

基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统设计

张晨^{1,2}, 张更新^{1,2}, 王显煜³

- (1. 南京邮电大学通信与网络技术国家工程研究中心, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;
3. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 跳波束技术为卫星资源的灵活分配和高效利用提供了实现基础, 被认为是新一代高通量卫星的关键技术。以业务驱动、资源高效利用、按需覆盖为目标, 从系统架构、通信体制、工作机理、资源分配和波束跳变图案设计、用户接入策略、空口协议设计和系统工作流程等维度, 自顶向下为基于跳波束的高通量卫星通信系统设计提供可行性方案、奠定技术基础, 可以满足天地一体化信息网络灵活机动的信息服务, 以及高可靠、大容量传输的天基骨干网需求。

关键词: 高通量卫星; 天地一体化信息网络; 跳波束; 系统设计

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020083

Design of next generation high throughput satellite communication system based on beam-hopping

ZHANG Chen^{1,2}, ZHANG Gengxin^{1,2}, WANG Xianyu³

1. National Engineering Research Center of Communication and Network Technology,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
3. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China

Abstract: Beam-hopping technology provides a basis for flexible allocation and efficient utilization of satellite resources, and it is considered as a key technology of the new generation of high-throughput satellite. With the goal of service-driven, efficient utilization of resources and on-demand coverage of hot spots area, from the aspects of system architecture, communication system, working mechanism, resource allocation method and beam-hopping pattern design, user access strategy, air interface protocol design and system workflow, a top-down feasibility and technical foundation was provided for the design of a new generation of high-throughput satellite communication system based on beam hopping. Finally, it meet the requirements of flexible and mobile information service for the space-earth integration network, as well as the demand of the space-based backbone network with high reliability and large capacity transmission.

Key words: high throughput satellite, space-earth integration network, beam-hopping, system design

1 引言

高通量卫星在天地一体化信息网络中充当了天基骨干网节点的重要角色^[1-2]。然而卫星终端用户

业务差异性大、类型和需求多样、时间和空间分布严重不均, 这对卫星网络的传输能力和资源的高效利用提出了很高的要求^[3]。但在传统的多波束高通量卫星通信系统中, 分配给每个波束的功率和频率

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61901230, No.91738201); 民用航天重点预研基金资助项目 (No.B0106)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61901230, No.91738201), Key Pre-Research Project for Civil Space Technology (No.B0106)

资源是固定不变的,且仅是全部卫星资源的一部分,系统往往只能在单个波束的局限下调配可用的资源,无疑将造成卫星资源的“碎片化”调度;更加严重的是,由于用户业务类型的多样性和差异性,业务分布的时变性和空间不均匀性,这种“碎片化”的资源配置方式将会导致各个波束基本处于“劳逸不均”“忙闲过度”的情况,造成通信资源的巨大浪费,也很难实现多样化业务的高效传输和热点区域的按需覆盖。

近年来,跳波束(BH, beam-hopping)技术的提出为卫星资源的灵活分配和高效利用提供了实现基础^[4]。其基本思想是利用时间分片技术,并不需要所有的波束都同时工作,而是只有其中的一部分波束按需工作,因此资源分配更加灵活。BH技术的提出引起了广大研究人员的广泛关注,被认为是高通量卫星向未来甚高通量卫星演进的关键技术。

目前,众多卫星制造商和运营商已经开始对BH技术进行实验验证,例如Spaceway3系列卫星、KONNECT-VHTS卫星等都搭载了跳波束实验模块^[5]。2019年发射的欧洲量子星是BH技术实验的里程碑,该型号卫星最大的特点是“有效载荷基于软件无线电通用硬件平台,卫星功能由软件来定义”,通过地面指令控制波束,同时通过软件定义覆盖区形状、方向,进而实现软件定义的覆盖时间、覆盖区域^[6]。

在理论和技术研究方面,文献[7]设计最优匹配业务需求的跳波束方案,以用户分布稀疏地区的宽带多媒体业务接入为系统场景,分析了跳波束技术对系统性能提升的效果。在此基础上,文献[8-9]给出了波束数目、业务需求和覆盖区域等系统参数对下行链路影响吞吐量的量化结果。文献[10]以欧洲宇航局给出的欧洲地区业务需求分布为标准,评估了Ka频段卫星中使用和不使用跳波束技术的系统性能对比。文献[11]从卫星载荷性能和资源灵活分配2个角度对跳波束技术带来的性能提升进行了详细的仿真分析。文献[12-16]分别提出了跳波束系统中资源分配的初步数学模型,利用启发式算法和迭代算法等优化方法,解决前向下行链路的资源优化问题。文献[17]结合了跳波束和认知无线电的思想,提出了一种认知跳波束卫星系统的设计方案,但实际应用还需进一步研究。

综上所述,跳波束技术的出现大幅度提高了卫星资源利用率,成为高通量卫星和未来甚高通量卫

星系统发展的必然趋势。然而天地一体化信息网络具有多业务融合传输、业务需求时间和空间不均匀性日益显著、业务变化动态性明显等特性,对跳波束技术的有效使用提出了更高的要求。而现有成果针对这个领域的研究还不充分,局限在单纯的算法研究、性能分析和设备研发上,很少从实际通信系统的角度出发,提出自顶向下、全方面、多维度切实可行的跳波束系统设计方案。

针对以上问题,本文以业务驱动、资源高效利用、热点区域按需覆盖为最终目标,系统阐述了基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统的设计思路和方法。重点研究和设计了业务驱动的空间信息网络通信体制和工作机理;面向资源全局调度,综合考虑波束间干扰的影响,提出了时间上的系统资源分配算法和空间上的波束跳跃图案优化方法;针对区域机动信息服务特点,研究不同场景下跳波束灵活接入策略;优化设计支持的跳波束业务帧和信令帧,兼容主流DVB-S2X/RCS2的空口协议,阐述了系统工作流程和分层渐进的同步策略。自顶向下为基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统设计提供了可行性方案,奠定了关键技术基础。最终满足天地一体化信息网络灵活机动的信息服务,以及高可靠、大容量传输的天基骨干网需求。

2 支持跳波束技术的卫星系统组成

支持跳波束的卫星系统由网络控制中心(NCC, network control center)、信关站(GW, gateway station)、配备灵活载荷的卫星和用户终端(UT, user terminal)组成,如图1所示。信关站到用户终端的前向链路采用兼容DVB-S2X协议^[18-19]的跳波束工作方式,将信关站的数据流以TDM(time division multiplexing)方式发送给卫星,通过卫星跳波束控制器将不同的数据流切换到不同的波束下。反向链路参考DVB-RCS2协议^[20-21],用户终端以MF-TDMA(multi-frequency time division multiple access)方式接入卫星,通过卫星透明转发到地面信关站或网络控制中心,建立用户终端与用户终端的通信链路,从而实现任意用户终端之间的互联。卫星系统主要组成部分及功能具体介绍如下。

1) 支持跳波束的灵活载荷卫星

有效载荷主要由透明转发器和跳波束控制器组成,通过多波束天线和用户通信。透明转发器完成信

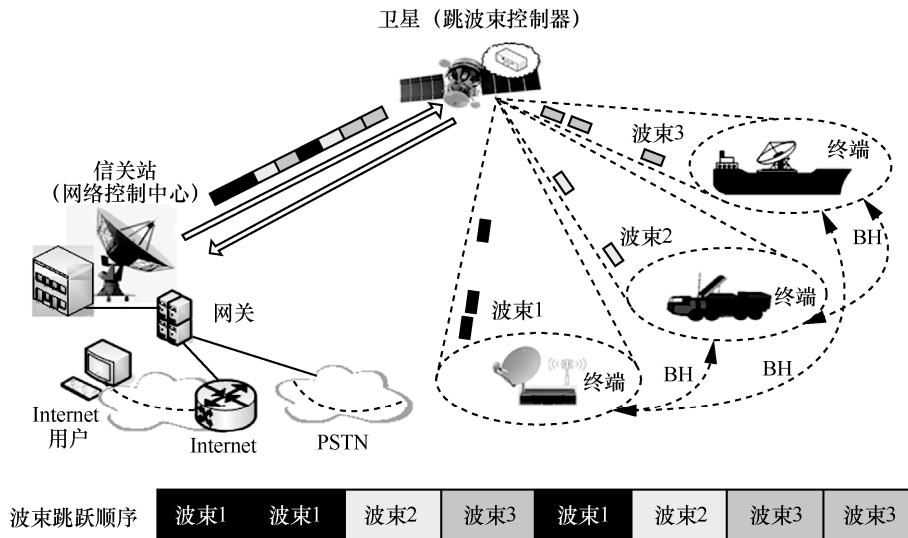


图1 系统组成

号的变频、放大和转发。跳波束控制器通过解调跳波束控制指令,实现卫星上波束的同步跳变^[22-23]。根据星载天线的不同,波束跳变的实现方案也不相同:采用单口径的阵列馈电反射面天线系统^[24],通过开关矩阵来实现波束的切换^[25];采用相控阵天线系统^[26-27],通过多端口放大器(MPA, multiport amplifier)联合波束成形网络实现波束的切换^[28],后者在波束间的功率和频谱分配上更加灵活。

