

低轨高通量卫星按需波束调度技术

韩 帅¹, 吴宜航¹, 李季蹊¹, 陈祖挺¹, 孙思月², 梁 广²

(1.哈尔滨工业大学通信技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2.中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201306)

摘要: 低轨高通量卫星互联网能够满足终端用户与日俱增的速率和连接密度要求, 为用户提供全天候低时延超宽带通信服务。其如何适应低轨下行场景中灵活多变且分布不均的地面业务需求并提高系统吞吐量是当前亟待解决的问题。在对低轨高通量卫星下行系统波束成形架构及低轨卫星星地衰落与高通量卫星波束间干扰进行建模的基础上, 构建低轨高通量卫星下行信道模型; 对低轨高通量卫星按需波束调度方案进行研究, 建立波束调度最优化问题模型以保证资源的利用率; 提出一种面向高通量卫星互联网的按需波束调度方法, 通过少量波束按需时分复用覆盖多个小区的方式提高资源的利用率, 有效抑制波束间的干扰, 提高系统的吞吐量。

关键词: 高通量卫星; 下行系统; 波束调度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022018

On-Demand Beam Scheduling Technology of Low-Orbit High-Throughput Satellite

HAN Shuai¹, WU Yihang¹, LI Jixi¹, CHEN Zuting¹, SUN Siyue², LIANG Guang²

1.Communications Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2.Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201306, China

Abstract: Low-orbit high-throughput satellite internet can satisfy the increasing speed and connection density requirements of end users and provide users with all-weather low-latency ultra-broadband communication services. At the same time, how to adapt to the flexible and unevenly distributed terrestrial service requirements in low-orbit downlink scenarios and improve system throughput is an urgent problem to be solved. Based on the modeling of the beamforming architecture of the low-orbit high-throughput satellite downlink system and the satellite-to-earth fading of the low-orbit satellite and the inter-beam interference of the high-throughput satellite, the low-orbit high-throughput satellite downlink channel model was established. Based on the research of the high-throughput satellite on-demand beam scheduling scheme, the beam scheduling optimization problem model was established to ensure the utilization of resources, and the on-demand beam scheduling technology for high-throughput satellite internet was proposed, the method of using a small amount of beams to cover multiple cells by using on-demand time division multiplexing improved the utilization rate of resources, effectively suppressed the interference between beams, and improved the throughput of the system.

Keywords: high throughput satellite, downlink system, beam scheduling

0 引言

随着卫星移动通信技术的不断发展, 传统的单波束通信卫星系统已经不能满足终端用户与日俱增的速率和连接密度要求。针对这一问题, 国际电信联盟在建议书

ITU-R M.2460《卫星系统与下一代通信系统融合的关键技术》中指出: 卫星与5G融合网络的关键之一就是高通量多波束卫星技术与低轨卫星的结合^[1]。

在低轨卫星中应用多波束高通量卫星面临3个无法回

收稿日期: 2022-02-02; 修回日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.61831002, No.U21A20444)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61831002, No.U21A20444)

避的问题。第一,为满足终端用户的带宽要求与服务速率要求,给一个卫星配备很多的射频链路以及其他的信号处理设备,会导致单星成本与卫星重量的大幅增加。第二,地面小区的业务量分布变化速度快且分布拖尾严重,同时考虑到星地链路的衰落,若维持预定波束全覆盖不变,很可能导致卫星对长时间无业务需求小区提供无用服务。第三,出于提高系统吞吐量的考虑,在高通量卫星点波束间采用“全频率复用”方案是未来的发展趋势^[2]。但“全频率复用”方案引入的波束间干扰会降低接收端的信干噪比,导致系统吞吐量降低,若是求助于频率复用或是极化复用等复用方案,又将挤占本就不充裕的频谱资源或降低系统的带宽。

本文所述按需波束调度技术以少量波束通过时分复用按需覆盖多个小区,可以在保证终端速率的条件下减少波束数量,保证各地面小区得到公平的服务,并抑制波束间干扰,有效解决资源浪费、服务不均等问题。以下将从卫星下行场景中的平均逗留时间、吞吐量等指标出发,考虑波束间干扰与地面流量分布带来的影响,提出适用于低轨高通量卫星互联网场景的按需波束调度方法,以提高系统的吞吐量。

1 背景

1.1 高通量卫星研究现状

近年来,对高速率全天候无缝化接入的卫星通信的需求,推动了高通量卫星的发展。与传统通信卫星单一波束覆盖模式不同,高通量卫星通过产生多个小范围、高增益的点波束,极大增强了星地间点对点通信链路的信道容量与服务质量^[3],且在点波束间引入了频率复用与极化复用技术,通过对相邻波束小区提供不同频率与极化的业务波束,减轻了波束间的同频干扰^[4]。

当前在轨的高通量卫星系统可根据运行轨道高度分为地球同步轨道上的高轨高通量卫星系统以及非地球同步轨道上的中低轨高通量卫星系统。随着低轨卫星的发展,中低轨高通量卫星系统成为高通量卫星的发展热点。

低轨高通量卫星虽然单星的容量、波束数都不及高轨卫星,但可以通过低轨卫星星座组网的数量优势弥补这一缺点。且在低轨场景下,较低的星地距离保证了较低的路径损耗,使得低轨卫星的接收天线相比于高轨卫星可以做得更小,如车载天线或手持终端的全向天线。基于卫星与5G融合的展望,将来部分低时延业务也需要通过卫星链路进行传输,与高轨高通量卫星相比,低轨高通量卫星的时延小得多。由此可见,通过低轨卫星实现低时延高吞吐量传输的系统架构是未来高通量卫星发展的大势所趋。

1.2 波束调度研究现状

MOKHTAR等^[7]首先考虑了波束调度技术在多波束卫星中的应用,分析LEO全球宽带卫星网络的下行链路部分的吞吐量,根据点波束的数量及干扰约束和覆盖区域,给出下行链路吞吐量的上限和下限。ANZALCHI等^[8]以欧洲航天局给出的欧洲业务需求分布为标准,提出基于系统优化循环通用优化策略。

随着移动通信的发展,单纯依据长期流量变化来进行波束调度不再适用于卫星通信,因此ALEGRE等^[9]从启发式算法的角度,将波束按照地面小区的流量需求进行调度。CHOI等^[10]提出一种采用统一的退避参数,根据信道条件和时延约束,对传入流量进行调节的方法以提高系统吞吐量。

