

卫星星座网络容量密度评估

孟贤, 秦大力, 汪宇, 孔垂丽, 罗禾佳, 王俊
(华为技术有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要: 采用传统分析方法在较低波束密度场景下会极大低估系统的吞吐能力, 且无法揭示出高波束密度场景下出现的容量饱和现象。为了克服上述问题, 提出一种全新的系统仿真方法, 以对卫星网络及星地一体化网络的容量密度指标进行精确评估。基于此方法, 首先, 评估地球不同经纬度区域的容量密度, 可以观察到, 随着卫星运动, 相同地区的容量密度变化较大, 其最大最小容量密度的比值可达两倍; 其次, 可见性越高的地区通常具有更高的容量密度, 高频场景下, 气衰对容量密度的影响不可忽略; 最后, 针对星地融合系统, 评估结果显示蜂窝覆盖和卫星覆盖的容量密度可以相差 4 个数量级。为了提升星座容量密度, 尝试用提升最大点亮波束数和提升卫星规模两种技术路径。结果显示, 在星座总波束相同的情况下, 提升卫星规模时性能更优; 但两种提升星座总波束数的方式都存在容量上界, 且边际效应显著下降。为此, 最后提出提高卫星天线增益的方案, 仿真结果表明所提方案可以显著提升星座容量密度。

关键词: 大规模低轨卫星星座; 容量密度; 星地融合网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023032

Capacity Density Assessment of Satellite Constellation Network

MENG Xian, QIN Dali, WANG Yu, KONG Chuili, LUO Hejia, WANG Jun
Huawei Technologies Co., Ltd., Hangzhou 310052, China

Abstract: The traditional analytical method greatly underestimates the throughput capability of the system in low beam density scenario, and cannot reveal the capacity saturation phenomenon in high beam density scenario. To overcome the preceding problems, a new system simulation method was proposed to accurately evaluated the capacity density indicator of satellite constellation network and integrated satellite and terrestrial network. Based on this method, first, the capacity density of different longitude and latitude regions of the earth was evaluated. It could be observed that the capacity density of the same region varies greatly with the movement of the satellite, and the maximum capacity density was twice the minimum. Then, areas with higher visibility usually had higher capacity density. In high-frequency scenarios, the impact of atmospheric attenuation on capacity density could not be ignored. Finally, for the integrated satellite and terrestrial network, the evaluation results showed that the capacity density of cellular coverage and satellite coverage could differ by four orders of magnitude. In order to improved the capacity density of satellite constellation network, two technical paths were attempted: increasing the maximum number of illuminated beams and increasing the satellite scale. The results showed that the performance was better when the constellation scale was increased when the total beams of the constellation were the same. However, the two ways to increase the total number of beams in a constellation had an upper bound on capacity, and the marginal effect decreased significantly. Finally, a scheme to increase the gain of satellite antenna was proposed. The simulation results showed that the proposed scheme could significantly increase the capacity density of constellation.

Keywords: large-scale LEO satellite constellations, capacity density, integrated satellite and terrestrial network

0 引言

下一代移动通信期待建成星地融合通信网络, 该网络

由地面网络、临近空间网络和天基网络组成, 在通信体制和通信架构上深度融合^[1-3]。为了实现这个宏伟的愿景, 3GPP 发起了创新的非地面网络 (Non-Terrestrial Network,

NTN) 的标准化工作, 目标是研究一系列协议的适配, 使得 5G 新空中接口 (New Radio, NR) 协议可以应用于卫星通信系统^[4]。通过这种方式, 运营商可以利用移动蜂窝生态系统及其规模经济来共同发展卫星通信。由于低轨通信卫星具有灵活、广覆盖、高带宽和低时延的特点, 越来越多的商用卫星系统采用大规模低轨通信星座并搭配自研的通信体制来部署全球化的移动宽带服务, 例如 OneWeb、Kuiper、Starlink。其中, 截至 2023 年 7 月, Starlink 已经部署了 4 516 颗在轨卫星^[5], 并申请了超过 3 万颗卫星的轨道资源。此外, 已经陆续有公司开始测试并部署直联蜂窝手持终端的卫星通信服务, 例如 AST SpaceMobile 已完成通过标准蜂窝手机经测试卫星拨通地面蜂窝网络的测试, Starlink 已经申请通过和 T-Mobile 合作利用其频谱在第二代卫星上部署直联手机载荷。