2) 网络控制中心

网络控制中心负责管理整个卫星通信网络,主要的功能包括跳波束控制指令的生成、用户接入控制、资源分配与管理、用户信息管理、系统网络管理、系统业务统计、用户费用统计等。

网络控制中心根据各用户的业务需求进行时隙资源分配,生成跳波束时间计划表,如波束驻留时间、波束跳变周期、重访时间等,卫星的波束切换是根据跳波束时间计划表同步进行的^[28]。

3) 信关站

信关站主要提供与地面网络的接口,通过各种标准或专用的接口设备,提供与电话网,如 PSTN (public switched telephone network) 和 ISDN (integrated service digital network), 以及 Internet 等的接入与互联,为地面网络运营商提供接入平台。

为了充分利用带宽资源,实现大容量传输,跳波束系统的信关站及馈电链路一般支持 Q/V 频段。但 Q/V 频段雨衰较大,为确保业务的无损落地,可采用智能信关站的方案,即多个信关站通过地面通信系统互联,为馈电链路业务数据提供灵活的路

由。各信关站的位置较远,信道条件相对独立,可互为备份,同时为用户波束服务,实现站址分集。以上方案可结合自适应编码调制共同对抗恶劣的信道条件,确保业务的可靠传输。

另一方面,在系统同步上,跳波束系统中的信关站必须按照 NCC 下发的跳波束时间计划表,同步在馈电链路依次传输相应波束的业务。

4) 用户终端

终端中既有可单独进行通信的小型终端,也有和外部 Internet、PSTN 等相连的大型站,支持 Ku/Ka 等频段。

3 业务驱动的空间信息网络通信体制

3.1 基于“多波束+频率共享+多载波”的上行链路通信体制

传统多波束多载波卫星通信系统上行链路在支持空间信息网络多样化业务过程中面临着按波束进行“碎片化”频率配置造成的频率资源调度能力弱、空分频率复用导致机动终端跨波束切换时的短时通信中断、不同业务采用不同通信体制导致难以实现多业务融合传输等问题。针对以上问题,结合新一代高通量卫星通信网络用户差异大、业务多样化的特点,兼顾终端小型化需求,本文提出基于“多波束+频分复用+多载波”的上行链路通信体制,利用“多波束”解决用户对大容量、小型化的需求;利用“频分复用”有效解决各信道同频干扰的影响;利用“多载波”解决用户对不同组网应用模式和终端能力的需求,通

过基于多载波机制的多业务融合传输接入方法,实现面向多波束频分多址的频率时隙资源调度方法,在实现卫星资源充分利用的同时满足各类用户的按需接入需求。

采用“多波束+频分复用+多载波”这一体制后,对不同用户、不同业务的需求,可以通过对频率资源更加灵活的调度和优化配置满足业务对传输能力的要求。在该体制中,主要通过 4 种技术手段解决传统卫星通信体制中存在的资源“碎片化”现象以及对快速移动目标支持能力不强等问题,实现多业务的融合传输。

1) 多波束。通过多点波束实现对地面目标的覆盖,有效提高功率效率,同时通过空分频分复用提高频率利用效率,一定程度上满足高速通信对天线高增益和终端小型化的要求。

2) 频分复用。采用频分复用技术,在保证较高的频谱利用率的前提下,增加了各波束间的隔离度,降低了波束间的干扰。

3) 多载波。在每个波束内,各用户群根据需求分配不同的带宽,并通过多载波方式接入卫星,从而实现了一个波束内不同类型用户多样化业务的融合传输和按需接入,同时也利于满足终端小型化的需要。

4) 信道化。通过信道化技术解决各波束间的连通性、馈电链路带宽受限和噪声功率累加等问题。

3.2 基于“跳波束+时间分片+单载波”的下行链路通信体制

在传统多波束多载波卫星通信系统中,卫星的全部功率和频率资源通常是按照一定的规则分配给各个波束,每个波束只能使用卫星全部资源的一部分,造成资源分配的“碎片化”现象;同时,由于转发器通常工作在多载波模式,为使功放工作在线性区,需要进行功率回退,导致功率利用率的进一步下降。

针对以上问题,结合空间信息网络业务分布的时空不均匀性以及多载波工作时需要功率回退的特点,本文提出基于“跳波束+时间分片+单载波”的下行链路通信体制,利用“跳波束”实现功率和频率资源的按需集中解决业务分布的空间不均匀性问题,利用“时间分片”实现功率和频率资源的高效调度、解决业务分布的时间不均匀性问题,利用“单载波”实现对卫星功率资源的充分利用解决多种业务的融合传输问题,通过“时、空、频”三

维流程管理机制,建立卫星波束、功率、带宽、时隙等资源的控制调配工作流程,以实现资源的全局灵活调度,构建可“满功率、全带宽”运行的新一代大容量下行链路通信体制。

基于“跳波束+时间分片+单载波”的通信体制在保证波束间符合合同频干扰要求的条件下,将所有点波束动态划分为不同的波束簇。该通信体制具有以下 3 个方面的特点。

1) 跳波束。通过工作波束在多个波位或波束簇间的切换跳变对频率或功率进行灵活调度。每个波束簇中分别有一个工作波束在所管辖的多个波位上跳变,每簇平均分配卫星总带宽和总功率。在一个时间窗口内,每个波束簇内只有一个点波束工作,避免了波束簇内的同频干扰而使得每个波束都可以簇内“全频带、满功率”工作。

2) 时间分片。从时域上对卫星资源进行优化,将系统资源以时隙为单位分配给各个波束,这种灵活的分配方式可以满足各波束不同的业务需求。

3) 单载波。每个波束内单载波工作,各业务流分配不同的时隙进行传输,从而避免了功率回退,可以“满功率”工作。

4 基于时间分片的按需覆盖跳波束工作机理

4.1 波束跳变周期和波束驻留时间

波束跳变周期和波束驻留时间工作机制如图 2 所示,具体参数^[7]介绍如下。

1) 跳波束时隙 (BHS, beam hopping slot)。BHS 也称为波束驻留时间 (dwell time),指的是分配给一个波束的最小持续时间。根据 QoS 或者容量需求,可以决定分配给各波束相应的时隙个数。BHS 作为物理帧的时间载体,一般为毫秒量级。

2) 跳波束周期 (BHP, beam hop period)。BHP 指遍历一次所分配的 BHS 序列所需的时间。DVB-S2X 附录 E 中推荐的 BHP 包含 128 或 256 个 BHS。各波束分配的 BHS 个数,可由 4.2 节中的时隙分配算法得到,各波束所处的簇集合以及分配的 BHS 在跳波束周期中的顺序,可由 4.3 节的跳波束图案设计得到。