在近年的研究中,研究方向逐渐转向了联合功率分配^[11],以及数据包时延、丢包率、波束间干扰、系统容量等多指标的优化。参考文献[12]考虑到单波束有时不能充分利用波束的总频谱资源的问题,给出一种能通过业务分布调整波束点亮位置和波束覆盖范围的方法,提高系统容量和用户满意度。参考文献[13]将多波束卫星的资源配置问题分为两个子问题:带宽分配、功率分配,提出功率和时隙组合优化算法以实现按需配置,引入未满足的流量与流量满足率等参数以衡量该波束调度方法的效率。参考文献[14-15]在其基础上设计一个基于低地轨道卫星通信的波束系统,根据业务需求灵活分布卫星波束的功率与时隙资源以及地面的业务流量,提高了系统吞吐量和请求满足率。

近几年,解决波束调度问题的优化算法有了进一步的发展。不同于之前的遗传算法或者启发式算法等最优化算法,为了更好地解决多约束优化问题,参考文献[16-17]引入深度强化学习以解决多波束卫星系统中的波束调度问题。参考文献[18-19]探索一种将学习与优化方法相结合的波束调度设计可行的方法,以克服传统最优与次优算法和经典学习模型的缺点。

2 波束间干扰模型

高通量卫星通过形成 K 个波束,同时服务 N 个小区中的 K 个小区。考虑二维六边形波束小区排布,波束小区数 $N=37$ 个,小区直径为50 km。为适应低轨星座场景中其他卫星的波束与本卫星边缘波束间存在干扰的场景,本文在波束覆盖边缘引入了虚拟相邻小区,以类似的波束小区排布,分析低轨星座中其他卫星波束与该卫星边缘波束的波束间干扰。

在实际中,一般只关注相邻波束小区的同频干扰影响,若距离超过一个小区直径,则这两个波束所引起的

波束间干扰可以忽略^[20-21]。基于上述假设,本文将应用邻接矩阵以简单无向图建模二维六边形小区场景下的波束间干扰。

令 $\text{Graph} = \{V, E\}$, 其中 N 个小区构成图的顶点 $V = \{v^1, v^2, \dots, v^N\}$, 其邻接矩阵为 $A = \{a_{ij}\}^{N \times N} = \{0, 1\}^{N \times N}$ 。若小区 i 与小区 j 相邻, 则顶点 v^i 与顶点 v^j 间有边 (v^i, v^j) 。 $\text{Graph} = \{V, E\}$ 的邻接矩阵 A 可以表示为

$$a_{ij} = a_{ji} = \begin{cases} 0, & v^i, v^j \text{ 不相邻} \\ 1, & v^i, v^j \text{ 相邻} \end{cases} \quad (1)$$

为进一步量化波束间的同频干扰, 考虑单高通量卫星下行场景, 如图1所示, 其中 θ 为波束的偏轴角, L 为星地距离, r 为小区半径。波束的偏轴角可以表达为

$$\theta = \arctan\left(\frac{2r}{L}\right) \quad (1)$$

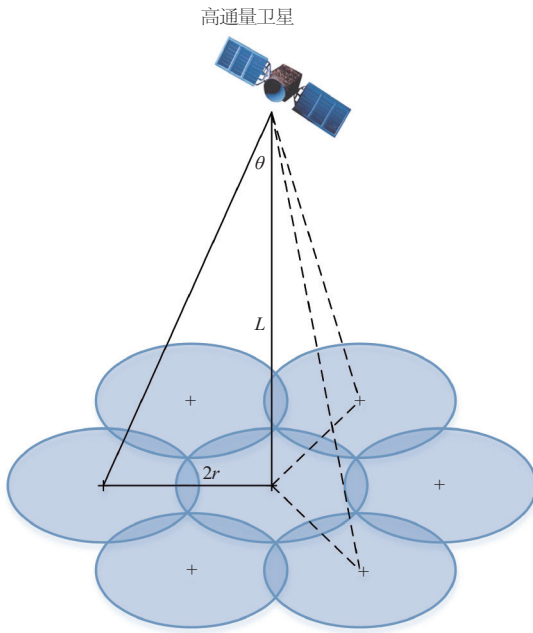


图1 多波束同频干扰模型

假设其中多波束卫星天线增益 $G_i(\theta)$ 符合3GPP TR38.811的定义, 由于低轨高通量卫星覆盖范围较小, 同时假设星下各波束小区至卫星的距离近似相等(为星地距离 L), 各小区中心用户与指向本小区的波束偏轴角为0, 且各波束间保证等功率分配, 则位于卫星覆盖范围内不同波束的波束间干扰同样只与波束偏轴角有关。多波束卫星随波束偏轴角改变天线增益 $G_i(\theta)$ 可以等效为星下点波束对其他相邻波束的同频干扰增益 $\alpha(\theta)$

$$\alpha(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta = 0 \\ 4 \left| \frac{J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \right|^2, & 0 < |\theta| \leq \frac{1}{2} \pi \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ 为波束的偏轴角, $J_1(\cdot)$ 为一阶第一类贝塞尔函数, a 为天线口径半径, $k = 2\pi f/c$ 为波数。由多波束系统波束间干扰模型以及波束间干扰增益式(3)可知, 波束对另一相邻小区中用户的干扰, 在用户位于两小区交界处时最大, 此时用户距干扰小区中心的距离为波束小区的半径。当用户位于两小区的另一侧边缘时最小, 此时用户距干扰小区中心的距离为3倍波束小区的半径。3GPP TR38.821中说明了波束的覆盖范围由天线增益 $G_i(\theta)$ 的3 dB宽度 θ_{3dB} 确定, 由于天线增益 $G_i(\theta)$ 可以等效为星下点波束对其他相邻波束的波束间干扰增益 $\alpha(\theta)$, 则波束间干扰的最大值应为0.5。因此, 可以得到相邻小区内部的波束间干扰如图2所示。

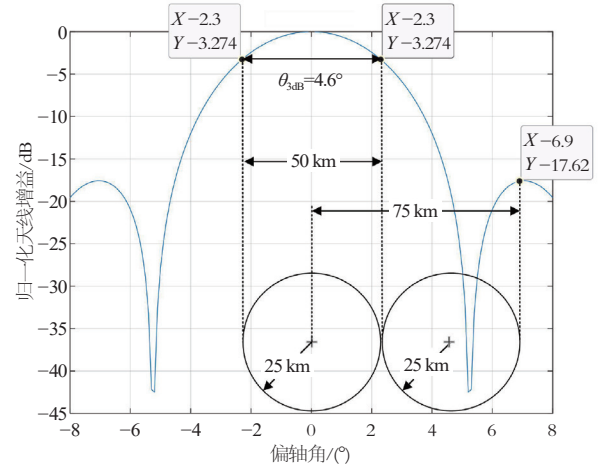


图2 相邻小区内部的波束间干扰

由图2可以看出, 位于第3个小区的低波束间干扰将降至-17.62 dB及以下, 若此时采用三色复用方案, 则可以保证同频小区低波束间的干扰低至可认为干扰不存在。

由于本文中只考虑相邻小区的干扰, 因此上述同频干扰增益 $\alpha(\theta)$ 可以视作 $\text{Graph} = \{V, E\}$ 中边的权重, 则描述同频干扰的邻接矩阵 A 可以改写为 A' , 其中

$$a'_{ij} = a'_{ji} = \begin{cases} 0, & v^i, v^j \text{ 不相邻} \\ \sqrt{\alpha(\theta)}, & v^i, v^j \text{ 相邻} \end{cases} \quad (4)$$

