

面向异构通信卫星的地球站组网规划方法

严佳洁 祖家琛 胡谷雨 邵东生 王帅辉

陆军工程大学指挥控制工程学院 南京 210007

(yjj0112@126.com)

摘要 经过多年的建设发展,卫星通信已经形成了多系列卫星并存、相互支撑、相互补充的通信系统。然而,由于各卫星系统建设时间跨度大,通信技术手段存在差异,如何高效利用异构的卫星通信资源成为了一个实际难题。为此,文中首次根据卫星与地球站的可互通条件构建了系统模型,并将其归结为线性约束下离散变量的非线性优化问题,优化目标是异构卫星波束间的负载均衡,并在此基础上设计了一种两阶段的启发式组网规划方法。最后,根据地球同步卫星网络特性设置了合理的仿真参数,利用 Matlab 平台进行仿真实验。仿真结果表明,所提方法在面对不同规模的地球站组网时,在平均负载和负载均衡性上均优于一般的枚举搜索和遗传优化算法,可以在短时间内对大规模的信道单元进行组网规划。

关键词: 卫星网络;地球站;网络管理;组网规划;异构资源优化

中图法分类号 TP393

Earth Station Network Planning Method for Heterogeneous Communication Satellites

YAN Jia-jie, ZU Jia-chen, HU Gu-yu, SHAO Dong-sheng and WANG Shuai-hui

School of Command and Control Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China

Abstract After years of construction and development, the satellite communication industry has formed a communication system in which multiple series of satellites coexist, support and complement each other. However, how to efficiently utilize heterogeneous satellite communication resources has become a practical problem. Therefore, according to the intercommunication conditions between satellite and earth station, a network model is first put forward and formulated as a nonlinear optimization problem under linear constraints. The optimization goal is to balance the load between satellite beams, and a two-stage heuristic network planning algorithm is designed. Finally, the Matlab simulator is used to verify the proposed algorithm, reasonable parameters are set according to the characteristics of the geostationary satellite network. The simulation results show that the proposed method is superior to the enumerative search and genetic-based algorithms in load balance, and it can build networks for large-scale channel units in a short time.

Keywords Satellite network, Earth station, Network management, Network planning, Heterogeneous resource optimization

1 引言

随着移动互联网的蓬勃发展及人类活动范围的进一步扩大,用户对天地一体化网络^[1]的需求愈加迫切。卫星网络因其覆盖范围广、不受地面复杂地理条件限制等特点,在军事国防、导航定位、国土资源监测、灾害防护等重要领域,具有地面网络不可替代的优势。自 1957 年全球第一颗卫星发射以来,卫星通信已经经历了几十年的发展,从早期的区域覆盖、提供广播电视、话音业务发展到了今天的全球覆盖、支持多媒体互联网业务^[2]。目前已有上千颗通信卫星同时在轨运行,但是由于各卫星系统建设时间跨度大,使用通信技术手段存在差异,对异构卫星通信资源的规划利用成为了卫星通信系统面临的一个实际难题。

本文提出了一种面向异构通信卫星的地球站组网规划方法,用于支持各类通信卫星通信资源的互补共享和统筹使用,

最终通过组网规划达到异构卫星通信资源管理的目标。一般地,卫星通信资源包括转发器资源和地面终端资源,根据现阶段在轨运行的地球同步轨道通信卫星的使用现状^[3],不同系列卫星在通信上的异构性主要体现在以下几个方面。1) 卫星天线所支持的射频工作频段不同。卫星的固定业务通信频段主要使用 C、Ku 和 Ka 等频段,卫星移动业务通信频段主要使用 S、L 和 UHF 等频段,而大多数通信卫星天线只能支持其中的 1~2 个频段。2) 卫星天线所采用的极化方式不同,主要分为圆极化和线极化两种模式,一般只支持其中一种模式。3) 卫星天线形成的波束数目和覆盖范围大小不一。波束按照覆盖区域划分,既有覆盖多个国家的宽波束,也有覆盖部分区域的窄点波束。4) 通信卫星采用的转发器按照信号处理方式可分为处理转发器和透明转发器两种。在带宽、转发增益等方面对于不同型号的卫星则存在一定的差异。

卫星通信的地面终端主要分为地面固定地球站和可移动

通信卫星地球站^[4],不同型号的地球站在通信上的异构性主要体现在以下几个方面:1)与通信卫星类似,地球站天线在尺寸、射频工作频段和极化隔离方式等方面有一定区别;2)根据通信业务量进行区分,不同地球站在信号发送能力和接收能力上有一定差别;3)通常地球站中配置有一定数目的信道单元(Channel Unit,CU),各信道单元支持不同的信号传输体制(具体指基带信道编码、调制解调和多址接入方式等),用于用户间的通信。