3) 时隙切换时间 (SS, slot switch)。SS 也称为保护时间,其物理意义是一个波束切换到另一个波束所需的时延,一般是微秒量级。切换可以在每个

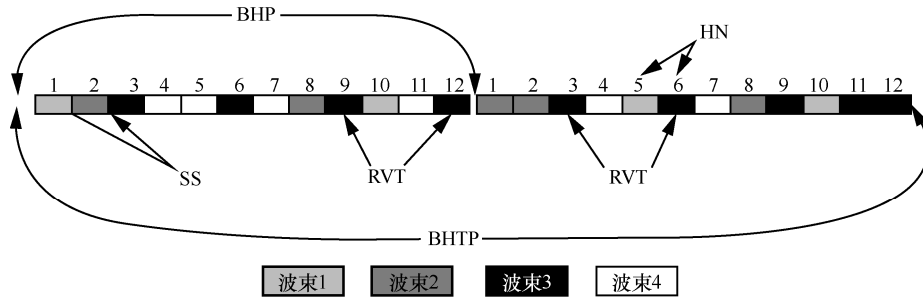


图 2 波束跳变周期和波束驻留时间工作机制

BHS 之后进行，也可以在多个 BHS（一个波束可能有多个 BHS）之后进行。一般在业务帧结尾处设置哑元符号块用于切换保护。

4) 波束重访时间。波束重访时间为某个波束所分配的 BHS 资源块之间的间隔时间。由于波束重访时间过大，会影响用户终端的同步，因此即使某个波束在特定的跳波束周期内无业务需求（非热点区域的波束），也应当在周期内分配一个 BHS，在该时隙中发送同步、广播等信令。

5) 跳序号 (HN, hop number)。HN 也可称为跳波束时隙序号。HN 是 BHS 的数字标识符，BHP 开始处的第一个 BHS 的 HN 值为 1；在每个 BHP 结束时，HN 重新初始化为 1；当与波束标识符成对使用时，HN 可用作唯一的标识符。

6) 跳波束时间计划 (BHTP, beam hopping time plan)。资源动态分配的时间分片传输计划，包括 BHS、BHP、各波束分配的 HN 序号和带宽、载波频率等参数。BHTP 要考虑用户申请、业务预测、业务感知、系统资源等综合因素，由 NCC 或服务提供商提前生成，并发送给卫星和地面系统。

4.2 基于业务需求的时隙分配算法

根据系统需求建立多样化的目标函数，以解决业务分布的时间和空间不均性以及业务需求的轻重缓急^[29]，同时高效利用“空、时、频、功率”多维资源^[30-31]，最大限度地满足用户的业务需求。因此，本文拟建立如下 3 种目标函数^[32-33]。

1) 公平目标函数

$$\begin{aligned} & \max_t \sum_{i=1}^K \frac{R_i(t)}{\hat{R}_i} \\ & \text{s.t. } R_i \leq \hat{R}_i \\ & P_{\text{sat}} \sum_{i=1}^K \mathbf{t}_i^T \mathbf{t}_i \leq P_{\text{tot}}, \quad |t_{ij}|^2 = \{0,1\}, \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (1)$$

2) 权重目标函数

$$\begin{aligned} & \max_t \sum_{i=1}^K \left(\frac{R_i(t)}{\hat{R}_i} \right)^{w_i} \\ & \text{s.t. } R_i \leq \hat{R}_i \\ & P_{\text{sat}} \sum_{i=1}^K \mathbf{t}_i^T \mathbf{t}_i \leq P_{\text{tot}}, \quad |t_{ij}|^2 = \{0,1\}, \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (2)$$

3) n 阶差分目标函数

$$\begin{aligned} & \min_t \sum_{i=1}^K |R_i - \hat{R}_i|^n \\ & \text{s.t. } R_i \leq \hat{R}_i \\ & P_{\text{sat}} \sum_{i=1}^K \mathbf{t}_i^T \mathbf{t}_i \leq P_{\text{tot}}, \quad |t_{ij}|^2 = \{0,1\}, \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (3)$$

其中， \hat{R}_i 和 R_i 分别为第 i 个波束所需的容量和通过跳波束资源分配后达到的实际容量；要求解的跳波束时隙分配矩阵的表达形式为 $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_N]^T$ ，其中 $\mathbf{t}_i^T = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{iN}]$ ， $t_{ij} = 1$ 表示第 i 个波束分配到了时隙 j ； P_{tot} 表示总的可用功率； P_{sat} 表示每个时隙内所能发送的饱和功率，取决于星上放大器性能。

各目标函数特性分析如下。在相同信道条件下，当系统波束业务请求较小时， n 阶差分目标函数会忽略这些请求较小的波束，而为高业务请求的波束分配更多的资源；而公平性目标函数则保证系统公平性，为高、低业务请求同样分配相应的资源。当信道条件发生变化时，公平性目标函数依然根据各波束的业务请求进行公平分配，保证每个波束业务请求的满足率相同；而 n 阶差分目标函数在信道条件的不同的情况时，系统信道条件好的波束比信道条件差的波束可以获得更多的容量。另一方面，权重目标函数可根据用户业务的轻重缓急，设置不同的权重值 w ，以满足应急通信、突发业务等重点用户的需求^[34]。因此需要根据系统场景和业务需

求，选取不同的目标函数。

针对以上多样化目标函数，总结本文作者之前已完成的工作^[35-36]，通过启发式混合优化算法来对问题进行求解。首先利用基于启发式的优化方法对可行域空间进行粗粒度搜索，采用强交互模式以确定最优解最可能出现的区域；然后利用基于凸优化单一解的优化方法对第一阶段的搜索结果进行精细搜索，通过对偶性分析与 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件，得出闭式解，从而确定各波束的时隙分配个数，具体求解过程参考文献[35-36]，本文不再赘述。

4.3 面向资源高效利用的跳波束图案设计

跳波束的图案设计主要包括跳波束簇集合设计和簇内波束跳跃图案设计。为了在共信道干扰避免与频带利用效率之间达成折中，将所有的波束进行分簇，在簇间进行部分频率复用以及簇间功率的优化，在簇内进行跳波束时隙分配，具体如下。

在跳波束簇间，采用频谱复用加极化复用的方法^[37]，如图 3 所示。其等效频谱复用因子为 3，假设系统总可用频带为 B_{tot} ，则分配给每个簇的频带

$$B_{cluster} = \frac{B_{tot}}{3}$$

在提高频谱资源利用率的同时，最大限度地避免簇间波束的同频干扰^[38]。

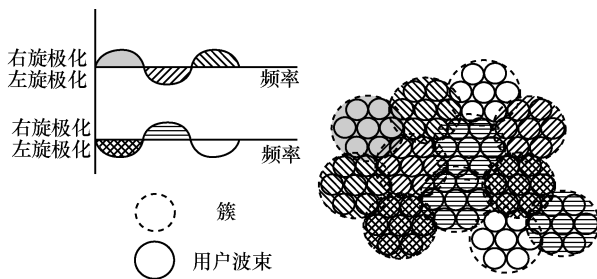


图 3 簇间正交频率复用方法

在跳波束簇的集合内，每个簇的特定时间期间，只有单个波束处于激活工作状态。也就是说，激活的波束在该时隙中可以使用分配给整个簇的功率和频带，也不存在簇内波束同频干扰的问题，与传统的多波束系统相比具有显著的优点；对于多个跳波束簇，可同时有不同簇的波束被激活，同时激活的波束数量取决于卫星的载荷能力。另一方面，仅有部分波束以规律的重复模式同时被激活，可以有效地减少卫星上放大器的数量^[39]。

簇内波束跳跃图案设计，实际上就是跳波束周期 BHP 内各波束的 BHS 的数量和排序问题。在某个跳波束周期内，簇内的波束根据是否有业务传输

的需求，分为热点区域波束和非热点区域波束。各波束的跳波束图案要遵循如下准则。

1) 热点区域波束。系统根据各用户的业务申请，依据跳波束资源分配算法，对热点区域的波束分配相应个数的 BHS，以完成业务服务。

2) 非热点区域的波束。要考虑波束重访时间的影响。这是因为当重访时间过大时，会影响用户终端的同步，所以即使非热点区域的波束在特定的跳波束周期内无业务需求，也应当在周期内至少分配一个 BHS，在该时隙中发送同步、广播等信令。

3) 热点区域波束的 BHS 和非热点区域的 BHS 可交替排序，使波束重访时间 T_{RV} 和终端用户同步的最大保持时间 T_D 之间，满足 $T_{RV} \leq T_D$ 。