若结合Shadowed-Rician卫星-地面衰落模型, 令卫星至 N 个地面波束小区的衰落信道矩阵为 $\mathbf{h}^{N \times N}$, 则卫星至 N 个地面波束小区的信道矩阵 $\mathbf{H}^{N \times N}$ 可以表示为

$$\mathbf{H}^{N \times N} = \mathbf{h}^{N \times N} \circ (\mathbf{I}_N + \sqrt{\alpha} \mathbf{A}) \quad (5)$$

其中，“ $\circ$ ”表示两矩阵的哈达玛积， $\mathbf{I}_N$ 为 N 维单位矩阵，表示在波束指向该小区时，即偏轴角 $\theta=0$ 时的归一化天线增益。本文构造衰落信道矩阵 $\mathbf{h}^{N \times N}$ 为 $N \times N$ 维的信道矩阵，是因为即使本文假设了理想的模拟波束成形，根据天线的辐射特性，在波束覆盖范围的3 dB宽度 θ_{3dB} 之外，仍存在天线功率泄露引起的波束间干扰，所以需要通 $N \times N$ 维的信道衰落矩阵来表征不同天线对地面波束小区的干扰。

3 低轨高通量卫星信道模型

考虑一个低轨高通量卫星波束按需调度场景，如图3所示。

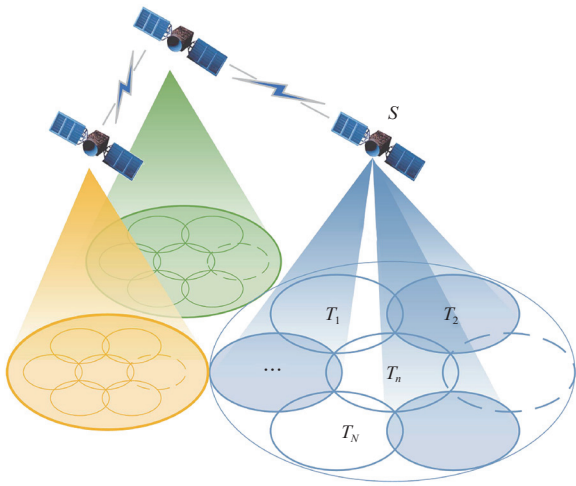


图3 低轨高通量卫星波束按需调度场景

其中，卫星 S 服务范围内共有 N 个波束小区，但卫星处同时只能形成 $K(K < N)$ 个波束向小区提供服务。假设卫星通过控制信道已知当前时隙地面各小区业务分布 $\mathbf{T}^{1 \times N} = \{T_1, T_2, \dots, T_n, \dots, T_N\}$ ，单位为Mbit/s，卫星 S 到 N 个地面波束小区的卫星衰落信道矩阵为 $\mathbf{h}^{N \times N}$ 。当前时隙内下行信道矩阵 $\mathbf{H}^{N \times N}$ 可由式(5)表示。

令卫星 S 下 N 个地面波束小区发送的单位能量信号为 $\mathbf{x}^{N \times 1}$ ，将地面小区处接收到的有用信号与干扰分离，则地面小区处接收到的信号 $\mathbf{y}^{N \times 1}$ 可以表达为

$$\mathbf{y}_n = \sqrt{P_r} H_{n,n} x_n + \sum_{i=1, i \neq n}^N \sqrt{P_r} H_{n,i} x_i + u_n \quad (6)$$

其中 u_n 左边为地面小区 n 接收到的信号，服从零均值，方差为 N 的复高斯分布。式(6)左边为地面小区 n 接收到的信号，右边第一项、第二项分别为地面小区 n 处接收到的有用信号与波束间干扰。基于上述信号模型，本节将具

体介绍根据卫星各波束小区的业务流量以及信道容量，以最大化系统吞吐量与服务速率为目标的波束按需调度方法，为此需引入两个优化变量：自适应速率调节因子 $\mathbf{A}_r^{1 \times N}$ 与波束调度结果 $\mathbf{G}^{N_{\text{slot}} \times N}$ 。

首先，为避免在实际应用场景中地面小区业务流量需求大于经历阴影效应的星地链路的信道容量而引发的传输中断，需要对地面小区的流量进行一定的调控。本节引入自适应速率调节因子 $\mathbf{A}_r^{1 \times N} = \{A_m\}^{1 \times N}$ ， $A_m \in (0, 1]$ ，则经过速率调节的地面各小区等效请求流量 $\mathbf{T}_e$ 可表示为

$$\mathbf{T}_e = \mathbf{T} \circ \mathbf{A}_r \quad (7)$$

其中，若 $A_m=1$ 表示小区 n 的业务可以全速率得到服务，若 $A_m < 1$ 则表示由于星地链路信道条件不佳或者地面业务流量需求过大，小区 n 的业务流量需要进行一定的调节，以避免大量重传或通信中断。

其次，另一优化变量为波束调度结果 $\mathbf{G}^{N_{\text{slot}} \times N}$ ，可以表示为式(8)的形式，将整个服务过程划分为 N_{slot} 个子时隙，在每个子时隙中，卫星在 N 个波束小区中选择 $K(K < N)$ 个小区为目标波束指向进行模拟波束成形，对目标小区提供服务。

$$\mathbf{G}^{N_{\text{slot}} \times N} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_i, \dots, \mathbf{g}_{N_{\text{slot}}}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{g}_i^{1 \times N} = [g_{i,1}, g_{i,2}, \dots, g_{i,n}, \dots, g_{i,N}], g_{i,n} \in \{0, 1\}$$

其中， $\mathbf{g}_i$ 表示第 i 个子时隙的波束调度结果， $g_{i,n}=0$ 表示第 i 个子时隙中小区 n 没有波束进行服务，反之，则表示在第 i 个子时隙中小区 n 正在被服务。