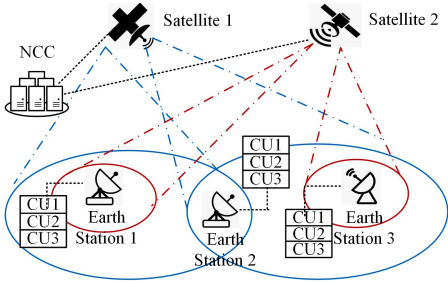


图1 面向多波束异构卫星的地球站组网场景
Fig.1 Earth stations networking scenario for multi-beam heterogeneous satellites

图1给出了面向多波束异构卫星的地球站组网基本场景,两颗不同型号的通信卫星对部署在地面的各型号地球站进行信号覆盖,地面网控中心(Network Control Center,NCC)可以看作一个集中式的网络管理控制器,负责地面终端的入网管理、信道资源按需动态分配等。当用户发起通信请求时,NCC会发送控制信令给源、目的地球站,为用户指定一对满足可通信条件的CU进行通信,发送信号需要通过源地地球站上的CU,经过卫星转发后到达目的地地球站。通过子网划分,可以对地球站进行分组管理。网控中心与信道单元、信道单元与信道单元之间可以采用特定的传输体制进行通信,而只有相同传输体制的地球站信道单元可以实现“一跳互通”。

面向异构通信卫星的地球站组网规划方法需要在执行基于卫星通信终端的通信任务时,为用户终端选择约束条件限制下的卫星波束,目标是实现地球站信道单元的最优分群组网,以平衡各卫星波束下的负载。

2 相关工作

卫星通信系统主要包括在轨卫星系统和地面站系统,当前的理论研究主要是以在轨卫星系统为对象,来进行卫星网络资源的优化分配。为了提高蜂窝式卫星移动通信的频谱使用率和通信质量,文献[5]设计了基于遗传算法和启发式搜索的卫星频谱规划算法,实现了频谱资源的动态分配。文献[6]探究了多层卫星网络架构下,低轨卫星和地球同步卫星协同中继的带宽分配问题,提出了一种基于用户体验质量感知的中继卫星带宽资源分配方法。文献[7-9]共同探讨了认知无线电技术在卫星网络中的应用,并在星地协同通信时采用博弈论方法来提高有限频谱的协同共享效用,进而提升系统容量。文献[10]提出了一种多波束卫星的负载均衡方案,其通过将重负载波束与轻负载波束的重叠覆盖区域内丢包率最高的用户卸载到轻负载波束,利用网络中的空闲资源来实现负载均衡,从而有效地改善网络丢包率。

上述研究大多基于链路层面对卫星网络资源进行优化分配,而对完整卫星通信系统的分析模型则较少。文献[11]根据NASA(National Aeronautics and Space Administration)中继跟踪卫星系统,对卫星网络中的终端、链路、用户需求和网络成本进行数学建模,较为清楚地对卫星通信载荷进行了量化说明。文献[12]从网络通信协议设计的角度出发,考虑到了卫星网络和地面网络在网络协议上的差异,基于IP协议提出了一种卫星和地球站的通信转换协议。文献[13]则讨论了在空天一体化网络中,如何根据用户需求进行异构网络(包括卫星网络、WLAN和地面移动网络等)的接入选择,文中设计了一种基于蒙特卡罗决策的方法来平衡各异构网络间的负载。

现有的针对卫星通信地面站的资源规划的研究较少。文献[14]探讨了卫星导航系统中的数据传输调度问题,设计了一种启发式卫星资源调度方法,并基于北斗三号卫星导航系统,与北京、新疆、海南3个地面站建立仿真场景,结果表明,该调度方法可满足任务需求,且地面站资源利用率均在70%以上。文献[15]则探究了使用光通信链路下的卫星网络,由于光通信链路受云雾遮挡会导致可用性下降,因此通过规划光通信地球站的位置可以提升系统的可用性。文献[16]研究了卫星通信网中,以太阳光无线网格路由器为转发节点的地球站部署问题,在给定无线网格拓扑的情况下,通过优化地球站的部署位置和数量,来提高星地链路利用率并最大化系统吞吐量。文献[17]探讨了未来网络场景中虚拟化技术在地球站中的应用,提出了一种基于软件定义网络的地球站设备虚拟化架构,从应用场景、技术挑战等方面进行了展望。