面对众多不同星座构型、载荷能力、通信体制的通信系统, 亟须一套统一的指标来衡量这些通信系统的通信能力。基于该指标, 可以和成熟的地面蜂窝系统进行对比。从 ITU 的评估标准来看, 参考文献[6]提出了 IMT-2020 的 13 个最小空中接口技术指标。参考文献[7]规范了这 13 个指标的评估方法, 即采用相应的分析、审视和仿真来进行评估。具体来说, 采用静态拓扑和系统仿真的方法来评估终端用户的用户平面和控制平面的基本性能指标。参考文献[8]进一步提出作为地面蜂窝系统补充的卫星空中接口技术的愿景、需求和评估方法。此外, 学术界已经针对以上指标在不同星座系统和不同协议体制下进行了评估。例如, 参考文献[9]用卫星电视广播标准 (DVB-S2X) 体制比较了几个典型的大规模通信星座的最大容量。参考文献[10]评估了 MEO 星座采用 DVB-S2X 体制的系统容量情况。对于 NR NTN 系统, 3GPP 在参考文献[11]中给出 S 频段和 Ka 频段在 LEO/GEO 轨道上单星的终端吞吐性能。参考文献[12]基于参考文献[11]中的仿真方法, 进一步给出地球不同纬度上的容量密度。参考文献[13-16]评估了控制平面的接入指标和切换指标。在这些性能指标当中, 吞吐类的指标是衡量系统通信能力的关键, 其中区域业务容量指标 (容量密度) 可以表示在区域单位面积上的总业务流量, 相较终端用户的评估指标, 容量密度可以进一步反映卫星星座特性带来的在不同区域的性能差异, 相较系统总容量, 容量密度又可以反映地球不同区域的容量差异, 因此本文将重点聚焦于该指标的评估上。

即便是对于系统吞吐的评估, 不同的评估方法也大相径庭。参考文献[9]采用蒙特卡洛统计的分析方法, 对随时间变化的卫星位置、气衰等进行随机统计, 但

存在干扰和业务建模过于简单, 且没有考虑空中接口协议开销的问题。3GPP 在参考文献[11]中基于地面蜂窝的系统仿真方法, 对单星场景进行仿真, 但该仿真方法只定义了单星多波束的静态拓扑场景, 无法扩展到星座级别的仿真。参考文献[12]基于单星仿真的平均频谱效率结果, 用数学分析得到了 Walker 星座每纬度的可见卫星数, 并进一步拓展得到每纬度的容量密度, 但是该方法的不足之处是没有考虑单星的波束调度以及多星间的波束调度和干扰。参考文献[17-19]显示针对卫星系统中地面业务分布不均的场景, 采用跳波束技术可以显著提升不同轨道高度的卫星系统吞吐量和覆盖范围。参考文献[20]给出了详细的高轨卫星系统仿真建模方法。参考文献[21]进一步提出低轨卫星星座的跳波束系统仿真建模方法, 并考虑了多星间的波束调度和干扰。但该方法依然欠缺对卫星动态拓扑的建模, 无法反映卫星的运动造成的影响。此外, 仿真区域周边的干扰建模也不够充分。

根据以上观察, 针对星座系统吞吐仿真建模问题, 现有文献和标准未充分考虑星座的动态拓扑特性、多星多波束调度和干扰等因素, 欠缺一套完整且准确的建模方法论和仿真体系。基于此, 本文在 3GPP NTN 单星系统仿真基础上, 提出建模星座的动态拓扑模型和多星多波束的调度模型, 重新定义了仿真场景的部署方式, 梳理出一整套切实可行的空中接口吞吐仿真方法。基于所提出的仿真方法论, 评估了地球不同地理区域的容量密度, 并和参考文献[12]的分析方法结果进行了对比。同时, 本文构建了星地融合通信网络场景, 对星座通信系统和地面蜂窝系统的容量密度进行评估对比。最后, 对提升星座容量密度的 3 种典型技术路径进行了探索。

1 容量密度分析方法及其不足

1.1 容量密度的分析方法

ITU-R^[8]中关于区域容量密度的定义为每个地理区域服务的总吞吐量 (以 Mbit/s/km^2 为单位)。吞吐量是指在一定时间内正确接收的比特数, 即传送到上层的业务数据单元中包含的比特数。基于平均频谱效率、网络部署 (例如 TRxP (站点) 密度) 和带宽可以推导出容量密度。设 W 表示信道带宽, ρ 表示 TRxP 密度 (TRxP/km^2)。区域容量密度 C_{area} 与平均频谱效率 SE_{avg} 的关系如下

$$C_{\text{area}} = \rho \cdot W \cdot \text{SE}_{\text{avg}}$$

其中, 信道带宽可以定义为实际带宽乘以频率复用因子。平均频谱效率 SE_{avg} 是单个 TRxP 内所有用户吞吐量之和

(一段时间内正确接收的比特数)除以信道带宽再除以波束数量,用 bit/s/Hz/TRxP 来衡量。在卫星通信领域,一个 TRxP 可以认为是一个波束。假设系统包含 N 个用户 M 个波束,通过蒙特卡洛仿真的方法可以得到 SE_{avg} 的表达式为

$$\text{SE}_{\text{avg}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{drops}}} \sum_{i=1}^N R_i^{(j)}(T)}{N_{\text{drops}} \cdot T \cdot W \cdot M}$$

