

低轨高通量星座系统 波束设计方案研究

Research on Beam Design Scheme of Low Orbit High-throughput Constellation System

解宁宇¹,陈任翔¹,马广辉¹,杨波²(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007;2. 银河航天(北京)网络技术有限公司,北京 100000)

Xie Ningyu¹,Chen Renxiang¹,Ma Guanghui¹,Yang Bo²(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch,Zhengzhou 450007,China;2. Galaxyspace (Beijing) Internet Technology Company Limited,Beijing,100000,China)

摘要:

基于中国联通“空天地一体化”网络演进计划,低轨高通量星座系统及空地一体技术将是未来移动通信的重要研究方向。面向低轨高通量星座系统建设,首先对低轨高通量星座用户需求、波束特点、波束种类进行了分析,然后针对业务点波束进行设计,主要包括用户接入方案设计、频率选择、带宽选择,并通过链路预算验证了波束设计的可行性。

关键词:

高通量星座系统;低轨卫星;波束设计

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.01.010

文章编号:1007-3043(2023)01-0047-04

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Based on the China Unicom's "space-air-ground integration" network evolution plan, LEO Ka constellation system and its space-ground integration technology will be an important research content of the future mobile communication. Aiming at the construction of LEO high-throughput constellation system, it firstly analyzes the user requirements, beam characteristics and beam types of LEO high-throughput constellation, and then it designs for business spot beam, which mainly includes user access scheme design, frequency selection, bandwidth selection, and finally it verifies the feasibility of beam design through link budget.

Keywords:

High-throughput constellation system; LEO satellite; Beam design

引用格式:解宁宇,陈任翔,马广辉,等.低轨高通量星座系统波束设计方案研究[J].邮电设计技术,2023(1):47-50.

1 概述

信息通信技术领域正处于全面变革的关键时期。地面移动通信向着具有高速率、低延时和大规模接入等特征的6G时代大步迈进,目前技术已趋于成熟^[1]。与此同时,以低轨高通量宽带星座系统为代表的新兴

卫星互联网空间信息技术,也以全球、全程、泛在的宽带数据接入能力,成为重要发展方向之一^[2]。卫星互联网与地面5G的天地融合通信可以在不受地理条件限制的万物泛在互联中发挥不可替代的作用,并衍生出全新的天地融合通信应用场景,广泛服务于各类用户的通信需求^[3]。

基于中国联通“空天地一体化”网络演进计划,低轨高通量系统及其空地一体技术将是未来移动通信的重要研究内容^[4]。文章面向低轨高通量星座系统建设,结合某一具体应用场景,研究了以Ka频段为代表

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1807900),国家重点研发计划(2020YFB1807902)

收稿日期:2022-11-07

的低轨高通量星座系统波束设计方案, 为未来低轨高通量星座系统设计打下基础。

2 低轨高通量星座波束分析

2.1 用户需求分析

低轨高通量通信星座主要应用在三大领域、10个具体应用场景, 如图1所示。

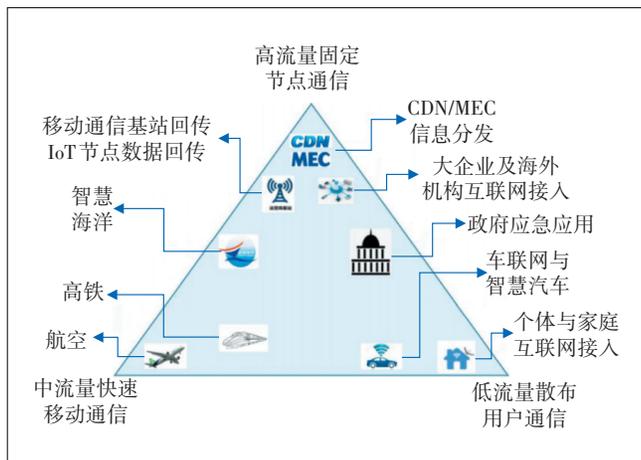


图1 低轨高通量星座应用场景

高流量固定节点通信主要包括内容分发网络(CDN)、边缘计算技术(MEC)信息分布、移动基站、物联网(IoT)节点数据回传, 大型企业和驻外机构的互联网接入等, 该类节点特征为固定使用、流量要求高, 多用于补充地面基础设施的不足^[5]。中流量快速移动通信主要包括航空、航海、高铁、无人机等, 应用场景大多是地面网络覆盖的盲区^[6]。低流量散布用户通信主要包括个体/家庭互联网接入、车联网和智慧汽车等, 用户分散、流量需求不大, 多用于基础设施不足地区, 此类散布的用户适合用卫星来保障^[7]。此外, 政府、应急通信和智慧海洋等应用兼有上述三大领域的应用特点。