组网规划是卫星地面站系统进行通信资源分配的实际手段,当前卫星网络的组网规划主要依靠操作员进行手工配置,不仅工作量大、容易出错,而且随着地球站数量以及卫星通信需求量的日益增加,人工配置几乎不可能实现对同步通信卫星资源的合理分配,因此实现一种高效且通用的组网规划方法是卫星网络管理亟待解决的问题。文献[18]通过对卫星资源和组网需求进行形式化建模,提出了一种根据卫星通信组网的需求对卫星资源进行分配的组网规划描述方法。文献[19]首次基于社团发现算法,对地面站信道单元的通信关联矩阵进行社团发现,将通信量较多的地球站尽可能地规划在同一个网络中。实验结果表明,相比随机组网规划算法,平均传播时延得到了优化。而本文针对现有卫星通信系统,对面向异构通信卫星的地球站组网规划问题进行了进一步的深入研究。

3 问题描述

为了更好地描述异构通信卫星下的网络资源分配问题,我们建立了一个面向异构卫星的地球站组网数学模型,并将可互通条件加以形式化描述,给出了数学上的优化目标。

在系统模型中,各型号的地球站可形式化为 $ES_i = \{Coord, ERF, EP, G_t, G_r, \{CU\}\}$,Coord表示地球站 ES_i 所在的地理位置坐标。假设每个地球站只有一幅单频段天线,同一个地球站的信道单元共用该地球站的天线和射频线路。天线所支持的射频工作频段为ERF,EP代表地球站的天线极化方式,可划分为线极化和圆极化两种模式。 G_t 表示地球站的信号发送幅度增益(单位为dB),其数值等于发射机功放增益和

天线发射增益之和。 G_r 为地球站天线的信号接收增益(单位为 dB), $\{CU\}$ 为地球站 ES_i 支持的信道单元集合。每个地球站可能配置一个或多个信道单元,每个信道单元均可相对独立地与其他地球站的信道单元通过卫星进行通信。地球站 ES_i 的信道单元可表示为 $CU_{ij} = \{Mode, V_s\}$,每个信道单元可支持多种传输体制、传输速率以及加密方式,这里我们主要考虑传输体制对组网规划的影响。用 $Mode$ 表示地球站 ES_i 第 j 个信道单元的传输体制,在地球站通信的收发过程中,接收信号的幅值需要大于等于地球站低噪声放大器的最低接收电平 V_s 时,信号才能够被检测到。因此,我们定义 V_s 为地球站的接收灵敏度(mV)。

本文所讨论的通信卫星均为地球同步通信卫星,假设每颗卫星均采用多波束天线进行信号覆盖,则各卫星波束可表示为 $Beam_m = \{Sat, Cover, BRF, BP, Gp, BW\}$,其中 Sat 表示该波束所属的卫星, $Cover$ 表示该波束覆盖的区域范围, BRF 表示该波束所对应天线的射频工作频段, BP 为对应天线的极化方式。本文讨论的卫星转发器均为透明转发器,因此转发器除放大、滤波、变频外,不对信号做任何处理,并与各波束在逻辑上绑定在一起。其中, Gp 表示波束 $Beam_m$ 对应转发器的信号转发增益, BW 表示对应转发器的带宽资源容量。

地球站间的卫星通信,实际上是通过地球站上每个独立的信道单元进行通信。面向异构通信卫星的地球站组网规划的目的是对各个信道单元进行划分,将划分子网和卫星转发器资源进行逻辑上的绑定,最终通过网控中心实现异构卫星资源的统筹规划和高效利用。各子网可以形式化为 $Net_k = \{Sat, RF, Polar, \{CU\}, Mode\}$,其中 Sat 表示子网所属的卫星, RF 表示其射频工作频段, $Polar$ 表示其对应天线的极化方式, $\{CU\}$ 为在 Net_k 子网下工作的信道单元集合, $Mode$ 为该子网的传输体制。对于 $\forall CU_{ac}$ 和 CU_{bd} ,两者可以进行组网的约束条件为:

$$Mode_{ac} = Mode_{bd} \quad (1)$$

式(1)限定加入到同一个网络的信道单元必须使用同一种传输体制。

$$\exists Sat_n, Coord_a \in Sat_n \cdot Cover \cap Coord_b \in Sat_n \cdot Cover \quad (2)$$