其中, SE_{avg} 通过 N_{drops} 次撒点仿真求平均得到, $R_i^{(j)}(T)$ 表示用户 i 在第 j 次撒点在时间 T 内的总吞吐比特数, W 表示信道带宽, T 是仿真时长。

可以看出,当前 ITU-R 中关于卫星场景容量密度的评估需要先通过系统仿真得到单星单波束的平均频谱效率,接着乘以信道带宽后得到单波束的吞吐,最后再平均到单个波束的覆盖面积内。基于此,可以将单波束场景扩展得到单星的容量密度计算公式

$$C_{\text{area}}^{\text{sat}} = C_{\text{area}}^{\text{beam}} \cdot N_{\text{beams}} \cdot A_{\text{beam}} / A_{\text{sat}}$$

其中, $C_{\text{area}}^{\text{beam}}$ 是单波束的容量密度, N_{beams} 是单颗卫星的波束数, A_{beam} 是波束的覆盖面积, A_{sat} 是卫星的覆盖面积,一般由卫星高度和最低用户仰角决定。

得到单星容量密度后,可以进一步推导星座的容量密度。首先,单壳层星座在地球上任意位置的可见卫星数由参考文献[12]中的公式给出

$$N_{\text{visible}} = \frac{N_{\text{sat}}}{\pi^2 \sin \alpha} \int_p^q \frac{\beta_{\text{max}}^2 - (x - \lambda)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin x}{\sin \alpha}\right)^2}} dx$$

其中, $p = \max\{-\alpha, \lambda - \beta_{\text{max}}\}$, $q = \min\{\alpha, \lambda + \beta_{\text{max}}\}$, N_{sat} 是壳层卫星总数,等于轨道数乘以每轨卫星数, α 是卫星的倾角, β_{max} 是最大半张角, λ 是该区域的纬度。因此,单壳层星座在地球任意位置的容量密度为

$$C_{\text{area}}^{\text{shell}} = C_{\text{area}}^{\text{sat, shell}} \cdot N_{\text{visible}}^{\text{shell}}$$

最终,对于给定星座在地球上任意位置的容量密度,可以先计算每个壳层的容量密度 $C_{\text{area}}^{\text{shellid}}$,再把所有壳层相加得到,即

$$C_{\text{area}}^{\text{constellation}} = \sum_{\text{shellid}=1}^{N_{\text{shells}}} C_{\text{area}}^{\text{shellid}}$$

1.2 分析方法的不足

上述方法基于单星单波束的平均频谱效率进行分析和仿真,对于多星场景,由于不同区域不同卫星波束的业务模型和负荷、波束仰角和覆盖等不同,某个波束的平均频谱效率无法扩展到其他波束。此外,考虑到星座覆盖的动态拓扑特性,还需要考虑星座波束密度造成的波束间干

扰情况差异、不同地区气衰差异(特别是高频场景)。然而,参考文献[11]中采用固定拓扑的方式进行仿真,并没有考虑上述两个因素对频谱效率的影响。为了说明波束间干扰情况和气衰的影响,本文假设以下不同规模卫星数的倾斜轨星座,见表1。卫星载荷及终端的仿真参数见表2。本文采用蒙特卡洛静态方法,按时间划分多个快照来模拟卫星运动,每个快照下采用最简单的波束调度策略,即每颗卫星尽量服务高仰角区域,但须满足波束间 50 km 隔离距离。仿真统计了所有快照下所有下行波束中心点的干扰噪声比(INR)、信噪比(SNR)以及信干噪比(SINR)。

表1 不同规模卫星数的倾斜轨星座

星座	轨道数/个	每轨卫星数/颗	卫星总数/颗	轨道高度/km	倾角/(°)
A	40	40	1 600	500	55
B	70	70	4 900	500	55
C	100	100	10 000	500	55

表2 卫星载荷及终端的仿真参数

参数	低频卫星移动通信业务	高频卫星移动通信业务
频点/GHz	2	27
信道带宽/MHz	5	5
使用带宽/MHz	4.5	4.5
发射天线增益/dB	38	38
EIRP/dBW	58	70
最小用户仰角/(°)	25	25
终端接收天线增益/dB	-5	-5
终端天线噪声系数	7	7
气衰/dB	0.2	50%可用度
极化损失/dB	3	3
人体吸收损失/dB	2.5	2.5