在已知波束调度结果 $\mathbf{G}$ 与下行信道矩阵 $\mathbf{H}$ 的条件下，各时隙下 N 个波束小区对应的信道容量矩阵可以表示为 $\mathbf{C}^{N_{\text{slot}} \times N}$ 与式(8)类似的形式

$$\mathbf{C}^{N_{\text{slot}} \times N} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_i, \dots, \mathbf{c}_{N_{\text{slot}}}]^T, \mathbf{c}_i \in \mathbb{C}^{1 \times N} \quad (9)$$

其中，第 i 个子时隙中地面小区 n 处的信道容量 $c_{i,n}$ 可以通过第 i 个子时隙小区 n 处的信干噪比与波束调度结果 $\mathbf{g}_i$ 表示

$$c_{i,n} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r \|H_{n,n}\|^2}{kT_{\text{noise}} B + P_r \sum_{j=1, j \neq n}^N g_{i,j} \|H_{n,j}\|^2} \right), i = 1, \dots, N_{\text{slot}} \quad (10)$$

其中，令系统接收端噪声 u_n 的等效噪声功率为 $N=kT_{\text{noise}}B$ ， k 为玻尔兹曼常数， B 为该波束小区带宽， T_{noise} 为接收端等效噪声温度。则系统在卫星服务过程的下行等效信道容量 $\mathbf{C}_e^{1 \times N}$ 可以表示为

$$\mathbf{C}_e^{1 \times N} = \frac{1}{N_{\text{slot}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{slot}}} \mathbf{g}_i \circ \mathbf{c}_i \quad (11)$$

对低轨高通量卫星下行场景的波束调度进行最优化建模前，需要对下列3个关键因素进行约束：平均逗留时间 $\mathbf{W}_s$ 、同时生成的波束个数 K 以及系统中各波束小区间的服务公平性。

首先,由于按需波束调度本身的特性,无法实现对所有小区的同时服务,因此如何对系统中各小区数据包的时延进行控制是按需波束调度的关键问题之一。由于各小区的等效信道容量与请求流量 C_e 、 T_e 都以Mbit/s为单位,若以长度为125 KB的超帧结构对下行系统进行分组,则 C_e 、 T_e 可以以“超帧每秒”为单位进行度量。上文所述时延约束可以通过整个服务过程中各小区所有超帧在系统中的平均逗留时间 W_s 进行量化。

本节将一个小区建模为排队论中的 $M/M/1$ 模型,则以“超帧每秒”为单位的 C_e 、 T_e 可以分别视作每秒到达系统 T_e 个超帧的到达强度与系统每秒服务 C_e 个超帧的服务强度。此外,本文还假设地面用户处有理想的边缘缓存,则整个服务过程的服务强度可以由各时隙的服务强度之加权和得到,即

$$W_s = \frac{1}{\frac{1}{N_{\text{slot}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{slot}}} g_i \circ c_i - T \circ A_r} = \frac{1}{C_e - T_e} \leq \tau \quad (12)$$

其中, τ 为规定的最小平均逗留时间。

其次,需要对波束个数进行约束,卫星同时最多只能生成 K 个波束进行服务,所以 g_i 中最多只有 K 个非零元素,即

$$\|g_i\| \leq K, i=1, \dots, N_{\text{slot}} \quad (13)$$

最后,需要对系统中各波束小区间的服务公平性进行约束。由于系统的自适应速率调节因子 A_r 在0到1之间,信道状态较好的小区 n ,其自适应速率调节因子 A_{rn} 较大,对于信道状态较差的小区,其 A_{rn} 较小。因此出于各个波束小区公平性的考虑,需要对自适应速率调节因子 A_r 的最小值进行约束,以保证系统公平性,即

$$\eta \leq A_r \leq 1, \eta \in (0,1) \quad (14)$$

下面将基于空闲波束的调度策略对波束调度最优化问题目标函数进行讨论,总的地面等效请求流量所表征系统的吞吐量是目标函数需要考虑的指标之一,式(12)、式(13)作为约束条件,波束调度的最优化问题 P 可以表示为

$$P: \max_{G, A_r} C_e \cdot T_e \quad (15)$$

s.t. 式(12),式(13),式(14)

为了保证系统各小区速率调节的公平性,需要引入辅助变量 η ,对各小区速率调节因子 A_r 的最小值进行优化。因此,上述优化问题 P 需要拆分为两个问题,即通过优化问题 P_a 优先保证系统中小区间的服务公平性,之后再通过优化问题 P_b 完成波束的分配。优化问题 P_a 与 P_b 可以分别写成如下形式。

子优化问题 P_a : 系统公平性

$$P_a: \max_{G, A_r} \eta \quad (16)$$

s.t. 式(12),式(13),式(14)

为灵活调节系统对小区间公平性的要求,引入系统公平性系数 ρ , $\rho=1$ 表示系统将按最大公平性进行波束调度; $\rho=0$ 则表示系统将完全不考虑系统公平性,以最大化吞吐量为目标进行保护调度。式(14)系统公平性约束可以改写为

$$\rho \eta \leq A_r \leq 1, \rho \in (0,1) \quad (17)$$

子优化问题 P_b : 最大化系统吞吐量

$$P_b: \max_{G, A_r} C_e \cdot T_e \quad (18)$$

s.t. 式(12),式(13),式(18)

4 按需波束调度方案研究

低轨高通量卫星按需波束调度方案如图4所示。由于优化问题 P 以及其拆分的两个子问题 P_a 与 P_b 较为复杂,该优化问题的目标函数与两个优化变量 G 与 A_r 均有关,且波束调度结果 G 是离散的0-1矩阵,解空间较大,求解困难,因此本文考虑基于“松弛-离散”的思想,将问题分解为3步进行解决。

第一步,为了压缩离散的波束调度结果 G 带来的极大的解空间,本文将在不考虑各时隙中波束间干扰的条件下对问题 P 中的优化变量 G 进行松弛,得到线性规划问题 $\bar{P}$ 与其子问题 $\bar{P}_a$ 、 $\bar{P}_b$,对这些问题进行求解,得到的松弛优化变量波束调度结果 $\bar{G}$,相当于对小区的波束服务时间进行预分配,匹配各小区的波束服务时间与地面的业务流量需求。

第二步,需要根据第一步得到的预分配波束占用时间这一先验信息,确定服务过程中每个子时隙中的波束调度结果,即在每个时隙对松弛后的波束调度结果 $\bar{G}$ 基于与上文类似的目标函数进行离散。

第三步,将离散后的波束调度结果 G 带入未松弛的组合优化问题 P ,通过求解基于 G 的优化问题 P 得到上文所述的另一个优化变量:速率调节因子 A_r ,从而完成问题的求解。