式(2)限定加入到同一个网络的地球站需位于同一颗卫星的覆盖范围内。

$$\exists Beam_m \in Sat_n, BRF_m = ERF_a = ERF_b \quad (3)$$

式(3)表示加入到同一个网络内的地球站天线必须朝向同一颗通信卫星,收/发地球站、卫星这三者的天线均支持相同的射频频段。

$$\exists Beam_m \in Sat_n, BP_m = EP_a = EP_b \quad (4)$$

类似地,式(4)要求收/发地球站、卫星这三者的天线的极化工作模式也相同。

$$\exists Beam_m \in Sat_n, Vt_0 + Gt_a + Gp_m + Gr_b - A_{ab} \geq V_{s_{bd}} \cap Vt_0 + Gt_b + Gp_m + Gr_a - A_{ba} \geq V_{s_{ac}} \quad (5)$$

式(5)表示加入到同一个网络中的信道单元需达到信号的可接收条件。假设源地球站的中频发射信号电平平均为 Vt_0 ,则该信号电平+发送幅度增益+转发器增益+接收天线增益-传输损耗至少应达到目的地球站的接收灵敏度门限,单位为 dB。其中, $A_{ab} = A_{ba}$ 表示星地链路上下行总

的传输损耗,通常包括自由空间损耗、大气衰减和天线跟踪损耗等,主要受天气和传输距离的影响。

在组网过程中,假设共有 M 个波束、 N 个信道单元需要进行组网规划,波束集合为 $\mathcal{B}$,信道单元集合为 $\mathcal{C}$ 。当用户通过地球站发起通信请求时,卫星需将其转发器带宽资源分配给对应的组网信道单元。考虑到一颗通信卫星的转发器容量受限,为了避免出现通信拥塞,我们从减少卫星转发器资源消耗的角度出发,希望在组网阶段充分利用多颗异构通信卫星的转发器资源,来实现各波束间的负载均衡。

根据一定周期内各个信道单元之间的通信流量大小,可以构建通信关联矩阵 $\mathbf{A}_{N \times N}$,矩阵中元素 a_{ij} 表示信道单元 i 向信道单元 j 的发送流量,单位为 MB。在实际系统中,各信道单元之间的通信流量大小由进行通信的源、目的地地球站内的流量监控设备采集,各地球站会将流量信息上传至网控中心,由网控中心进行集中式的组网规划。流量统计周期可以根据网管需求进行调整,如按小时或者天数进行更新。通过通信关联矩阵 $\mathbf{A}_{N \times N}$,各波束的负载可以采用式(6)进行计算,其中,如果信道单元 i 或信道单元 j 被规划到 $Beam_m$ 所在的网络中,则 $\delta_{ij}^m = 1$,否则 $\delta_{ij}^m = 0$ 。

$$L_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \delta_{ij}^m \quad (6)$$

面向异构卫星的地球站组网优化的目标是选择最优的组网方案,以最小化波束负载均衡系数 σ 。

$$\text{Min } \sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (L_m - \bar{L}_m)^2} \quad (7)$$

Subject to (1)–(6)

4 算法设计

面向异构通信卫星的地球站组网规划问题可以归结为一个非线性整数规划问题。给定通信关联矩阵 $\mathbf{A}$ 、需要组网的波束集合 $\mathcal{B}$ 和信道单元集合 $\mathcal{C}$ 。按照信道单元和卫星波束的可互通限制条件,可以把两者的逻辑关系表示为1个二分图,简化示例如图2所示。

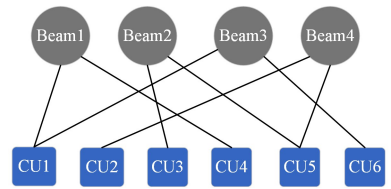


图2 组网逻辑二分图

Fig. 2 Bipartite graph of networking logic

只有当波束与信道单元满足约束式(1)–式(5)时,两者才可以进行匹配。各信道单元可相互独立地在可选卫星波束集合中选择并进行组网,但是一旦输入信道单元的数目过大,问题的解空间就会呈指数型增长,采用普通规划方法会造成运算时间过长且不易求得最优解。因此,我们设计了一种两阶段的启发式组网算法,该算法可以在短时间内对大规模信道单元进行组网,网管人员可根据精度需求,通过增大迭代次数来逼近最优组网方案。启发式组网规划算法如算法1所示。

算法1 启发式组网规划算法(Heuristic)