首先,为了分析波束间干扰的影响,本文仿真了低频场景,包括星座 A 同频复用 1 次、星座 A 同频复用 4 次、星座 B 同频复用 4 次、星座 C 同频复用 4 次这 4 种情况,其同频波束数分别是 1 600 个、6 400 个、19 600 个、40 000 个。结果如图 1 所示,可以看到随着星座规模以及频率复用次数的增加,INR 显著增加。通常可以用波束干扰规避的手段来降低波束间干扰,比如增加波束间的隔离距离,但该方法会限制同时激活的波束数量。

为了观察气衰在不同地理位置的影响,本文仿真了低频星座 B 同频复用 1 次、高频星座 B 同频复用 1 次这两种情况。仿真结果显示低频场景下覆盖范围内的 SINR 基本一致,而高频场景下不同区域则较明显受气衰的影响,最

高 SINR 和最低 SINR 间的差异超过 2 dB。

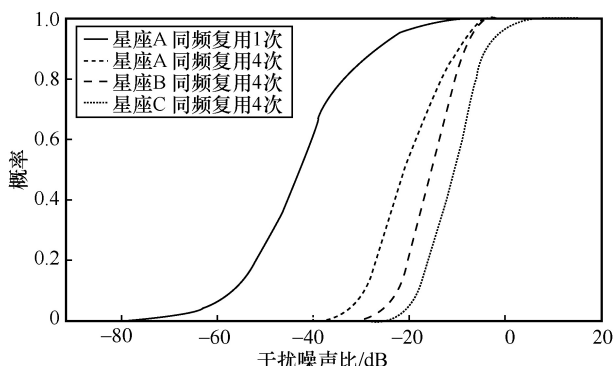


图1 不同星座规模 and 同频复用次数下的波束 INR 分布

根据以上分析可知,在评估容量密度时无法忽略波束间干扰和衰减的影响,而参考文献[7]和[11]的容量密度分析方法未能考虑上述两个因素。参考文献[11]的仿真假设基于单星场景,采用了移动蜂窝系统中常规的固定拓扑的仿真场景来建模。然而,实际星座网络的移动性会带来网络拓扑高动态变化、覆盖的多重性和时变性,以及全球业务的不均衡性。因此,基于固定拓扑的仿真不适用于星座仿真场景,需要设计新的评估方法。

2 系统仿真方法和模型

由于建模完整的星座动态拓扑和通信协议过于复杂^[22-23],为了寻求准确度和仿真速度的平衡,本文提出切片的方法。具体而言,把动态拓扑周期性地切割成多个具有静态拓扑的时间片,然后在每个静态拓扑时间片内部用 3GPP TR 38.821^[11]的系统仿真方法进行仿真。下文将提出动态拓扑模型,以及基于此模型的仿真场景设置和系统间仿真考虑。

2.1 动态拓扑模型

系统仿真的拓扑模型一般包括基站、小区、波束、终端、终端和小区的关联关系以及波束和小小区的关联关系。本文的动态拓扑模型包含以下 3 种状态:动态、半静态和静态。其中,由于卫星(基站)高速运动,因此建模为动态;小区基于地面固定波位,因此建模为静态;波束策略采用凝视波束,即在任一切片内,任一波束的地面覆盖区域不变,而在切片间可以调整波束的覆盖区域,因此建模为半静态;由于不对终端的移动进行建模,而是初始化时在波位内随机散点,因此终端建模为静态;此外,波束和小小区之间的关联关系在切片内固定,而切片间可重新关联,因此建模为半静态。拓扑模型动态特性见表 3。

表 3 拓扑模型动态特性

拓扑模型	传统静态拓扑	动态拓扑
基站	静态	动态
小区	静态	静态
波束	静态	半静态
终端	动态	静态(速度可以忽略)
小区和终端关联	静态(仅在切换时变化)	静态
波束和小小区关联	无	半静态

2.1.1 基站模型

仿真基于多层星座,每层可以按照常规的 Walker 星座来建模,即倾斜轨的 Walker Delta 或者近极轨的 Walker Star。卫星是持续运动的,运动模型可以采用 J2 扰动模型^[24],兼顾精度和计算复杂度。本文重点关注空中接口技术的容量密度指标,仿真架构中不需要包含核心网,并且如果不需要仿真卫星间的协调,那么 Xn 接口也可以忽略,从而可以不建星间链路,即每颗卫星都是独立基站。

3GPP TR 38.821^[11]中用基于 UV 平面坐标系统的正六边形网格划分,采用图 2 所示的基于簇复制的 Wrap Around 方法。这种建模方式在地面上实际覆盖面积大小不一,且在卫星边缘区域波束覆盖畸变,如图 3 所示。