4.1 松弛波束服务时间预分配

低轨高通量卫星波束调度方案中波束调度结果为 $G=\{0,1\}^{N_{\text{sat}} \times N}$, $g_{in}=0$ 表示第 i 个子时隙中小区 n 没有波束进行服务,反之,则表示在第 i 个子时隙中小区 n 正在被服务。因此,该波束调度问题 P 本质上是具有不同时间上的0-1整数约束的优化问题。由于波束调度结果 G 的解空间过于庞大,优化问题 P 中的两个优化变量 G 与 A_r 需要经过

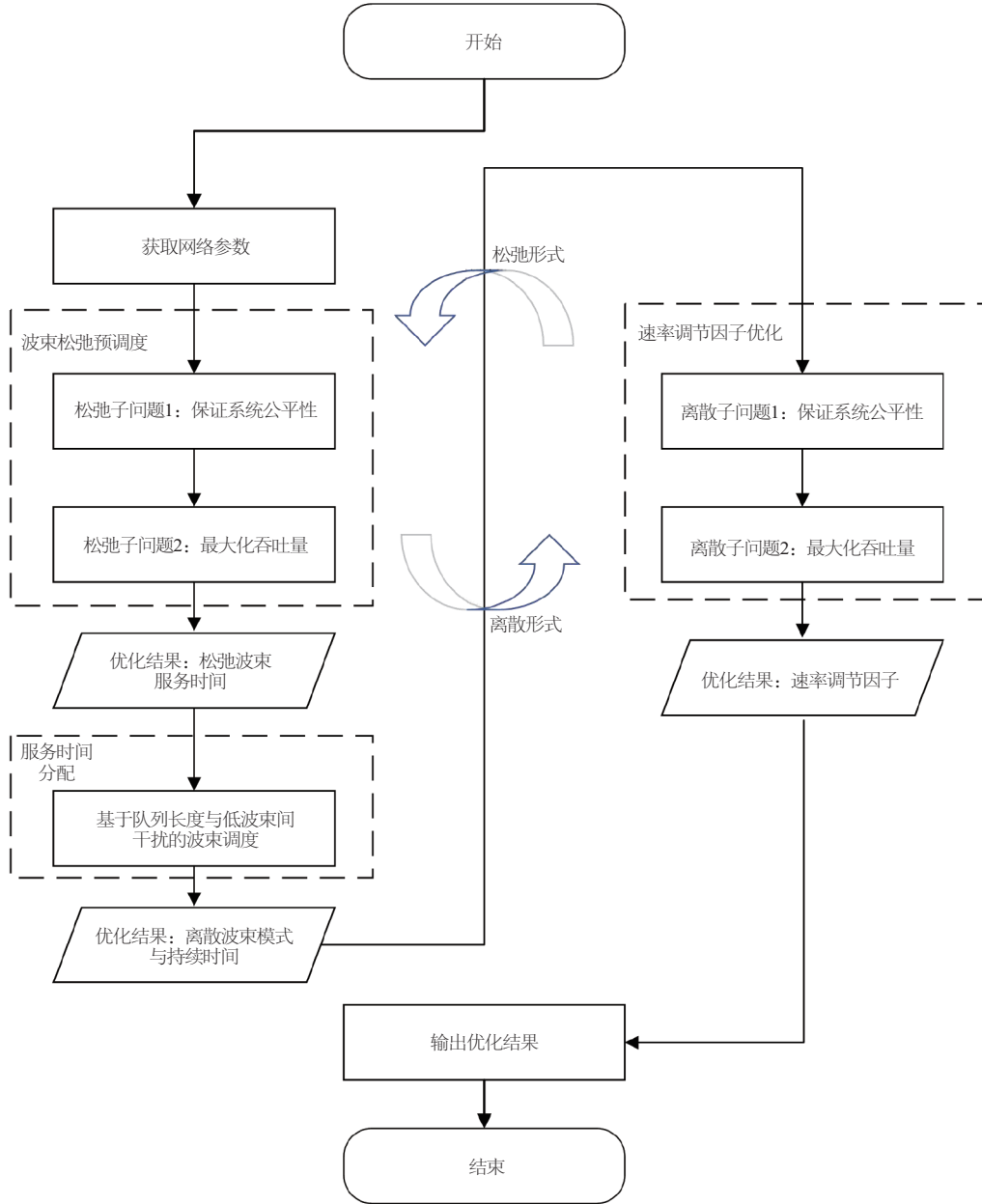


图4 低轨高通量卫星按需波束调度方案

松弛后使用其他方式来求解。

因此，本文将波束调度结果 $\mathbf{G}$ 对 N_{slot} 个子时隙求和并归一化，将波束调度结果 $\mathbf{G}$ 由0-1整数约束松弛为0-1间的实数约束 $\bar{\mathbf{G}}$ ，即

$$\bar{\mathbf{G}}^{1 \times N} = \{\bar{\mathbf{G}}_n\}_1^N, \bar{\mathbf{G}}_n \in (0, 1] \quad (19)$$

其中， $\bar{\mathbf{G}}_n$ 的物理意义为小区 n 占用波束占该卫星整个服务过程时间的比值。 $\bar{\mathbf{G}}_n=1$ 表示在该卫星整个服务过程中划分的所有子时隙上小区 n 始终占用波束；若 $0 < \bar{\mathbf{G}}_n < 1$ 则表示在整个服务过程中小区 n 只在部分子时隙上得到了波束服务。

此外，由于波束时间预分配的目的是对波束服务时间与地面流量进行初步的匹配，因此在对 $\mathbf{G}$ 进行松弛求解的过程中，忽略波束间干扰对信道容量的影响。基于上述前提，才能将原约束中 N_{slot} 个子时隙中的波束调度结果加权和等效为松弛后的各小区在整个服务过程中的占用波束时间，即

$$\mathbf{C}_e = \frac{1}{N_{\text{slot}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{slot}}} \mathbf{g}_i \circ \mathbf{c}_i = \bar{\mathbf{G}} \circ \mathbf{C}' \quad (20)$$

其中， $\mathbf{C}'$ 为不考虑波束间干扰的下行信道容量，即令式

(5)中的 $\alpha=0$ ，并代入式(10)计算得到的下行信道容量。则优化问题 P 的平均逗留时间约束，式(12)可以改写为

$$W_s^n = \frac{1}{\bar{G} \circ C' - A_r \circ T} \leq \tau \quad (21)$$

且原波束个数约束转变为对各小区占用波束时间占总时隙的比值的约束，即式(13)可改写为

$$\|\bar{G}\| \leq K, \bar{G}_i \in (0,1] \quad (22)$$

松弛后的子优化问题 $\bar{P}_a$ 与子优化问题 $\bar{P}_b$ 分别改写为

$$\begin{aligned} \bar{P}_a : \max_{\bar{G}, A_r} \quad & \eta \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(22), 式(23), 式(17)} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_b : \max_{\bar{G}, A_r} \quad & C_e \cdot T_e \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(22), 式(23), 式(18)} \end{aligned} \quad (24)$$