输入:通信关联矩阵 $\mathbf{A}$,波束集合 $\mathcal{B}$,信道单元集合 $\mathcal{C}$

输出:子网划分 $\text{Net}_1, \text{Net}_2, \text{Net}_3, \dots$

1. 初始化: $\text{Max_iter}=100, \text{rounds}=100$
2. for each $\text{CU}_i \in \mathcal{C}$ do
3. 根据 $\mathcal{B}$ 内波束的覆盖范围、射频工作频段和天线增益等属性建立 CU_i 的可选波束集合
4. end for
5. for $\text{iter}=1; \text{Max_iter}$ do
6. 对 $\mathcal{C}$ 中的 CU 进行随机排序得到 $\mathcal{C}(\text{iter})$
7. for each $\text{CU}_i \in \mathcal{C}(\text{iter})$ do
8. CU_i 在可选波束集合中选择负载最低波束 Beam_m
9. CU_i 加入 Beam_m 的服务信道单元集合
10. 更新 Beam_m 的波束负载 $L_m(1)$
11. end for
12. 根据 $\mathcal{A}$ 计算初始负载均衡系数:

$$\sigma_{\text{tmp}}(1) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (L_m(1) - \overline{L_m(1)})^2}$$
13. for $n=2; \text{rounds}$ do
14. for each $\text{CU}_i \in \mathcal{C}(\text{iter})$ do
15. if CU_i 迁移至其他可选波束有

$$\Delta \sigma_{\text{tmp}} = \sigma_{\text{tmp}}(n-1) - \sigma_{\text{tmp}}(n) > 0$$
 then
 16. 迁移 CU_i 至 $\Delta \sigma_{\text{tmp}}$ 最大的对应波束
 17. 更新原波束和迁移目的波束负载
18. end if
19. end for
20. 根据 $\mathcal{A}$ 计算迁移后的负载均衡系数

$$\sigma_{\text{tmp}}(n) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (L_m(n) - \overline{L_m(n)})^2}$$
21. if $\sigma_{\text{tmp}}(n) = \sigma_{\text{tmp}}(n-1)$ then
 22. $\sigma(\text{iter}) = \sigma_{\text{tmp}}(n)$
 23. 将波束选择策略 $S(\text{iter})$ 加入到可行组网方案集 $\{S\}$
 24. Break
25. end if
26. end for
27. end for
28. 在可行组网方案集 $\{S\}$ 中选择 σ 最小的波束选择策略 S_m 作为 $\mathcal{C}$ 的最终组网策略, 并为 $\mathcal{B}$ 分配服务信道单元;
29. 根据传输体制对各波束下的信道单元集进行划分, 得到初始子网集 $\{\text{Net}_0\}$;
30. 在 $\{\text{Net}_0\}$ 中对同卫星、同射频工作频段、同极化方式、同传输体制的子网进行聚合, 得到聚合后的最终子网划分: $\text{Net}_1, \text{Net}_2, \text{Net}_3, \dots$.

根据式(1)一式(5)的可互通限制条件, 建立每个信道单元的可选波束集合, 得到用于组网的逻辑二分图(Line 2—Line 4)。接下来进行多轮迭代运算, 在每轮的迭代求解过程中, 第一阶段(Line 6—Line 12)为初始入网阶段, 各信道单元根据可互通条件进行随机顺序入网, 根据可选波束集合贪婪地选择当前负载最低的波束进行组网, 形成初始解。第二阶段(Line 13—Line 28)为迁移入网阶段, 各 CU 针对优化目标在可选波束集合中尝试迁移, 迁移目标是能使负载均衡系数下降梯度最大的可选波束, 经过多次迭代迁移, 就可以得到一个收敛的可行组网方案。最终组网方案选定为可行组网解集中负载均衡系数最小的解, 并按照该方案为各波束分配服务信道单元。最后是子网划分阶段(Line 29—Line 30), 对各波束下的组网信道单元集按照传输体制进行区分, 再通过子网聚合就可以得到最终的细化组网方案。

5 实验结果与分析

本节通过仿真实验评估了提出的两阶段启发式组网方法, 首先介绍了仿真过程中所用的仿真场景和实验参数, 而后介绍了针对该问题设计的对比算法, 即枚举搜索组网和基于遗传算法的组网方法, 最后将启发式组网规划方法与对比算法在负载均衡性、波束平均负载和可扩展性方面进行了对比。所有实验都在一台装有 Intel Corei7-8700 CPU 和 8 GB 内存的联想 ThinkCentre 台式电脑上完成, 操作系统为 64 位的 Windows7 系统, 并采用 MATLAB 2018A 进行模拟仿真。