2.2 高通量卫星波束特点分析

与传统卫星相比, 高通量卫星具有容量大、速率高、抗干扰性强等特点, 在网络通信延伸、骨干网络备份、边远地区覆盖、应急通信保障等方面发挥着不可替代的作用^[8]。

图2给出了以Ka频段为代表的高通量卫星波束与传统的卫星通信系统相比的特点。

a) 频带宽, 通信资源丰富。Ka频段工作范围为26.5~40 GHz, 可用带宽高达13 500 MHz, 远超C频段(3.95~8.2 GHz)和Ku频段(12.4~18.0 GHz)^[9]。通过波束多色复用技术, 可将通信可用频带扩展为58 968 MHz, 在相同编码调制方式下, 通信数据量是传统Ku频段通信系统的5倍以上^[10]。

b) 通信速率快。现有Ka频段卫星通信系统前向单载波传输速率可达到约150 Mbit/s, 回传单载波传输速率可达到约20 Mbit/s, 其用户端回传速率是传统Ku频段卫星通信系统速率的5~6倍, 极大地提升了系统的传输速率^[11]。

c) 点波束增益高, 信号质量好。现有C、Ku频段通信卫星, 采用赋形波束实现卫星信号的覆盖, 在卫星辐射能量一定的前提下, 各区域分得的信号能量值相对较小, 导致信号质量较弱^[12]。高通量卫星星座采用点波束实现通信区域的覆盖, 在卫星辐射能量相同的条件下, 所有信号能量都被分配到覆盖的点波束区域^[13]。

2.3 波束选型分析

卫星波束是指由卫星天线发射出来的电磁波在地球表面上形成的形状, 按照业务类型可分为发送控制指令的信令波束和发送业务数据的业务波束; 按照波束形状可分为全球波束、点形波束、赋形波束; 按照波束宽度可分为窄波束和宽广波束^[14]。低轨卫星波束设计必须考虑规避对静止轨道卫星(GSO)的干扰, 满足《无线电规则》22条的要求^[15]。结合低轨卫星星座的特性, 决定采用宽信令波束和业务点波束进行设

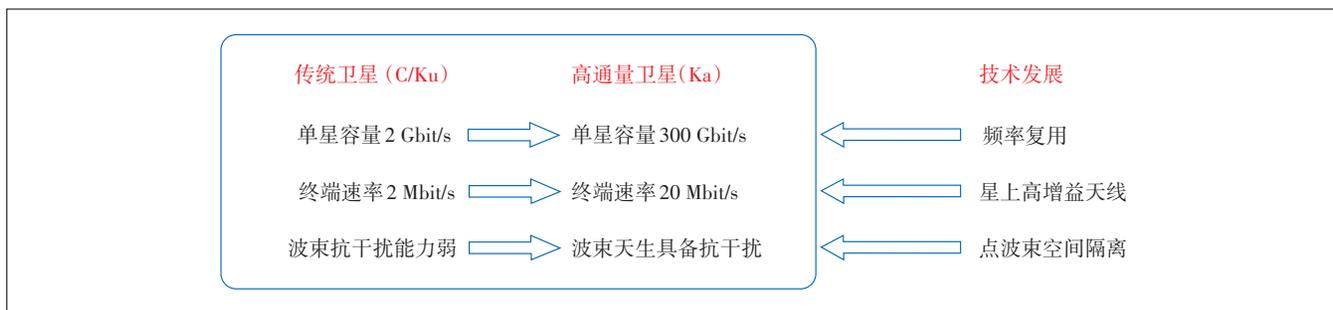


图2 高通量卫星波束特点

计,信令波束采用宽波束覆盖星下整个业务区,业务波束均采用动态点波束,信令波束和业务波束使用不同的频率,或采用码分,以下将重点针对业务点波束进行分析设计。

3 波束设计方案

3.1 用户接入方案

考虑到卫星和地面终端初始接入时相互扫描时间较长,该方案主要使用点波束凝视的方式服务于已知用户的应用场景,用户接入方案如下。

a) 地理位置已知的固定用户接入方法。对于需要服务且地理位置已知的固定用户,卫星使用动态点波束,凝视预定的服务区域,当一颗卫星移出用户可视区域时,用接续卫星进行覆盖,该区域的用户将始终有信号覆盖,终端需要接入时,使用预存的星历搜索卫星接入卫星系统^[16]。

b) 飞行或航行路线(包括时间信息)已知的移动用户接入方法。尽管移动用户的位置是移动的,但若知道其带有时间信息的飞行或航行路线,其地点可以预测,因此可以转化为位置固定用户的接入方式。根据移动用户的移动航迹的预知信息,卫星系统预测其服务的起始地点、时间和规划路线,调度卫星点波束在该时刻照射该区域,接下来接入方式同上。待接入后,卫星系统使用点波束跟踪该移动用户^[17]。

c) 地理位置和移动航迹均未知的用户接入方式。用户需要接入时,开机后根据预存的星历搜索卫星,但由于卫星波束和用户波束均为窄波束,相互搜索,接入时间与星历准确度密切相关且无法保障服务质量^[18]。