通过求解 $\bar{P}_a$ 、 $\bar{P}_b$ 分步求解问题 $\bar{P}_0$ ，以求得满足系统公平性约束的最佳松弛波束调度结果 $\bar{G}$ 。

4.2 基于最长队列与低波束间干扰的波束分配

在4.1小节中已经确定了时隙中各个小区占用波束时间即松弛波束调度结果 $\bar{G}$ ，在本小节中需要根据服务优先级、队列长度以及波束间干扰规划各个子时隙中的波束分配。

需要说明的是，本文考虑了三色复用方案，将工作频段划分成互相独立的3段，以保证相邻小区工作频段不同，从而避免波束间干扰。

下面介绍确定波束分配结果 g_i 及与该波束分配结果对应的时隙长度 τ_{beam}^i 的方法。

首先针对业务的不同，选择不同的优先级进行传输，如高优先级的连续业务小区与低优先级的数据传输业务小区。高优先级指的是不间断业务，如语音业务，要求连续传输；而低优先级业务如视频业务可以在一段时间内传输并缓存，因而可以间断。因此本文引入高优先级小区列表 L_a 以及低优先级小区列表 L_b ，即当波束小区 $n \in L_a$ 时，该小区业务类型为连续业务，反之，当波束小区 $n \in L_b$ 时，该小区业务类型为可缓存的数据传输业务，且有

$$L_b \cup L_a = L, L_b \cap L_a = \emptyset \quad (25)$$

在当前时隙的波束分配结果 g_i 中，只有在 L_a 中所有小区被分配之后，才会开始 L_b 中小区的分配。

其次，在进行 L_b 中小区的分配时，考虑基于最长队列的波束分配原则。根据小区内剩余的待分配服务量，对 L_b 进行排序。

由于地面流量分布的不均匀特性，本文所提出的波束调度方案考虑了空闲波束的重用，即针对部分小区地面业务流量已经被服务完毕，而其他小区仍有剩余，且

剩余流量的小区数小于激活的波束数 K 的情况，考虑采用空闲的波束对小区进行多重覆盖以避免资源的浪费，并提高系统的吞吐量。将空闲的波束指向当前服务列表中最靠前的波束小区。本文中为了避免多重覆盖提高系统的复杂度，仅考虑两重覆盖的情况。

最后根据当前波束分配结果 g_i 中最小的持续时间 $\bar{G}_n$ 确定 g_i 的持续时间 τ_{beam}^i 。

4.3 速率调节因子的优化

4.2小节中已经通过最长队列与低波束间干扰准则将松弛的波束占用时间 $\bar{G}$ 重新离散为了0-1二值的波束调度结果矩阵 g_i ，并计算得到了该波束分配结果 g_i 的持续时间 τ_{beam}^i ，本小节将根据上述优化结果，结合原优化问题，完成各小区速率调节因子 A_r 的优化。

时延约束中对各时隙信道容量的加权和，即等效信道容量 C_e 可以通过波束分配结果 g_i 与该波束分配结果持续的时隙数 τ_{beam}^i 计算得到

$$\begin{aligned} C_e &= \sum_{i=1}^{N_{\text{pattern}}} (g_i \circ c_i) \cdot \frac{\tau_{\text{beam}}^i}{N_{\text{slot}}} \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{pattern}}} \tau_{\text{beam}}^i &= N_{\text{slot}} \end{aligned} \quad (26)$$

其中， N_{pattern} 为波束分配结果数。则时延约束可以改写为

$$W_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{\text{pattern}}} (g_i \circ c_i) \cdot \frac{\tau_{\text{beam}}^i}{N_{\text{slot}}} - T \circ A_r} \leq \tau \quad (27)$$

在已知波束调度结果的条件下，依次求解原问题 P 的两个子问题 P'_a 与 P'_b

$$\begin{aligned} P'_a : \max_{A_r} \quad & \eta \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(28), 式(13), 式(14)} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} P'_b : \max_{A_r} \quad & C_e \cdot T_e \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(28), 式(13), 式(15)} \end{aligned} \quad (29)$$

即可得到在考虑波束间干扰条件下的速率调节因子 A_r 的优化结果。

5 算法仿真及分析

本节中将对以上所述按需波束调度方案进行仿真。为了验证所提出的波束调度方案的性能优势，本节将在不同地面流量强度系数 M 下，将本方案与传统的波束分配方案的结果进行对比分析；并且，由于波束间干扰无法通过本节所述方案进行彻底的消除，对系统吞吐量性能仍有较大影响。因此在本节中进行的对“松弛波束时间预分配”的仿真分析将基于“三色复用”频率复用方

案，而非“全频率复用”方案，以避免波束间干扰对信道容量的影响。

5.1 仿真参数说明

下面将说明性能仿真分析中的参数，以及用于对比的随机波束调度中波束服务时间与各小区速率调节因子的设计。仿真过程中用到的参数见表1。

表1 仿真参数设置

参数	值
波束调度相关参数	
卫星波束数 K	18个
波束小区数 N	37个
高优先级小区数 N_{priority}	2个
地面小区流量需求分布 T_n /(Mbit·s ⁻¹)	$T_n \sim M \cdot U(100, 1\ 000)$
时延约束 τ	0.2 s
系统公平性系数 ρ	0.8
卫星通信场景参数	
波束带宽 B	500 MHz
卫星轨道高度 L	600 km
3 dB波束宽度	4.6°
波束功率 P_t	20 dBW
载波频率 f_c	20 GHz
地面等效噪声温度 T_{noise}	300 K
卫星发射天线增益 G_t	50 dBi
移动终端天线增益 G_r	0 dBi
频率复用方案	三色复用

为了保证随机波束调度与按需波束调度两个方案比较的公平性，需对随机波束调度下的各波束小区也进行适当的速率调节。与按需波束调度相似，令 $\mathbf{G}^{1 \times N} = \{\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_n, \dots, \tilde{G}_N\}$ 为随机波束调度的波束服务时间，与式(10)类似，随机波束调度同样需要波束个数约束

$$\|\mathbf{G}\|_1 \leq K \quad (30)$$

假设在随机波束调度下，各波束小区服务时间相等，且各波束得到了充分的利用，则各小区的波束服务时间

$$\tilde{G}_n = K / N, \quad n=1, \dots, N \quad (31)$$

为计算随机波束调度的极限性能，在本小节随机波束调度的仿真中不再考虑自适应速率调节因子 $\tilde{A}_r$ 在各小区间的公平性，令 $\tilde{\mathbf{A}}_r = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n, \dots, \tilde{A}_N\}$ 仅需保证时延约束条件

$$\tilde{W}_s^n = \frac{1}{\tilde{G}_n C_n - \tilde{A}_n T_n} \leq \tau, \quad n=1, \dots, N \quad (32)$$