基于此,本文考虑在地面划分出连续覆盖的六边形网格作为小区,每一个六边形网格称为波位。这和地面蜂窝系统的小区划分方法类似,便于通过类似地面蜂窝成熟的小区管理机制来管理,同时由于卫星波束的覆盖直径可达几十千米,地面终端在仿真周期内往往不会发生切换,因此可以极大降低移动性管理的仿真开销,从而提升仿真速度。H3 网格是一个开源的地理空间索引系统,将地球表面划分为多层次的六边形网格,是一种较好的网格划分实现。

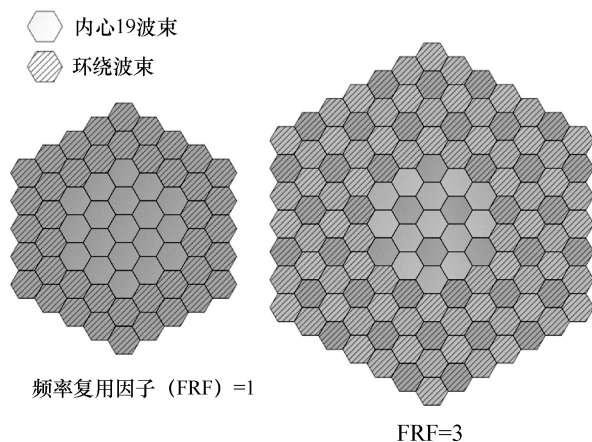


图2 基于簇复制的 Wrap Around 方法

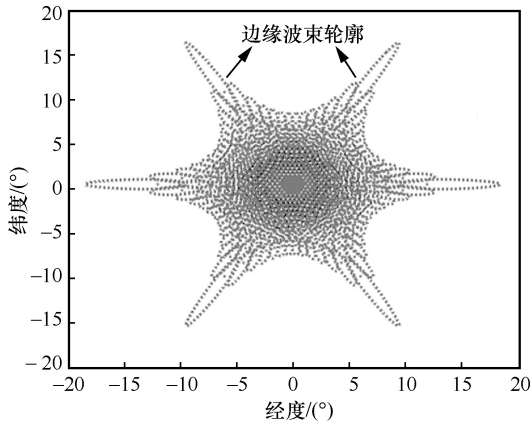


图3 基于UV平面波位生成方法在覆盖边缘畸变

2.1.2 波束模型

由于卫星覆盖区域大,即使在大规模低轨卫星多波束通信系统中,其波束的数量也远小于波位数量,因此可以采用跳波束作为基本的波束管理模型。参考文献[26]中显示,星链在地面的六边形网格直径大约是 24.13 km。全球面积按 5.1 亿平方千米计算,覆盖全球需要接近 135 万个波位。而根据星链公开申请文献^[27],第一代卫星总数为 4 408 颗,并假设每颗卫星可以发射 16 个波束,那么其波束波位比大约是 5.23%。

基于跳波束的系统仿真流程总体来说分为两个步骤^[9]:第一,建立卫星和波位的关联关系,即波位划分,由于卫星的移动,需要在一定时间后对波位重新进行划分;第二,根据卫星的最大波束数(同时)在波位划分周期内按照一定周期对某些波位进行服务,该过程称为波束点亮过程,该时间周期称为波束点亮周期。图4展示了在某个波束点亮周期内的波位划分和点亮情况。不同卫星的波位区域用粗线进行了划分,其中深色的波位代表被点亮,浅色的波位代表没有被点亮。

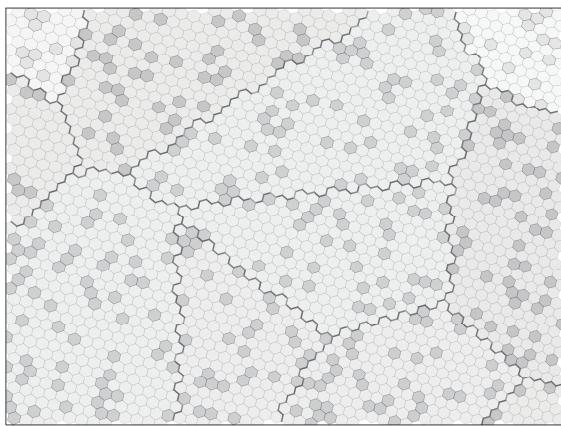


图4 波位划分及点亮情况示意

2.1.3 终端模型

用户独立在仿真区域内分布,随机配置视距(Line of Sight, LoS)/非视距(Non Line of Sight, NLoS)信道。相比于卫星的运动速度,在较短的仿真周期内,终端的运动速度基本可以忽略,一般不会发生终端运动引起的切换。因此,可以假设终端都是静止的,切换只会由波位的划分引起,在波位划分周期结束时更新终端和卫星波束的连接关系。