5.1 仿真场景和参数设置

在模拟地球站组网过程中, 为了验证提出方法的可扩展性, 我们对不同规模数量的地球站进行了仿真, 图 3 展示了 20 个地球站(100 个 CU)进行组网时的仿真场景图, 卫星均模拟同步轨道通信卫星, 其中不同颜色的圆用于区分不同射频频段的波束, 各地球站按编号分布在波束覆盖范围内。

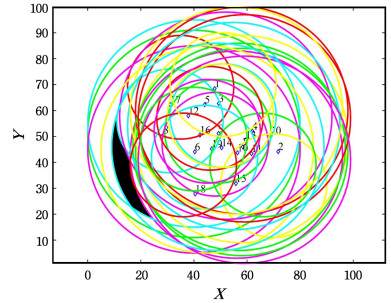


图 3 仿真 20 个地球站的组网场景图(电子版为彩色)

Fig. 3 Networking scene of simulating 20 earth stations

在仿真过程中, 我们为每个地球站配置 5 个信道单元进行组网通信。各地球站均为地面固定站, 分布在 100×100 的二维坐标平面上, 地理坐标服从以点 $(50, 50)$ 为中心、协方差为 100 的正态分布。每个地球站有且只有一副天线, 射频工作频段在 $\{Ku, Ka, C, UHF, S\}$ 5 个工作频段中均匀随机选择。我们设置卫星的数量为 10 个, 每颗卫星下有 3 个波束, 各波束射频工作频段在 $\{Ku, Ka, C, UHF, S\}$ 5 个工作频段中均匀随机选择, 因此共有 $M=30$ 个波束进行覆盖通信。波束按照覆盖范围可划分为宽波束和窄波束, 宽波束的覆盖范围为以波束中心 (x_1, y_1) 为圆心、半径为 40 的圆内, 波束中心随机分布在 $x_1 \in [40, 60], y_1 \in [40, 60]$ 的区域; 窄波束的覆盖范围为以波束中心 (x_2, y_2) 为圆心、半径为 20 的圆内, 波束中心随机分布在 $x_2 \in [30, 70], y_2 \in [30, 70]$ 的区域。在仿真过程中, 我们对问题进行了适当简化, 并假设: 1) 所有卫星和地球站的天线均采用圆极化模式; 2) 每个地球站的发送幅度增益和接收天线增益都足够大, 即满足信号可接受条件; 3) 每个波束只对应一个转发器, 且转发器的带宽容量相同; 4) 对于地球站中的信道单元, 其传输体制可以互不相同, 这里仅考虑多址接入的方式, 可在 $\{TDMA, CDMA, FDMA\}$ 3 种信道复用方式中均匀随机配置。

至于通信关联矩阵 $\mathbf{A}_{N \times N}$, 根据排队论理论^[20], 可认为每个信道单元是一个排队系统, 并假设在一定周期时间内, 地球站信道单元之间的通信次数服从泊松分布, 通信时长服从负

指数分布。因此,在仿真实验中我们设置信道单元间的通信次数为平均值为 10 的泊松随机数,通信时长为平均值为 100s 的负指数分布随机数。假设各信道单元每次通过卫星通信的数据平均传输速率相同,且 $W=1\text{ Mb/s}$ 。在统计时间范围内,如果任意信道单元 i 向信道单元 j 发起的通信次数为 n_{ij} ,平均通信时间为 t_{ij} ,则两者之间的通信流量 a_{ij} 可表示为: $a_{ij}=\frac{W}{8}\cdot n_{ij}\cdot t_{ij}$,单位为 MB。具体的仿真参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置
Table 1 Simulation parameters

参数	数值
同步轨道卫星个数	10
每个卫星波束个数	3
地球站数目	20~1 000
每个地球站的 CU 数目	5
地球站地理坐标范围	$0\leq x\leq 100,0\leq y\leq 100$
射频工作频段	{Ku,Ka,C,UHF,S}
宽波束中心坐标范围	$40\leq x\leq 60,40\leq y\leq 60$
宽波束半径	40
窄波束中心坐标范围	$30\leq x\leq 70,30\leq y\leq 70$
窄波束半径	20
CU 多址接入方式	{TDMA,CDMA,FDMA}
CU 间通信次数的平均值	10
CU 间通信时长的平均值/s	100
卫星数据平均传输速率/(Mb/s)	1

5.2 对比算法

针对当前卫星通信系统兼容性差、异构资源利用效率低的问题,由于还没有其他已提出的解决方法可进行对比,因此我们将提出的两阶段启发式组网算法(Heuristic)与枚举搜索算法(Enumerative Search,Enum)和基于遗传算法(Genetic Algorithm,GA)的组网方法进行比较。