4.4 仿真与分析

系统仿真参数如表 1 所示。

| 表 1 系统仿真参数 | | |
|-------------|------------|--------|
| 参数 | 符号 | 数值 |
| 标准 | — | DVB-S2 |
| 总波束数目/个 | K | 49 |
| 分簇数目/个 | N_b | 7 |
| 簇内波束数目/个 | M_c | 7 |
| 波束带宽/MHz | B_f | 200 |
| 总功率/W | P_{tot} | 200 |
| 跳波束周期时隙个数/个 | W | 128 |
| 单个时隙长度/ms | t | 50 |
| 下行链路频率/GHz | F | 20 |
| 波束覆盖半径/km | R_f | 262 |
| 卫星轨道高度/km | H | 35 786 |
| 自由空间损耗/dB | L_{free} | 212 |
| 天线传输增益/dB | G_t | 40 |
| 天线接收增益/dB | G_r | 50 |

假设各簇的平均雨衰值 $L_{rain} = [8.73, 4.03, 8.51, 3.95, 9.43, 4.80, 3.57]$ dB，且各波束的业务容量需求如表 2 所示。

| 表 2 各波束的业务容量需求 | |
|----------------|----------------------------------|
| 波束簇号 | 各波束容量需求/ (Mbit·s ⁻¹) |
| 1 | [21,32,26,17,57,35,82] |
| 2 | [32,21,34,38,65,42,68] |
| 3 | [20,26,46,55,36,86,61] |
| 4 | [32,37,28,49,70,53,91] |
| 5 | [37,21,51,68,75,61,77] |
| 6 | [24,32,60,56,65,76,107] |
| 7 | [37,55,25,62,91,75,105] |

图 4 给出了分别以公平目标函数和二阶差分目标函数，采用多维联合跳波束资源分配算法的系统容量仿真结果。由图 4 可知，本文提出的跳波束资源分配机制明显优于传统资源分配机制^[40]，并能随业务需求动态变化，一定程度上解决了业务需求的时间不均性。

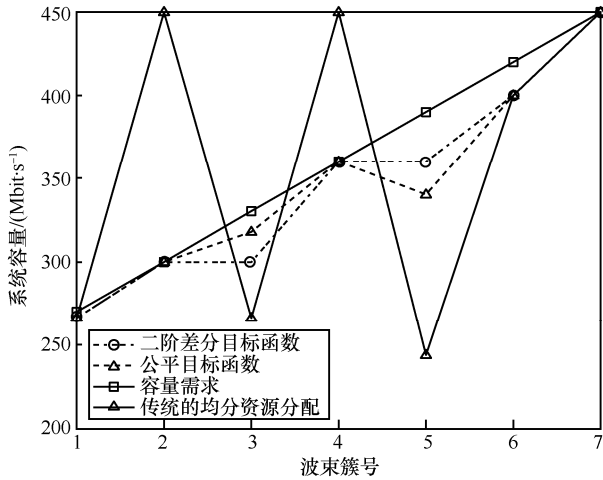


图 4 系统容量仿真结果

以第 7 簇为仿真场景，图 5 给出了以业务权重为目标函数的系统容量仿真。由图 5 可知，降低目标函数中某个用户业务的权重后，本文提出的资源分配算法能够有效地降低该用户的优先级，一定程度上解决了用户业务需求的多样性。

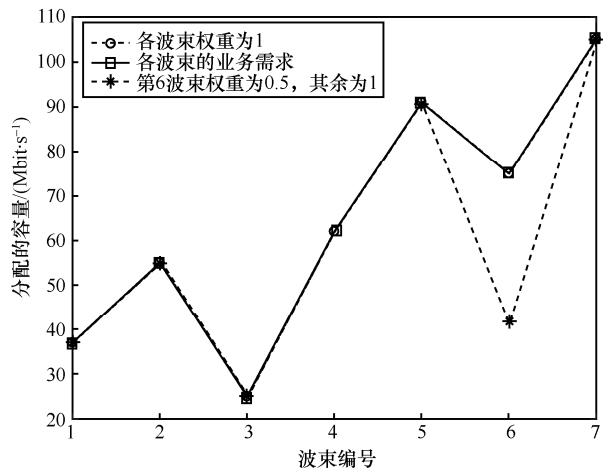


图 5 不同业务权重的波束系统容量

进一步引入性能评价参数，即业务未满足量 U_s

$$U_s = \hat{R}_i - \min(\hat{R}_i, R_i) \quad (4)$$

在系统资源受限的前提下， U_s 衡量了利用跳波束资源分配算法满足各用户业务需求的程度。图 6

给出了第 6 簇内各波束业务的未满足量。从图 6 中可以看出，跳波束资源分配算法有效地解决了各波束业务需求不均的情况。

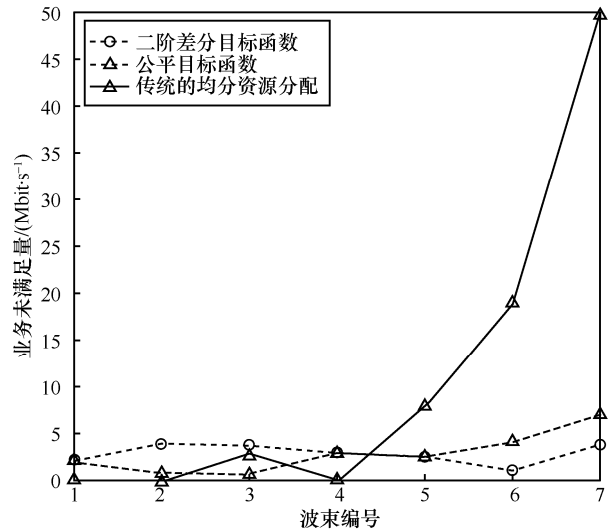


图 6 第 6 簇内各波束业务的未满足量

5 面向区域机动信息服务的随遇接入方法

根据第 3 节中新一代高通量卫星通信体制的设计，系统下行传输中采用“跳波束+时间分片+单载波”的通信体制，动态地调整波束跳变和时间分片划分的策略；上行传输中采用“多波束+频率共享+多载波”的通信体制，动态地调整不同用户的频带资源。因此，在区域机动信息服务的过程中，每个用户所能利用的波束、频率、时间资源是动态变化的，加上波束的跳跃，使用户的随遇接入成为系统设计中不可避免的关键问题。本文根据卫星载荷和场景需求的不同，分别提出 2 种用户接入策略，用于解决用户随遇接入的问题，并给出了境外业务不落地传输方案。

5.1 控制和业务相分离的接入策略

每个卫星节点配备 2 种类型的波束，覆盖范围广泛的全球控制波束和覆盖范围窄的业务点波束。其中，控制波束固定指向，采用传输速率低、可靠性高的波形；业务波束根据系统上下行通信体制，动态地调整波束间的资源，为用户提供高速的数据传输，如图 7 所示。

在控制波束和业务波束相分离的机制下，用户通过持续、广域覆盖的控制波束获取随遇接入的具体策略，然后通过高速动态业务波束获取相应的服务，系统的具体工作流程拟设计如下。

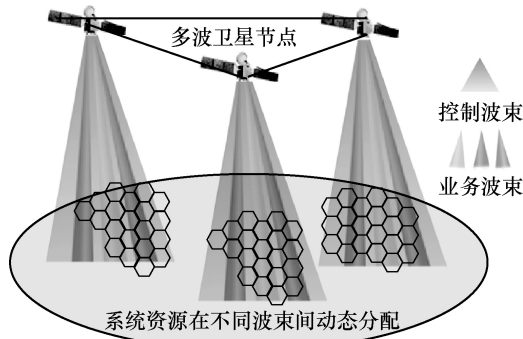


图 7 业务和控制波束相分离接入示意

步骤 1 用户处于控制波束的实时覆盖中,当需要进行传输时,通过控制波束申请与卫星节点建立连接。

步骤 2 系统收到申请后,执行仲裁,为用户在上行传输中分配频率资源,在下行传输中分配时隙资源。

步骤 3 卫星节点通过控制波束将系统资源分配情况分发给用户,包括同步信息、上行频段、带宽和下行跳波束方案、传输时隙等。

步骤 4 用户按照收到的信令信息在规定的频段和时隙进行业务传输。

步骤 5 用户完成业务传输,通过控制波束反馈完成信息。

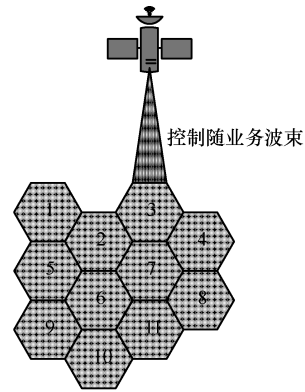
步骤 6 系统收到用户反馈的结束服务信息,释放在用户占用资源。

控制与业务波束相分离接入策略的优势是控制与业务基本独立工作,使跳波束的工作机制更加灵活,信令的交互和系统同步较简单;缺点是单独配置的广域覆盖业务波束会增加卫星载荷和终端设备量。