2.1.4 静态拓扑内仿真

在一个跳波束点亮周期内,点亮波束和波位的关系保持不变,即生成一个时间片的静态拓扑。该静态拓扑和 3GPP TR 38.821^[11]中定义的仿真拓扑基本一致,只是地面波位形成方式和卫星运动需要做一些适配。在 3GPP NTN 标准形成过程中,已经开发了基于 3GPP TR 38.821^[11]的仿真假设的仿真系统,并完成了校准。在进一步适配后,该仿真系统既具备空中接口技术系统仿真的基本准则(参考 ITU-R M.2412^[7]),又支持卫星移动下的地面固定波束。

(1) 满足用户独立在仿真区域内撒点,随机配置 LoS/NLoS 信道。

(2) 满足信号衰落和干扰总和计算。

(3) 满足采用标准规定的业务模型。

(4) 满足多用户的调度器调度,包含信道质量反馈时延、反馈错误、协议数据单元(Protocol Data Unit, PDU)错误、真实信道估计效应、信道估计错误、包重传等。

(5) 满足真实建模 L1 和 L2 的开销,例如 L1 的同步、保护带、中心子载波、导频和循环前缀等, L2 的公共控制信道、混合自动重传请求反馈信令、信道反馈、随机接入、包头和循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)等。

(6) 更新地面波位,替换成球面六边形网格,不再用 UV 平面生成小区。

(7) 更新卫星位置和卫星天线姿态。

2.2 仿真场景设置

基于以上动态拓扑模型,还需要设置相应的仿真场景,包括设置仿真区域、部署卫星和选择调度算法。

2.2.1 设置仿真区域

为了仿真目标区域的星座容量密度,首先需要建模该区域边缘地区的干扰。采用对该目标区域进行扩展的方式,即扩大仿真区域,进而计算干扰。扩展方式分为按区域扩展和按卫星覆盖扩展。前者是在目标区域外,增加一定的干扰区域共同作为仿真区域,使得目标区域的干扰得

到充分统计,如图5所示。而后者将所有能够覆盖到目标区域的卫星所能覆盖到的区域作为仿真区域,如图6所示。本文采用按区域扩展的仿真区域设置方式进行仿真。

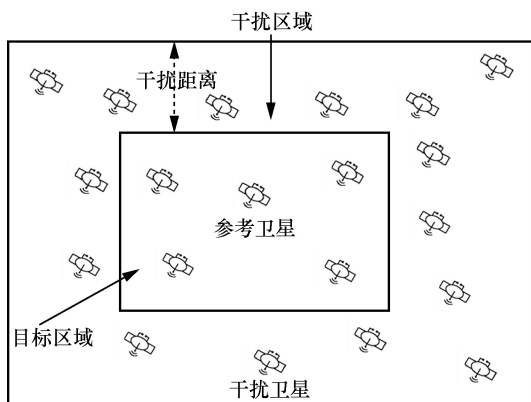


图5 仿真区域按区域扩展

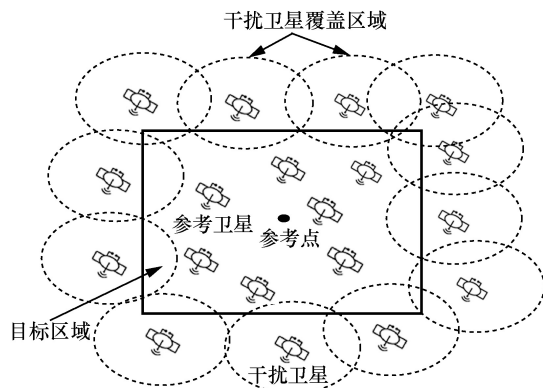


图6 仿真区域按卫星覆盖扩展

2.2.2 部署卫星

卫星的部署方式分为两种,可以根据星座中每颗卫星在某个时刻的实际位置去部署,也可以根据不同区域卫星可见数量随机部署。在真实部署情况下,根据每颗卫星的轨道参数可以得到每颗卫星在任意时刻的位置,进而可以确定它们的经纬高坐标。本文选择经纬坐标在仿真范围内的卫星作为仿真卫星。在真实部署情况下,仿真结果可能取决于仿真开始时间,为了避免该问题,需要仿真较多的快照。因此,也可以根据仿真区域内卫星的可见性来随机部署卫星。对于仿真区域内可见性较平均的区域,可以通过以下方法简单部署。首先,计算仿真区域内每壳层的可

$$N_{\text{visible of target}}^{\text{pershell}} = N_{\text{visible}}^{\text{shell}} \frac{A_{\text{target}}}{C_{\text{satellite}}}。$$