枚举搜索算法是一般的暴力搜索方法,在每次迭代运算中,枚举搜索算法根据可互通限制条件,在每个信道单元的可选波束列表中进行信道单元的随机入网,得到一个可行的组网解集。通过多轮迭代搜索,选择其中负载均衡的最优的组网方案作为最终解。

基于 GA 的组网方法是每一次组网方案看作一个染色体,把组网方案中各信道单元的波束选择作为染色体上的一个基因。第一次组网时,根据可互通限制条件,每个 CU 在可选波束列表中进行随机入网,而后进行迭代计算,在每一代中对种群中的染色体进行交叉、变异操作,保留负载均衡性好的染色体遗传至下一代。经过多轮进化,得到最终的负载均衡优化组网方案。在该算法中,我们设置种群染色体的个数为 100,变异概率为 10%,交叉概率为 60%。

5.3 仿真结果

首先,本文对不同组网方法的可扩展性进行了验证,并且对于不同数目的信道单元,依据相同统计流量生成的通信关联矩阵进行组网规划。表 2 列出了通过不同组网方法得到的最终组网方案的负载均衡系数,实验结果表明无论是在小规模地球站(100 个 CU)还是大规模地球站组网条件下(5 000 个 CU),在相同的计算时间内,Heuristic 在负载均衡性上均优于 GA 和 Enum,尤其在大规模组网条件下负载均衡系数远小于其他两种方法。

表 2 不同算法下负载均衡性的对比

Table 2 Comparison of load balance with different algorithms

CU number	Load Balance Ratio			Computation time/s
	Heuristic	GA	Enum	
100	156.51	343.89	698.74	5.56
500	505.52	4 896.4	7 690.7	110.79
1 000	952.90	16 597	27 388	489.85
5 000	6 197.3	600 591	768 786	1 2402.59

表 3 列出了使用不同算法依据相同历史流量信息得到最终组网方案的波束平均负载。在该指标中可以看到,波束平均负载随组网规模扩大,其增长速度很快。我们提出的 Heuristic 在不同规模计算下得出的解也优于 GA 和 Enum 组网方法。

表 3 不同算法下波束平均负载的对比

Table 3 Comparison of average beam load with different algorithms

CU number	Average Beam Load/MB			Computation time/s
	Heuristic	GA	Enum	
100	193.85	306.87	433.47	5.56
500	10 054.6	11 808	12 323	110.79
1 000	44 390	46 464	48 871	489.85
5 000	1.24×10^6	1.25×10^6	1.29×10^6	12 402.59

接下来,我们探讨不同算法优化效果受迭代运算次数的影响。以 100 个地球站(500 个 CU)组网为例,图 4 探讨了不同算法计算负载均衡性受迭代运算次数的影响,图 5 则展示了不同算法下波束平均负载受迭代运算次数的影响。可以看出,相比其他两种算法,Heuristic 计算得到的卫星波束间的负载更加均衡,且波束平均负载更低。通过增加迭代运算次数,波束平均负载呈现波动态势,而波束负载均衡系数则一定程度地减小了,但在各地球站之间的通信流量比较平均时优化效果并不明显,而且牺牲了一定的计算代价。在实际系统中,可以根据计算设备的性能来选择较优的迭代运算次数,得到距离最优解较近的可行解。

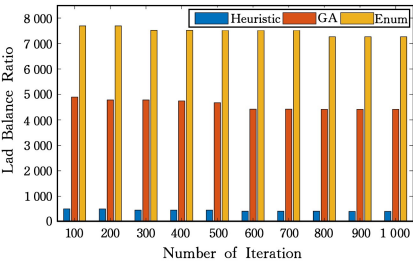


图 4 负载均衡性随迭代运算次数的变化
Fig. 4 Load balance varies with the increase of iterations

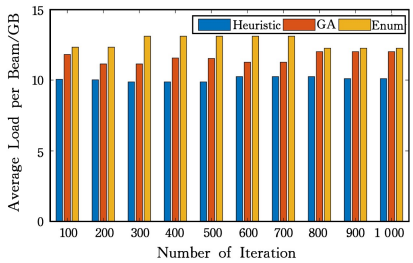


图 5 波束平均负载随迭代运算次数的变化
Fig. 5 Average beam load varies with the increase of iterations