其中， $\tilde{W}_s^n$ 为随机波束调度方案中的平均系统等待时间。为给出随机波束调度吞吐量的极限值，令式(32)取等，则各小区的速率调节因子可以表示为

$$\tilde{A}_n = \frac{\tilde{G}_n C_n - \frac{1}{\tau}}{T_n}, \quad n=1, \dots, N \quad (33)$$

5.2 地面流量分布性能分析

本小节将分析地面流量的强度以及分布参数对系统吞吐量的影响。图5为在不同信道阴影、不同地面流量强度 M 的条件下，随机波束调度与按需波束调度系统吞吐量的对比。仿真结果显示，当地面流量强度系数 $M=1.4$ 时，所有按需波束调度方案的系统吞吐量均达到稳定。而且在此时，与随机波束调度相比，本文所述的波束按需调度方法在平均阴影信道下的吞吐量提高了18.31%。

首先，在地面流量负载强度 $M=1$ 时，重阴影信道下的吞吐量都有了一定的损失，这是因为即使是较轻地面负载的情况下，经历重阴影的星地链路也无法完全满足地面业务的需求，系统吞吐量低于当前地面流量强度下的极限吞吐量。不同负载强度的极限吞吐量可以表示为

$$\text{TP}(M) = M \cdot N \cdot E[T_n] \quad (34)$$

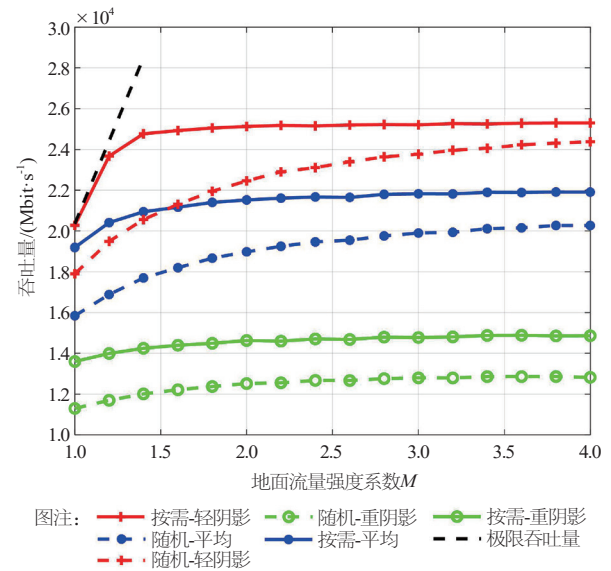


图5 随机波束调度与按需波束调度吞吐量的对比

其中， $E[T_n]$ 为地面流量分布的均值，由于本文假设地面流量服从均匀分布，即 $T_n \sim M \cdot U(100, 1\ 000)$ ，因此地面流量分布的均值为 $E[T_n] = M \cdot 550$ Mbit/s。当 $M=1$ 时，极限吞

吐量为 $TP(1)=2\ 0350\ \text{Mbit/s}$ 。由于带宽受限,仅有经历阴影的按需调度方案,凭借其较小的衰落影响与灵活的波束调度,可以在地面流量强度较低时达到系统当前极限吞吐量。随着负载强度的增加,几乎所有吞吐量曲线均在 $M=3$ 后趋于稳定,这是因为地面流量负载强度已经远超星地链路容量,系统的吞吐量仅取决于卫星信道的容量。

在相同条件下,波束调度方案调度由于阴影效应而信道容量较低的波束,这是提高系统吞吐量的关键。考虑ABDI等^[22-23]提出的Shadowed-Rician信道模型,随着阴影效应的减弱,按需波束调度与随机波束调度在吞吐量上的差距越来越小,即阴影越严重,按需波束调度对系统吞吐量的增益就越低。

5.3 波束调度方案性能分析

下面将分析基于最长队列与低波束间干扰的波束调度算法的性能,衡量基于最长队列与低波束间干扰的波束调度算法的性能指标为波束调度过程中激活波束的空间隔离效果。

图6中分别考虑了“随机波束调度”“半按需波束调度”以及“按需波束调度”,其中“半按需波束调度”是指在上述的波束调度方法中,不考虑波束间干扰,只基于最长队列的原则进行波束调度,通过对“半按需波束调度”方案的分析可以进一步证实方案中引入空间隔离的作用。

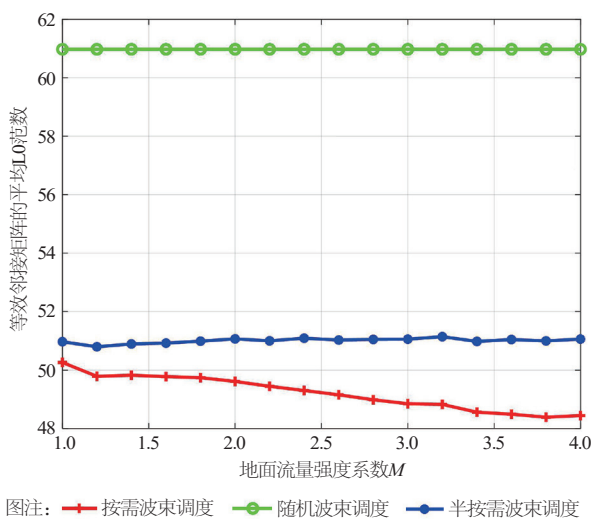


图6 随机波束调度与按需波束调度的空间隔离效果对比

本小节将邻接矩阵 $A^{N \times N}$ 中对应 K 个激活波束小区的行和列抽出,重新组合成一个 $K \times K$ 维等效邻接矩阵 $\tilde{A}^{K \times K}$,其物理意义为描述当前时隙的选择的波束是否相邻。

由图6可见,当地面流量强度升高时,按需波束调

度中基于低波束间干扰的调度准则,通过贪婪算法选择波束选择代价最低的波束提高波束等效邻接矩阵的稀疏性。“随机波束调度”的波束空间隔离效果与地面流量强度无关,“半按需波束调度”只选择最长队列进行服务;又由于地面流量分布均匀,所以可以通过将波束快速服务完毕以获得波束隔离效果的提升;但同样与地面流量强度及信道状态无关。这里就不再赘述其他信道状态下的空间隔离效果。