其中, $N_{\text{visible}}^{\text{shell}}$ 为仿真区域平均可见卫星数, A_{target} 为仿真区域面积, $C_{\text{satellite}}$ 为该壳层卫星覆盖面积,可由卫星高度和最小用户仰角得到

$$C_{\text{satellite}} = 2\pi R_e^2 \left(1 - \cos \left(\arccos \frac{R_e \cos e_a}{R_e + h} - e_a \right) \right)$$

其中, R_e 为地球平均半径, h 为卫星高度, e_a 为用户最小仰角。

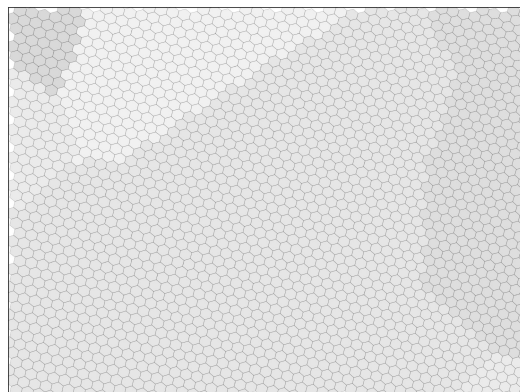
仿真区域内平均可见卫星数为各壳层的可见卫星数之和

$$N_{\text{visible of target}}^{\text{constellation}} = \sum_{\text{shellid}=1}^{N_{\text{shells}}} N_{\text{visible of target}}^{\text{shellid}}$$

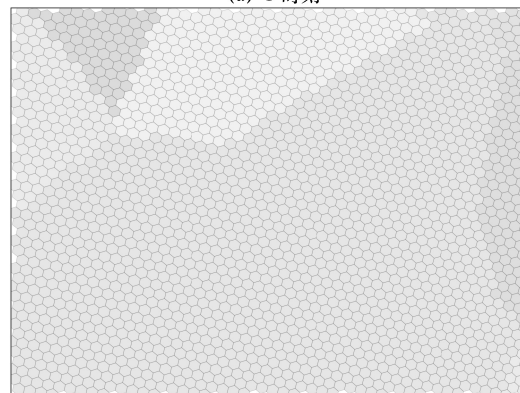
因此,对于每一次仿真,可以依次对每个壳层在仿真区域上方相应的壳层区域内随机撒 $|N_{\text{visible of target}}^{\text{pershell}}|$ 颗卫星。

2.2.3 选择调度算法

对于波位划分算法,可以选择周期性最短距离波位划分方法。假定每隔 Ts 重新划分波位和部署的卫星的关系,每个周期内每个波位都选择离自己最近的卫星,一个波位只会归属一颗卫星。例如,假设仿真区域为我国内陆区域,对于 20 km 半径的波位,一共需要上千个波位。图7展示了仿真时间相差 15 s 的两个波位划分结果,每颗卫星关联的波位用不同颜色区分。



(a) T 时刻



(b) $T+15 \text{ s}$ 时刻

图7 T 时刻和 $T+15 \text{ s}$ 时刻波位划分情况

对于调度算法,采用无星间协作的轮询或者比例公平算法。例如,对于轮询算法,假设某颗卫星可以同时点亮 N 个波束,记作 B_0 到 B_{n-1} ,该卫星被划分了 M 个波位,随机编号分别记作 G_0 到 G_{m-1} 。那么在第 1 个点亮周期, N 个波束分别点亮波位 G_0 到 G_{n-1} ,第 2 个点亮周期将点亮波位 G_n 到 G_{2n-1} ,以此类推,第 k 个点亮周期点亮波位 $G_{(k-1)n\text{Mod}N}$ 到 $G_{kn-1\text{Mod}N}$ 。

对于每个跳波束内部的调度算法,本文沿用 3GPP 规定的仿真算法,例如轮询算法和比例公平算法。

2.3 系统间仿真考虑

前文主要讨论了大规模星座系统的仿真模型和仿真部署,结合已有成熟的蜂窝系统仿真方法,只要对星座系统间、星座系统和地面系统间做好统一部署和协调,就可以对任意星地一体化的通信场景进行仿真。系统间的仿真部署和协调需要解决包括统一地理位置、干扰规避、终端接入等问题。

由于蜂窝小区覆盖面积小,真实部署蜂窝小区仿真代价太高,例如 10 km 半径的卫星波束能够覆盖超过 1 万个地面蜂窝小区,一般选取几个典型位置部署簇来加速仿真。另外,星地一体的干扰计算也需要基于真实的地理位置来计算,可以基于视角来减少干扰计算量。