结束语 针对当前卫星通信系统兼容性差、异构资源利

用效率低的问题,本文面向异构通信卫星,从节省通信卫星转发器资源的角度出发,首次提出了一种调节负载均衡的地球站组网规划方法。首先,本文对地球站信道单元组网的互通条件进行了形式化约束,借助用户的通信流量信息,优化平衡各通信卫星下的波束负载。为了减小组网配置的计算复杂度,我们设计了一种两阶段的启发式组网算法,该算法可以在短时间内对大规模信道单元进行组网。最后,通过仿真实验验证了所提出的启发式组网规划算法,相比一般的优化算法能提升求解效率,降低波束的平均负载。

本文针对历史通信流量进行分析计算,本质上是对最优组网方案的离线求解。而在实际通信场景中,用户间的卫星流量是动态变化的,未来可以采用在线学习的方法进行不同流量条件下的学习,得到适用于时变负载场景的动态组网方案。

参 考 文 献

[1] LIU J,SHI Y,FADLULLAH Z M,et al. Space-air-ground integrated network;a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2018,20(4):2714-2741.

[2] ZHANG H T,WANG M,CUI W Z,et al. Satellite Communication[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2018.

[3] GUO Q,WANG Z Y,GU X M. Satellite communications systems[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[4] ZONG P. Satellite earth station:equipment and network system [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2015.

[5] ZANG H,GONG Y,PAN Z S,et al. Dynamic Frequency Allocating for Satellite Communication using GA and Heuristic Search Algorithm [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications,2017,40(S1):5-9.

[6] WANG X Y,LI Y J,ZHAO H S,et al. Research on Relay Satellite Bandwidth Resource Allocation Method Based on QoE Awareness[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(19):147-152.

[7] WANG L,LI F,LIU X,et al. Spectrum optimization for cognitive satellite communications with cournot game model [J]. IEEE Access, 2018,6:1624-1634.

[8] ZHONG X D,HE Y Z,REN B Q,et al. Channel Allocation and Power Control Algorithm for Cognitive Satellite Networks Based on Cooperative Game Theory [J]. Computer Science, 2020,47(1):252-257.

[9] ZHU X,JIANG C,KUANG L,et al. Two-layer game based resource allocation in cloud based integrated terrestrial-satellite networks [J/OL]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, [2020-06-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9037107>.

[10] CAO H,SU Y T,ZHOU Y Q,et al. A load balancing control method for multi-beam satellite network:China,201910250743. 7[P]. 2019-07-23.

[11] NET M S,DEL P I,CAMERON B,et al. Integrated tradespace

analysis of space network architectures [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2015, 12(8):564-578.

[12] JIN X,ZHANG P,YAO H. A Communication Framework between Backbone Satellites and Ground Stations[C]//16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). 2016:479-482.

[13] ZHOU Z,WANG K,DENG Z,et al. Switching Algorithm Based On Monte Carlo-Markov Decision Under Space-Air-Ground Integrated Network[C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2020:1-6.

[14] SONG W L,YANG D L. Research on GNSS Satellite-ground Service Information Transmission Scheduling Method Based on Inter-satellite Link [J]. Acta Armamentarii,2019,40(8):1627-1633.

[15] FUCHS C,MOLL M. Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links [J]. Journal of Optical Communications and Networking,2015,12(7):1148-1159.

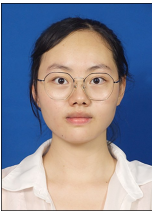
[16] KOSEKI S,NISHIYAMA H,KATO N,et al. Earth Stations deployment for maximizing system throughput in Satellite/Solar-Powered Mesh Integrated Network [C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). 2015:832-837.

[17] RIFFEL F,GOULD R. Satellite ground station virtualization: Secure sharing of ground stations using software defined networking[C] // Annual IEEE Systems Conference (SysCon). 2016:1-8.

[17] ZHAO H H,XIE J,YUAN W W. Method for planning network of satellite communication network: China, 201810092414. X [P]. 2018-07-13.

[19] SHAO D S,ZHAO H H,ZHOU Y,et al. Network Planning for Earth Stations of Satellite Communication Based on Community Detection [J]. Ordnance Industry Automation, 2020,39(4): 23-29.

[20] BOUDEC J Y,THIRAN P. Network calculus:a theory of deterministic queueing systems for the internet [M]. Berlin:Springer-Verlag,2001.



YAN Jia-jie, born in 1996, postgraduate. Her main research interests include satellite network management and simulation.



HU Gu-yu, born in 1963, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include computer networks, administration of the satellite networks and intelligent network management.