州人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星通信、频谱感知、卫星互联网等。

丁晓进(1981-), 男, 江苏泰州人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为卫星通信、认知无线电、机器学习等。

洪涛(1982-), 男, 江苏扬州人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为卫星通信、波束成形、卫星物联网等。

刘子威(1989-), 男, 江苏南京人, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为卫星通信、干扰分析、多用户检测、自适应阵列处理、通信信号处理等。

张晨(1985-), 男, 安徽淮南人, 博士, 南京邮电大学高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化信息网络等。