3.2 波束设计

本文结合星网公司公开资料及星网公司低轨卫星互联网星座需求进行波束设计分析。点业务波束要求其天线增益满足在 $\pm 53^\circ$ 覆盖区内大于13 dBi。选择多波束天线设计方案,即业务波束由 4×4 个波束进行蜂窝式覆盖,每个波束宽度为 26.8° ,波束边缘增益约为13 dBi。

a) 频率选择。目前高通量卫星多选用Ka频段,由于19.7~20.2 GHz频段没有下行APFD(NGSO上行干扰信号对GSO卫星的保护)限值要求,同时下行EPFD(NGSO下行干扰信号对GSO地球站的保护)限值比17.7~19.7 GHz低10 dB,因此信令波束频率选择19.7~20.2 GHz频段。

b) 带宽选择。考虑到Ka频段低轨星座的轨道高度和用户容量需求,单星采用14个信令波束来支持1400个激活用户并发接入系统,并支持共计1.4万个在网用户。单个信令波束约100 kbit/s的传输速率来保障100个激活用户的接入需求。考虑到用户终端性能,单个信令波束的上行带宽设计为5 MHz,在干扰可控的情况下可采用四色复用的方式分配14个波束的频点。信令波束使用频段:19 700~20 200 MHz。根据《无线电规则》22条的EPFD限值 $-154 \text{ dB(W/m}^2\text{)}@40 \text{ kHz}$,信令波束在覆盖边缘的天线增益为14 dBi,中间波束增益为20 dBi,并且中间波束的传播路径更短,因此,中间波束的功率及EIRP都需要比边缘波束低。

c) 链路预算分析。卫星链路预算方法有正推法、倒推法以及功带平衡法,其中正推法一般在发射站功放、接收站天线口径、调制方式、信息速率、前向纠错编码率、误码率要求、传播可用度等确定的情况下,逐步计算上、下行载噪比,推算出系统 E_b/N_0 。根据 E_b/N_0 余量情况调整功放实际发射功率、功率分配因子使系统余量达到设计使用要求。以下将通过正推法,在主机、端站设备确定的情况下,验证传播可用带宽选择是否能够满足系统 E_b/N_0 最低要求,正推法流程如图3所示。

分析低轨卫星互联网典型的便携移动站对通应用场景,接收天线口径为0.45 m,接收天线增益为35.84 dBi,采用链路预算正推法,输入业务波束相关参数,得出如表1所示的链路预算结果。

4 结论

由表1结果可知,为了满足单个波束的传输速率,以100 kHz带宽计算链路容量,对于0.45 m口径的终端,以仰角 25° 工作时, E_b/N_0 链路仍有1.73 dB余量,满足标准要求,此时波束的传输速率可达110 kbit/s。

业务波束采用信令点波束对星下业务区分时覆盖,采用自适应动态点波束技术,在有用户需求时,能够产生凝视用户的波束,凝视波束采用空间复用或时间/空间复用相结合的方式可同时服务于多个分散的区域,实现卫星服务能力与用户需求的灵活匹配。适合于“大分散、小集中”的用户地域分布特征,尤其适合于大容量2B业务。

参考文献:

[1] ITU. Attenuation by atmospheric gases and related effects; ITU-R

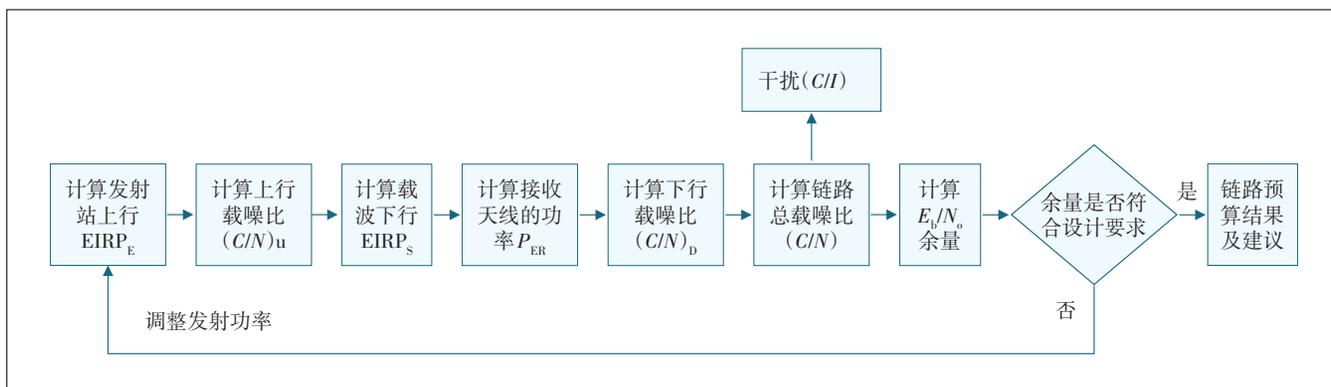


图3 正推法流程图

表1 业务波束链路预算

输入参数	输入值	输入参数	输入值
带宽/MHz	0.1	接收天线增益/dBi	35.84
发射功率/dBW	-14	频率/GHz	18.6
发射功率谱密度/(dBW/Hz)	-64	地球半径/km	6 371
发射天线效率	0.4	轨道高度/km	1 175
发射天线等效口径/m	0.04	地球站仰角/°	25
发射天线增益/dBi	14.07	覆盖张角/°	49.92
发射天线3 dB波束带宽/°	27.54	传播距离/km	2 165.69
发射链路损耗/dB	0	噪声温度/K	320
EIRP/dBW	0.07	噪声/(dBW/Hz)	-203.55
大气等链路损耗/dB	1	终端G/T/dBK	10.79
接收天线效率	0.5	传输损耗/dB	184.5
接收天线口径/m	0.45	接收功率/dBW	-149.59
调制	QPSK	滤波器滚降	0.1
输出参数	输出结果	输出参数	输出结果
E_b/N_0 /dB	3.96	EPFD门限/(dBW/m ² /MHz)	-150
E_b/N_0 要求/dB	2.23	超EPFD限值/dB	22.36
余量/dB	1.73	速率/(Mbit/s)	0.11
编码效率	3/5	PFDF/(dBW/m ² /MHz)	-127.64

P.676-12[S]. Geneva, Switzerland: ITU, 2019.

[2] ITU. Radio regulations[M]. Geneva, Switzerland: ITU, 2020.
 [3] 高贺,王玲,黄文德,等. 北斗全球卫星导航系统境外星数据快速回传的路由优化方法[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(2): 9-15.
 [4] FERREIRA P V R, PAFFENROTH R, WYGLINSKI A M, et al. Reinforcement learning for satellite communications: from LEO to deep space operations[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(5): 70-75.
 [5] DURAND F R, ABRÃO T. Power allocation in multibeam satellites based on particle swarm optimization[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2017, 78: 124-133.
 [6] IPPOLITO L J, Jr. Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design and system performance[M].

2nd ed. Chichester: Wiley, 2017.

[7] 叶磊. 基于波束跳变的地球同步轨道卫星网络管理策略研究[J]. 数字通信世界, 2021(3): 82-83.
 [8] 王怀, 彭兴会, 李凡. 低轨遥感卫星 Ka 频段捕获跟踪的设计及应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(4): 580-584.
 [9] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.
 [10] 汪春霆, 翟立君, 李宁, 等. 关于天地一体化信息网络典型应用示范的思考[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 36-42.
 [11] 王春锋. 卫星编队自主相对导航与通信一体化系统探讨[J]. 深空探测学报, 2017, 4(1): 38-42.
 [12] XIE R Q. LM-3B launches Tiantong 1 satellite[J]. Aerospace China, 2016, 17(3): 58.
 [13] 王敬超, 于全. 基于分布式星群的空间信息网络体系架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 9-13, 18.
 [14] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 161-176.
 [15] 郑亚军. OFDM 系统中用于抑制峰均功率比的受控修剪迭代算法研究[D]. 北京邮电大学, 2019.
 [16] XIA S Y, JIANG Q J, ZOU C, et al. Corrections to "beam coverage comparison of LEO satellite systems based on user diversification"[J]. IEEE Access, 2020, 8: 107314.
 [17] YANG Q, LAURENSEN D I, BARRIA J A. On the use of LEO satellite constellation for active network management in power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1371-1381.
 [18] BAHIA K, SUARDI S. The state of mobile Internet connectivity 2019 [R/OL]. [2022-09-28]. <https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2019/07/GSMA-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2019.pdf>.

作者简介:

解宁宇, 工程师, 主要从事卫星通信相关咨询、研究等工作; 陈任翔, 高级工程师, 主要从事无线通信网络规划、研究等工作; 马广辉, 高级工程师, 主要从事无线通信规划、设计等工作; 杨波, 高级工程师, 主要从事卫星通信研究工作。