5.2 控制随业务波束的接入策略

在控制随业务波束的接入策略中,卫星载荷不需要额外配置覆盖范围广的全球控制波束,上下行控制信令随跳变的业务波束,完成同步、入网、系统广播、跳波束资源申请等功能,其工作流程增加了初始化轮询等步骤,如图 8 所示,具体介绍如下。

步骤 1 初始化轮询。由于没有配置广域覆盖的控制波束,基于跳波束的高通量卫星通信系统在首次对某个业务需求区域进行服务时,其业务波束要对各区域内的所有波位进行轮询。业务波束依次对每个波位进行跳跃轮询,每个波位的驻留时间相同;在各波位的驻留时间内,卫星通过下行链路完成系统信息广播、管理控制、信道分配及突发参数设置等控制信令;波束覆盖范围内的用户完成捕获、同步、资源申请等操作,与卫星及信关站建立连接。



初始化轮询阶段: 波束跳跃图案

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|

业务传输阶段: 假设热点区域波束编号为7和9的波束跳跃图案

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 7 | 9 | 9 | 2 | 3 | 7 | 9 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 | 9 | 9 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

图 8 控制随业务波束的接入示意

步骤 2 系统根据各用户的业务申请,对热点区域的波束进行资源分配和调配,设计相应的跳波束图案,最终生成当前服务周期的 BHTP。

步骤 3 卫星波束按照 BHTP 进行波位的跳跃,考虑到波束重访时间,如前文所述,波束要对热点区域波位和非热点区域波位交替进行跳跃切换。

步骤 4 热点区域的用户在波束驻留时间内,完成业务的传输,并且通过业务波束的上行链路完成下一个服务周期的业务申请。下行链路获取 BHTP 等资源分配表,完成系统同步等操作。非热点区域的用户在波束驻留时间内,仅进行下一个服务周期的资源申请、系统同步信令交互。

步骤 5 用户完成业务传输后,系统收到用户反馈的结束服务信息,释放在用户占用资源,并根据各波束业务的申请,生成下一个服务周期的 BHTP 等资源分配表。

由于控制随业务波束的接入策略不需要额外配置广域覆盖的控制波束,因此精简了系统的设备量;但控制与业务两者不独立,使跳波束的工作机制设计中必须考虑非热点波位的波束重访,系统同步的要求更高。

5.3 境外业务的不落地回传方案

随着我国国家战略的实施,迫切需要构建具有“安全、自主、可控”的跨地域、大容量的通信网络。对于境外高安全业务的不落地回传,本土的需求也越发强烈。我国天地一体化信息网络由若干颗高轨的 GEO (geostationary orbit) 高通量卫星节点(天基骨干网)、多颗中低轨的 N GEO (nonstationary orbit) 卫星节点(天基接入网)和地基节点网组成。高轨卫星

之间、高低轨卫星之间均配有星间链路，通过激光或者 Q/V 频段微波进行通信。因此当某颗高通量 GEO 卫星部署在国土不可见的轨道位置上时，对于实时业务，可由多颗 GEO 高通量卫星通过高轨之间的星间链路中继转发回本土；对于非实时业务，可将业务数据通过高低轨之间的星间链路，由 GEO 高通量卫星转发给中低轨 NGSO 卫星暂存，等到 NGSO 卫星运行到本土上空再传回给地基节点。以上 2 种回传方案均保证了境外高安全业务的不落地传输。

6 支持跳波束技术的空口协议设计

本文针对跳波束技术时间不连续的特点，在 DVB-S2X 协议的基础上，对下行业务帧进行优化设计。针对跳波束技术需要信关站、卫星控制器、终端三者同步进行波束切换的特点，在兼容 DVB-RCS2 协议的基础上，本文增加下行 BHTP 信令，并阐述了其详细设计方案。

6.1 业务帧及超帧的优化设计

图 9 给出了下行数据业务物理帧的组帧过程，所有业务数据打包为 2 340 B 长度的数据分组，参照 DVB-S2X 协议^[19]推荐的编码策略，分别以 BCH (18 528, 18 720) 和 13/45 速率的低密度奇偶校验 (LDPC, low density parity check) (64 800, 18 528) 编码作为外码和内码。

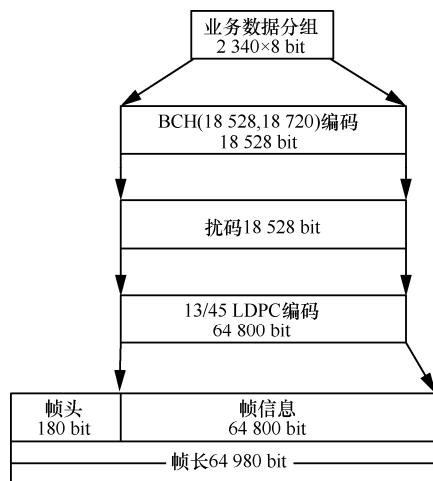


图 9 用户下行业务载波组帧形成流程

物理帧帧头由 54 bit 的正交 Walsh-Hadamard 码元和 128 bit 的物理层信令码元组成，分别用来进行物理层接收同步，以及 MODCOD、帧长度、导频块的有无等信令信息。

为支持跳波束技术，适应时间分片的不连续特点，DVB-2SX 协议引入超帧 (SF, super frame) 概念^[41]。一个超帧可容纳多个物理层帧，其构架如图 10 所示。

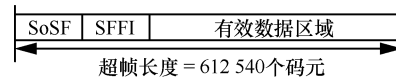


图 10 超帧构架

超帧的提出对支持跳波束的高通量卫星宽带空口协议和波形设计有重要意义，但 DVB-S2X 协议仅提供了一个概念性参考^[42]，实际应用超帧结构还存在以下问题。

- 1) 超帧长度远大于物理层帧，增大帧长能够提高传输效率，但是过长的超帧会给同步带来难度^[43]。
- 2) 时间分片的波束切换是跳波束技术的核心，但波束切换不可避免地带来切换时延，如何避免切换时延对数据传输造成的影响，是超帧设计亟待解决的问题。

为解决以上问题，在兼容 DVB-S2X 协议的基础上，本文对超帧结构进行优化设计。首先将物理层业务帧按照每 90 个符号划分为一个容量单元 (CU, capacity unit)，每 16 个单元插入一个导频块，解决了同步问题；然后在帧头中插入 TDM 帧信息，包括波束簇号、波束编号、BHS 号、超帧号；最后还需在超帧结尾插入哑元符号块，用于解决切换时延问题。图 11 是优化后的超帧结构及其与物理层帧的对应关系。