作为波束调度的性能指标,波束的稀疏度与系统中激活的波束个数有密切的关系。图7为平均阴影下 $M=1.4$ 时不同波束调度方案的空间隔离程度与激活波束个数的关系,可见按需波束调度可以在一定程度上降低矩阵的稀疏程度。

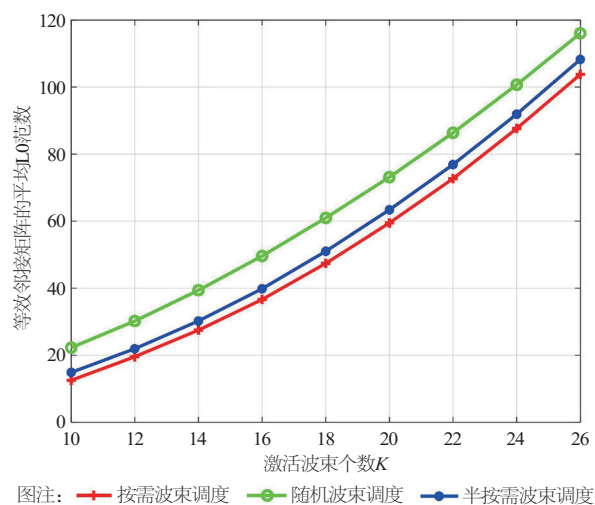


图7 平均阴影下 $M=1.4$ 时不同波束调度方案的空间隔离程度与激活波束个数的关系

参考文献：

- [1] PEREZ-NEIRA A I, VAZQUEZ M A, SHANKAR M R B, et al. Signal processing for high-throughput satellites: challenges in new interference-limited scenarios[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(4): 112-131.
- [2] VIDAL O, VERELST G, LACAN J, et al. Next generation High Throughput Satellite system[C]//Proceedings of 2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [3] GUAN Y, GENG F, SALEH J H. Review of high throughput satellites: market disruptions, affordability-throughput map, and the cost per bit/second decision tree[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(5): 64-80.

- [4] 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(自然科学版), 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 (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 25-30.
- [5] 韩慧鹏. 国外高通量卫星发展概述[J]. 卫星与网络, 2018(8): 34-38.
HAN H P. An overview of the development of high-throughput satellites abroad [J]. Satellite & Network, 2018(8): 34-38.
- [6] 刘悦. 国外高通量卫星系统与技术发展[J]. 国际太空, 2017(11): 42-47.
LIU Y. The development of foreign high-throughput satellite systems and technologies[J]. Space International, 2017(11): 42-47.
- [7] 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.
- [8] ANZALCHI J, COUCHMAN A, GABELLINI P, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system simulation and performance comparison with non-hopped systems[C]//Proceedings of 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.
- [9] ALEGRE G R, ALAGHA N, VÁZQUEZ-CASTRO M A. Offered capacity optimization mechanisms for multi-beam satellite systems[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 3180-3184.
- [10] CHOI J P, CHAN V W S. Resource management for advanced transmission antenna satellites[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1308-1321.
- [11] KOOSHA B, HELGERT H J, KARIMIAN R. A hybrid beam hopping design for non-uniform traffic in HTS networks[C]//Proceedings of 2019 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-2.
- [12] ZHANG T, ZHANG L X, SHI D Y. Resource allocation in beam hopping communication system[C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [13] WANG L, ZHANG C, QU D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 925-929.
- [14] TIAN F, HUANG L L, LIANG G, et al. An efficient resource allocation mechanism for beam-hopping based LEO satellite communication system[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [15] SHI D Y, LIU F, ZHANG T. Resource allocation in beam hopping communication satellite system[C]//Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 280-284.
- [16] 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.
- [17] ZHANG Y C, HU X, CHEN R, et al. Dynamic beam hopping for DVB-S2X satellite: a multi-objective deep reinforcement learning approach[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conferences on Ubiquitous Computing & Communications (IUCC) and Data Science and Computational Intelligence (DSCI) and Smart Computing, Networking and Services. Piscataway: IEEE Press, 2019: 164-169.
- [18] LEI L, LAGUNAS E, YUAN Y X, et al. Deep learning for beam hopping in multibeam satellite systems[C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [19] LEI L, LAGUNAS E, YUAN Y X, et al. Beam illumination pattern design in satellite networks: learning and optimization for efficient beam hopping[J]. IEEE Access, 2020, 8: 136655-136667.
- [20] JIA M, ZHANG X M, GU X M, et al. Interbeam interference constrained resource allocation for shared spectrum multibeam satellite communication systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6052-6059.
- [21] YANG L, ZHANG Y, LI X, et al. Radio resource allocation for wideband GEO satellite mobile communication system[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [22] ABDI A, LAU W C, ALOUINI M S, et al. A new simple model for land mobile satellite channels: first- and second-order statistics[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(3): 519-528.
- [23] 阮玉晗. 面向新型混合星地网络的资源分配与性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
RUAN Y H. Resource allocation and performance analysis for new-type hybrid satellite-terrestrial networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[作者简介]



韩帅（1981-），哈尔滨工业大学教授，博士生导师，主要研究方向为卫星通信、宽带无线通信、物理层安全等；主持国家自然科学基金青年项目、国家自然科学基金面上项目、中央高校基本科研业务费重大专项资金资助项目、中国空间技术研究院创新基金项目等国家及省部级科研项目20余项；获黑龙江省科技进步奖二等奖2项；发表论文100余篇，获授权国家发明专利40项。



吴宜航（1999-），哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为信道编解码和卫星通信。



李季蹊（1997-），哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为低轨卫星互联网和物理层安全。



陈祖挺（2000-），哈尔滨工业大学本科生，主要研究方向为卫星网络接入和链路调度。



孙思月（1985-），中国科学院微小卫星创新研究院研究员，硕士生导师，中科院青促会会员、上海市青年扬帆计划人才、中科院上海分院青年英才，一直专注于卫星移动通信研究；作为项目负责人，主持国家自然科学基金、中科院国防重点实验室基金等多项国家及省部级科技项目，参与了遥感三十号、行云天基物联网通信载荷等多个重大卫星工程项目研制，申请发明专利22项，发表论文30余篇。



梁广（1983-），中国科学院微小卫星创新研究院研究员，硕士生导师，中科院青促会成员（优秀会员），上海市拔尖人才计划、启明星计划成员，主要研究方向为卫星通信及星载相控阵天线技术；主持国家自然科学基金、上海市自然科学基金、科学院国防创新基金等多项国家科技项目，获得省部级奖励和荣誉称号4项；发表学术论文30余篇，申请发明专利20余项。