各部分的物理意义介绍如下。

- 1) SoSF (start of SF)。由 270 个正交 Walsh-Hadamard 码元组成，用于检测和同步超帧，同时标志着超帧开始。

- 2) SFFI (SF format indicator)。由 450 个码元组成，用来指示超帧种类、波束簇号、波束编号、BHS

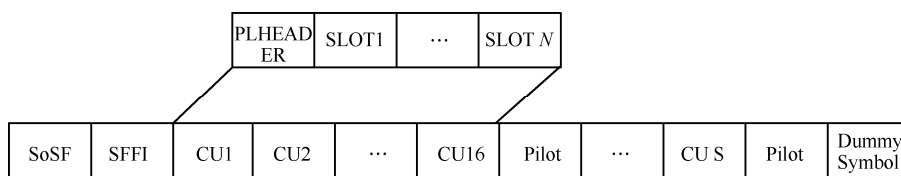


图 11 优化后的超帧结构及其与物理层帧的对应关系

号、超帧号等信令信息。

3) 有效数据区域。共 611 820 个码元，作为物理层帧的载体，每 90 个码元划分为一个 CU。

4) Pilot。导频块，由 36 个码元组成，每 16 个容量单元插入一个导频块^[44]，用于解决同步问题。

5) Dummy Symbol。哑元符号，一般在超帧结尾插入哑元符号块^[45]，用于解决切换时延问题。

为了兼容 DVB-S2X 协议，适应跳波束的特点，超帧的构架还需遵守如下准则。

1) 所有类型的超帧结构保持一致，长度固定为 612 540 个码元（DVB-S2X 协议推荐的固定长度）。相同的结构和固定的长度既能够兼容 DVB-S2X 协议，又能辅助接收端进行检测和同步。

2) 为了避免突发错误和同频干扰，对于超帧的帧头（SoSF+SFFI）和数据区域，可以分别选择不同的方法进行加扰，且波束之间的加扰序列不同。

3) 哑元符号块会影响业务帧信息的传输效率，因此连续多个超帧服务同一波束不需要在结尾处插入哑元符号，只有当该超帧结束之后进行波束切换，才必须插入哑元符号块。哑元符号长度与码元速率、波束切换开关时延、时隙切换时间的关系为 $\text{时隙切换时间} \geq \frac{\text{哑元符号长度}}{\text{码元速率}} \geq \text{波束切换开关时延}$ 。

据此，可设计哑元符号长度，避免长度冗余造成的传输效率降低。

6.2 信令帧的优化设计

下行的 BHTP 信令承载了系统对用户的跳波束时隙资源分配情况，同时卫星也利用此信令进行波束的同步切换。本文设计的 BHTP 帧格式如图 12 所示。

1) 组 ID。8 bit 字段，用于表示用户终端所属的用户组的 ID，对应于波位号。

2) 信道 ID。4 bit 字段，在簇间频率复用的情况下，用于表示用户站所分配的信道 ID。

3) 跳波束周期长度。4 bit 字段，用于表示系统的跳波束周期长度。

4) 跳波束周期序号。4 bit 字段，用于表示当前服务的跳波束周期序号。

5) 时隙长度。4 bit 字段，用于表示单个时隙（BHS）的时隙长度。

6) 分配时隙数。8 bit 字段，用于表示用户/波束在该周期内分配的时隙总个数。

7) 跳波束时隙序号。864 bit 字段，用于表示该用户/波束所分配的各个时隙在跳波束周期内所处的位置顺序信息，即 HN 信息。

图 13 给出了跳波束下行信令的组帧过程，包括 BHTP 在内的所有信令信息打包为 896 bit（112 B）长度的数据分组，参考 DVB-S2X 协议^[19]推荐的编码策略，可分别选取 BCH（1 024, 896）作为外码和 4/5 速率的 LDPC（1 280, 1 024）作为内码，经过 8 bit CRC 后，再加上 SoSF 和 SFFI 成为完整的信令帧。

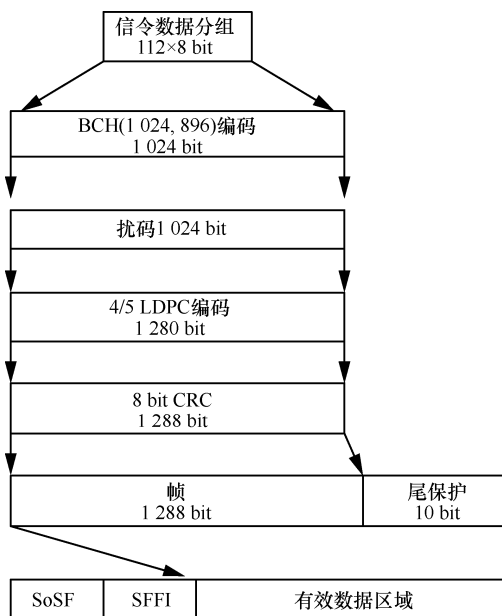


图 13 用户下行信令帧组帧形成流程

从图 13 中可以看出，信令帧不再额外配置物理层帧头，以减小冗余开销。更重要的是，信令帧与业务超帧结构类似，有利于终端捕获和同步。

BHTP 信令是基于跳波束的新一代高通量卫星空口协议设计中最重要的一部分，具体表现如下。

1) NCC 通过业务感知预测结果和来自用户的业务申请，利用基于跳波束的资源分配算法，设计

| | | | | | | |
|--------------|---------------|------------------|------------------|---------------|----------------|--------------------|
| 组ID 8 bit | 信道ID 4 bit | 跳波束周期长度 4 bit | 跳波束周期序号 4 bit | 时隙长度 4 bit | 分配时隙数 8 bit | 跳波束时隙序号 864 bit |
| 共 896 bit | | | | | | |

图 12 优化后的信令帧构架

跳波束图案,从而生成下一服务周期的 BHTP 信令,通过信关站发出。

2) 卫星解调 BHTP 信令,并转换成波束切换开关的控制命令,在下一服务周期内进行波束切换。

3) 终端接收卫星转发下来的 BHTP 信令,解析出下一服务周期内 NCC 为其分配的跳波束时隙、频率信息,在下一服务周期到来后,在指定波束驻留时间内完成通信。

6.3 系统工作流程和同步机制

在新一代的高通量卫星通信系统中,基于跳波束和时间分片的通信模式有别于已存在的体制,其工作模式和流程也有所不同。本文针对空间信息网络的多样化业务模型,基于跳波束和时间分片的信息业务流程,设计一系列包含波束、频率、时隙等资源的控制、调配的工作流程,保证各类用户能以最适当的方式接入空间信息网络,实现最优化的信息服务。

如图 14 所示,根据系统的架构及通信体制设计,系统主要分为以下几个工作步骤。

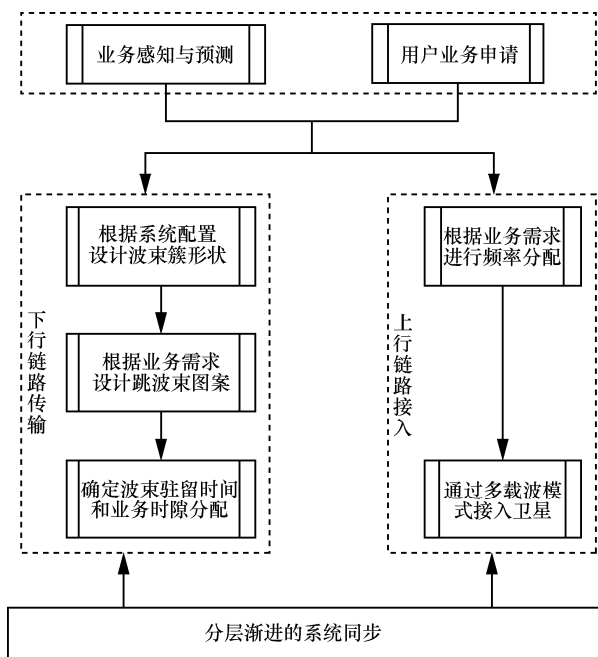


图 14 系统工作步骤

1) 业务感知与预测。系统利用控制信道对用户业务类型、业务量进行采集和统计分析,并对即将到来的业务的类型和流量进行预测;系统将根据业务感知预测结果和来自用户的业务申请,对资源进行调度和分配。

2) 下行链路传输。首先根据系统配置设计波

束簇形状,然后根据业务感知预测结果和用户申请状况设计跳波束图案,并确定波束驻留时间和波束内的业务时隙分配,实现多种业务的高效融合传输。

3) 上行链路接入。系统工作过程中需要根据业务分布、用户需求,在上行链路接入中动态调整不同用户的频带资源,共享同一频率资源池,保证频率资源的有限分配和共享,解决高速运动节点频繁的波束切换问题,实现多业务的融合传输;然后承载各种业务的终端设备通过多载波模式共同接入卫星。

4) 系统同步。整个系统是基于业务特征、采用时间分片方式实现波束资源的灵活调度和用户的自适应传输,因此必须做到信关站、卫星、终端三者同步,才能实现波束的跳变,保证该技术的工程可行性。同时由于系统采用“跳波束”的工作模式,用户与卫星不具备持续连通的下行通道,因此除了常规的 TDM 系统同步技术外,系统还采用了多种方法和措施,从多个层次保证了保证全网的时间同步和用户的高效接入。综合前文,具体措施如下。

1) 在业务帧层面上,为避免超帧长度较长带来的同步困难问题,在数据字段周期性的插入导频块,辅助终端进行同步,如前文所述。

2) 在链路层面上,由于控制信令与业务超帧的帧头结构相同,但长度大大缩短,因此可利用控制信令引导业务载波快速同步,具体如下。

①在控制与业务相分离的接入策略中,控制波束的信号由全球波束播发,因而用户终端可以持续接收控制波束信号,并完成对其载波的捕获、跟踪。当用户终端接收到业务信号后,控制波束信号载波同步环路的跟踪频率可牵引业务信号的跟踪环路,完成业务信号的载波快速同步。

②在控制随业务波束的接入策略中,通过设计跳波束图案中的波束重访时间,使无业务需求非热点区域的用户也能周期性地与系统进行信令交互,进而完成用户终端的同步,待有业务传输时,能够快速地进行载波同步。

3) 在系统层面上,信关站、卫星、终端三者都严格按照 NCC 生成的 BHTP 跳波束时间计划表进行工作:信关站按照 BHTP 信令在馈电链路依次传输相应波束的业务,卫星解析 BHTP 信令完成波束的同步切换,用户终端遵循 BHTP 信令在指定时隙

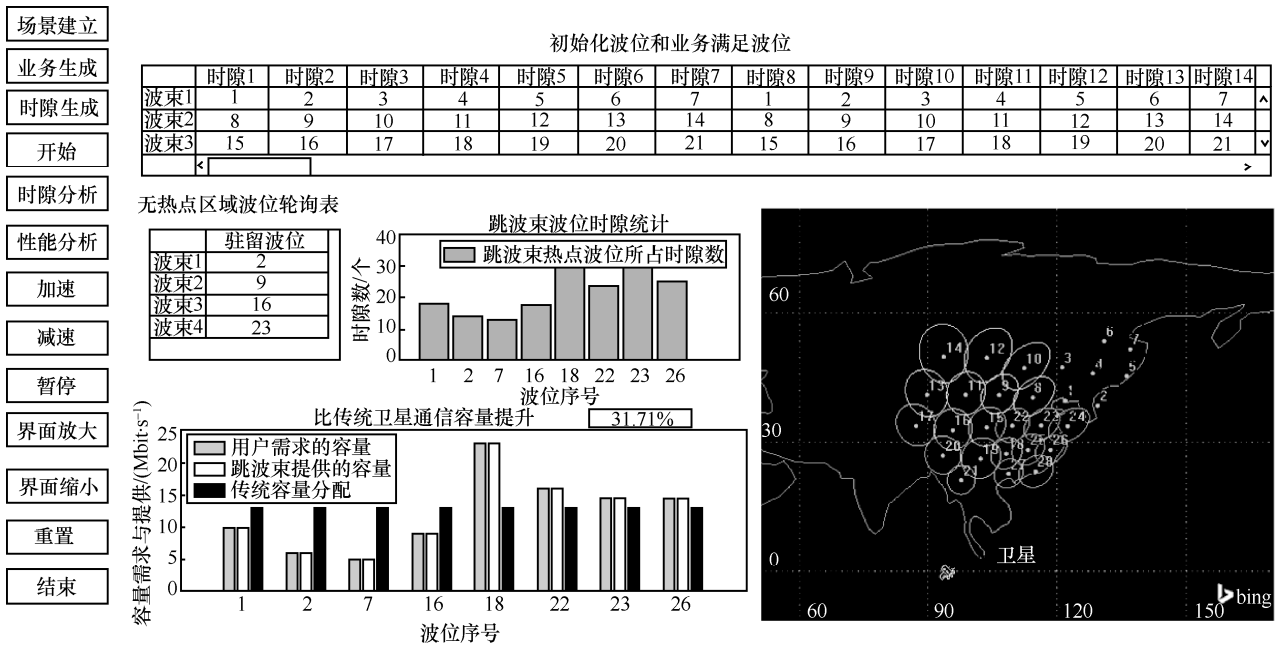


图 15 软件验证平台

内完成业务的收发。

6.4 基于 STK+MATLAB 的软件验证平台

为了评估本文提出的系统构架和空口协议设计在典型场景中的性能，本文采用 STK+MATLAB 构建跳波束系统演示验证软件平台，如图 15 所示。利用 MATLAB 完成业务生成、跳波束时隙计划生成、控制信令交互、业务帧仿真、系统同步、容量分析等；利用 STK 完成跳波束场景生成、波位规划、态势生成及波束跳跃的展示。该验证平台支持波束构型的选择，以及分簇数目、波束数目、跳波束周期长度、单个跳波束时隙长度、调制编码方式等参数的设置，可以显示业务量满足程度、跳波束时间计划表、各波束时隙分配统计、当前波束覆盖波位等。结果表明，本文提出的跳波束系统构架和空口协议设计能够满足天地一体化信息网络灵活机动的信息服务，以及高可靠、大容量传输的天基骨干网需求。

图 16 给出了采用本文提出的空口协议和工作流程下的系统业务容量满足情况，其中终端同步时间 $T_s=100\text{ ms}$ ，终端同步最大保持时间 $T_D=900\text{ ms}$ ，跳波束时隙 $t=80\text{ ms}$ ，跳波束周期时隙个数 $W=256$ ，其他仿真参数如表 1 所示。从图 16 可以看出，采用本文提出的波束重访机制的跳波束系统相比于无重访机制的跳波束系统，能够更好地满足各波束不同的业务需求。

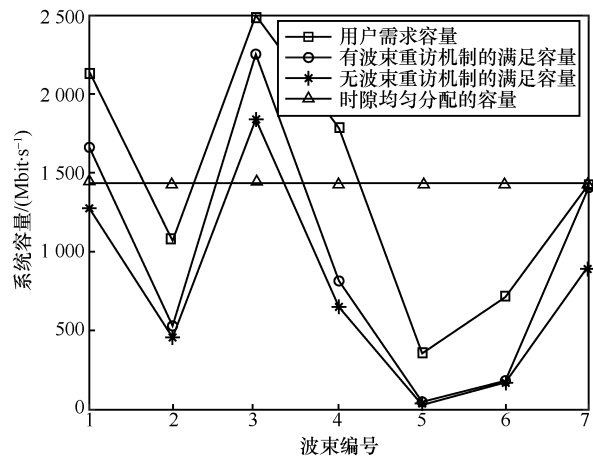


图 16 系统业务容量仿真

7 结束语

跳波束技术作为高通量卫星向未来甚高通量卫星演进的关键技术，为卫星资源的灵活分配和高效利用提供了实现基础。本文从系统构架、通信体制、资源分配方法和跳变图案设计、用户接入策略、空口协议设计和系统工作流程等方面，系统地阐述了基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统的设计思路 and 关键技术。重点研究和设计了业务驱动的空间信息网络通信体制和工作机理；面向资源全局调度，综合考虑波束间干扰的影响，提出了时间上的系统资源分配算法和空间上的波束跳跃图案优

化方法; 针对区域机动信息服务特点, 研究不同场景下跳波束灵活接入策略; 优化设计支持的跳波束空口协议, 阐述了系统工作流程和分层渐进的同步策略。为基于跳波束的新一代高通量卫星通信系统设计提供了可行性方案, 奠定了技术基础, 满足了业务驱动、资源高效利用、热点区域按需覆盖的天地一体化信息网络需求。

参考文献:

- [1] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016, 3: 30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. The architecture of the integrated space-terrestrial information network[J]. Satellite and Network, 2016, 3: 30-36.
- [2] 张乃通, 赵康健, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230.
ZHANG N T, ZHAO K L, LIU G L. Thought on constructing the integrated space-terrestrial information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.
- [3] 王睿, 韩笑冬, 王超, 等. 天基信息网络资源调度与协同管理[J]. 通信学报, 2017, 38(Z1): 104-109.
WANG R, HAN X D, WANG C, et al. Resources scheduling and cooperative management of space-based information networks[J]. Journal on Communications, 2017, 38(Z1): 104-109.
- [4] ROSSI T, SANCTIS M D, CIANCA E C, et al. Future space-based communications infrastructures based on high throughput satellites and software defined networking[C]//International Symposium on Systems Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2015: 332-337.
- [5] WHITEFIELD D, GOPAL R, ARNOLD S. Spaceway now and in the future: on-board IP packet switching satellite communication network[C]//IEEE Conference on Military Communications. Piscataway: IEEE Press, 2006: 184-190.
- [6] FENECH H, AMOS A, TOMATIS A, et al. Eutelsat quantum: a game changer[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition. Palo Alto: AIAA Press, 2013: 1-10.
- [7] PANTHI S, MCLAIN C, KING J. Beam hopping – a flexible satellite communication system for mobility[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Palo Alto: AIAA Press, 2017: 1-10.
- [8] FENECH H, AMOS S, TOMATIS A, et al. High throughput satellite systems: an analytical approach[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 192-202.
- [9] SERRANO-VELARDE D, LANCE E, FENECH H, et al. Novel dimensioning method for high-throughput satellites: forward link[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3): 2146-2163.
- [10] MAUFROID X, RINALDO R, CASALEIZ R. Benefits of beam hopping techniques in future multi-beam broadband satellite networks[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Palo Alto: AIAA Press, 2005: 1-5.
- [11] ANGELETTI P, PRIM F D, RINALDO R. Beam hopping in multi-Beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Palo Alto: AIAA Press, 2006: 1-10.
- [12] ANZALCHI J, COUCHMAN A, TOPPING C, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.
- [13] LEI J, HAN Z, VÁZQUEZ-CASTRO M A, et al. Secure satellite communication systems design with individual secrecy rate constraints[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 661-671.
- [14] HAN H, ZHENG X, HUANG Q, et al. QoS-equilibrium slot allocation for beam hopping in broadband satellite communication systems[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8): 2617-2630.
- [15] MOKHTAR A, AZIZOGLU M. On the downlink throughput of a broadband leo satellite network with hopping beams[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(12): 390-393.
- [16] ALEGRE, ALAGHA R. Heuristic algorithms for flexible resource allocation in beam hopping multi-beam satellite systems[C]//AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Palo Alto: AIAA Press, 2011: 1-15.
- [17] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B, et al. Cognitive beamhopping for spectral coexistence of multibeam satellites[C]//Future Network and Mobile Summit. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [18] Digital Video Broadcasting (DVB). Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 1: DVB-S2[S]. ETSI EN 302 307-1 V1.4.1, 2014.
- [19] Digital Video Broadcasting (DVB). Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 2: DVB-S2 Extension[S]. ETSI EN 302 307-2, 2014.
- [20] Digital Video Broadcasting (DVB). Interaction channel for satellite distribution systems[S]. ETSI EN 301 790 V1.5.1, 2009.
- [21] Digital Video Broadcasting (DVB). Second generation DVB interactive satellite system (DVB-RCS2) part 2: lower layers for satellite standard[S]. ETSI EN 301 545-2, 2017.
- [22] FANG R J F. Broadband IP transmission over spaceway satellite on-board processing and switching[C]//Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [23] KYRGAZOS A, EVANS B, THOMPSON P. Smart gateways designs with time switched feeders and beam hopping user links[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the Signal Processing for Space Communication Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [24] PECORELLA T, FANTACCI R, LASAGNA C, et al. Study and implementation of switching and beam-hopping techniques in satellites with on board processing[C]//IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 206-210.
- [25] FONSECA N J G, SOMBRIN J. Multi-beam reflector antenna system combining beam hopping and size reduction of effectively used spots[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 88-89.
- [26] FREEDMAN J B, MARSHACK D S, KAPLAN T, et al. Advantages and capabilities of a beamforming satellite[C]//32nd AIAA Interna-

- tional Communications Satellite Systems Conference. Palo Alto: AAAI Press, 2014: 1-7.
- [27] FENECH H, AMOS S, WATERFIELD. The role of array antennas in commercial telecommunication satellites[C]//10th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [28] MORRIS I, HINDS J W. Airbus defense and space: Ku band multiport amplifier powers hts payloads into the future[C]//AIAA International Communications Satellite System Conference. Palo Alto: AAAI Press, 2015:1-4.
- [29] ROUMELIOTIS A J, KOUROGIORGAS C I, PANAGOPOULOS A D. Optimal dynamic capacity allocation for high throughput satellite communications systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 596-599.
- [30] LEI J, CASTRO M A V. Frequency and time- space duality study for multibeam satellite communications[C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 56-61.
- [31] 冯琦, 李广侠, 冯少栋. 宽带多媒体卫星通信系统“跳波束”技术研究[C]//卫星通信学术年会. 2012: 193-200.
FENG Q, LI G X, FENG S D. The beam hopping technology for multi-beam broadband satellite systems[C]//Satellite Communications Academic Annual Meeting. 2012: 193-200.
- [32] ALBERTI X, CEBRIAN J M, BIANCO A D, et al. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multi-media satellite systems[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 226-233.
- [33] ALEGRE-GODOY R, ALAGHA N, VAZQUEZ- CASTRO M A. Offered capacity optimization mechanisms for multi-beam satellite systems[C]// International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 3180-3184.
- [34] 贾敏, 敬晓晔, 刘晓烽, 等. 基于业务优先级的认知卫星网络频谱分配方法[J]. 通信学报, 2019, 40(4): 140-148.
JIA M, JING X Y, LIU X F, et al. Spectrum allocation method for cognitive satellite network based on service priorities[J]. Journal on Communications, 2019, 40(4): 140-148.
- [35] WANG L, ZHANG C, QU D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]//International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [36] 王琳, 张晨, 王显煜, 等. 基于多波束卫星系统的跳波束技术研究[J]. 南京邮电大学学报, 2019, 39(3): 25-30.
WANG L, ZHANG C, WANG X Y, et al. Research of beam-hopping technology based on multi-beam satellite system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019, 39(3): 25-30.
- [37] SHI S C, LI G X, LI Z Q, et al. Joint power and bandwidth allocation for beam-hopping user downlinks in smart gateway multibeam satellite systems[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(5): 33-44.
- [38] CAINI C, CORAZZA G E, FALCIASECCA G, et al. A spectrum- and power-efficient ehf mobile satellite system to be integrated with terrestrial cellular systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 10(8): 1315-1325.
- [39] ANZALCHI J, COUCHMAN A, TOPPING C, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 70-82.
- [40] LEI J, VAZQUEZ-CASTRO M A. Multibeam satellite frequency time duality study and capacity optimization[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(5): 472-480.
- [41] ROHDEL C, ALAGHA N, GAUDENZI R D, et al. Super-framing: a powerful physical layer frame structure for next generation satellite broadband systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2016, 6(34): 413-438.
- [42] ROHDE C, STADALI H, PEREZ-TRUFERO J, et al. Implementation of DVB-S2X super-frame format 4 for wideband transmission[C]//EAI International Conference on Wireless and Satellite Systems. Berlin: Springer, 2015: 1-5.
- [43] MAZZALI N, BOUMARD S, KINNUNEN J, et al. Enhancing mobile services with DVB-S2X superframing[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2018, 36(6): 503-527.
- [44] ANDRENACCI S, CHATZINOTAS S, VANELLI-CORA LLI A, et al. Exploiting orthogonality in DVB-S2X through timing pre-compensation[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [45] MERIC H, LESTHIEVENT G. On the use of dummy frames for receiver synchronization in a DVB-S2(X) beam hopping system[C]//35th AIAA International Communicational Satellite Systems Conference. Palo Alto: AAAI Press, 2017: 1-12.

[作者简介]



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



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, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信、深空通信、物联网、频谱监测。



王显煜 (1983-), 男, 陕西西安人, 西安空间无线电技术研究所研究员、型号总师, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信。