不同运营商之间通常采用频谱划分的方式来规避干扰。星地一体化网络需要卫星和地面网络共享频谱资源,例如 AST 和 Starlink 都申请地面运营商合作共同使用手机直联频谱,因此还需要考虑同频下的干扰规避手段。常规的干扰规避手段有距离隔离、角度隔离、减少发射功率等。

蜂窝系统终端通常基于信号质量或者强度选择小区接入,卫星系统则同时考虑基于信号质量和位置信息选择卫星小区进行接入。星地一体化网络中不同类型小区也需要定义一定的接入和切换规则,例如定义蜂窝小区优先级高于卫星小区等。

3 仿真结果

下面提供针对大规模低轨卫星星座及星地一体化网络的批量容量密度仿真结果。为了方便揭示容量密度的一般规律,本文统一基于 NR NTN 协议仿真下行容量密度,并且做出以下仿真假设:卫星高度统一在 465 km 附近,3 个壳层,每层 900 颗卫星且倾角分别是 53°、43° 和 33°,覆盖中低纬度区域,星座共 2 700 颗卫星,具体见表 4。卫星天线采用 0.5 倍波长的正方形排布相控阵天线,工作在 2 GHz 频点,终端采用全向天线,具体参数

见表 5。每颗卫星具有相同的波束能力,即可以发射相同个数的同频波束,每个波束的发送功率随路径损耗和天线扫描损失进行补偿,使得到达地面的功率谱密度相同。波束调度采用地面固定波束,按照覆盖星下点波束范围设定地面网格作为波位。同时采用跳波束来服务不同波位:波位采用最近卫星关联策略,每 15 s 重新关联波位;波位点亮算法采用轮询策略,每 50 ms 进行轮询,每个波位内部署 10 个终端,具体参数见表 6。终端采用手持终端,以仿真移动通信业务,业务模型采用 Full Buffer,以仿真最大容量密度。

表 4 默认星座配置

壳层	高度/km	倾角/(°)	轨道数×每轨卫星数
0	460	53	30 个×30 颗
1	465	43	30 个×30 颗
2	470	33	30 个×30 颗

表 5 默认通信参数

参数	值
频点/GHz	2
带宽/MHz	5
卫星最大发射天线增益/dB	38
卫星天线模型	M.2101, 天线单元个数 $M=N=48$ 个
最大 EIRP/dBW	53.4
路损模型	38.811
气衰	99%可用度
波束覆盖半径/km	9
终端天线模型	全向
终端接收增益/dB	-5
终端噪声系数/dB	7

表 6 默认波束管理参数

波束管理	策略
发射功率	地面等功率谱密度
单星最大点亮个数/个	50
波束隔离/km	0
波位划分策略	最近距离, 15 s 周期
点亮策略	轮询, 50 ms 周期

3.1 不同地理区域影响

本小节分析相同星座、卫星载荷能力及通信体制下,地球不同区域的容量密度差异。

首先对比在不同纬度下,采用系统仿真的方法和

采用 1.1 节中提出的分析方法这两种方法得到的容量密度之间的差异。待仿真星座的可见卫星数如图 8 所示,从中选取 3 个典型区域进行仿真,分别是较小可见性的纬度 0° ,一般可见性的纬度 23° ,最大可见性的纬度 30° ,具体见表 7。其中仿真区域选择经纬度正负 1.5° ,干扰区域在此之外再分别加 3° ,即干扰区域是仿真区域的 4 倍。

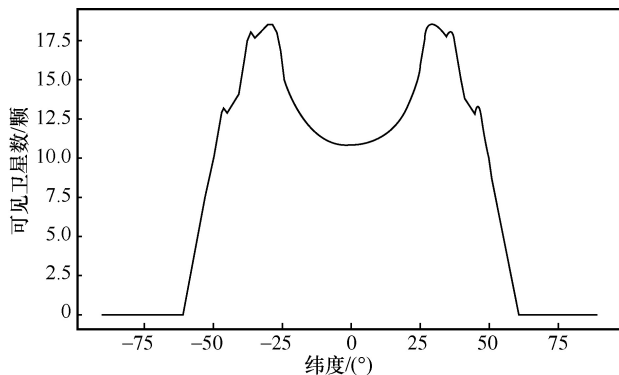


图 8 待仿真星座的可见卫星数

表 7 仿真区域设置

典型区域	仿真区域/(°)	干扰区域/(°)
A	-1.5~1.5	-3~3
B	21.5~24.5	20~26
C	28.5~31.5	27~33

图 9 展示了这 3 个区域用两种评估方法得到的容量密度 CDF 曲线。表 8 展示了不同纬度区域容量密度和可见性对比,采用系统仿真得到的 5%、50%、95% 的容量密度和终端平均 SINR,以及采用分析方法得到的容量密度和终端平均 SINR。上述两种评估方法下,都可以看到容量密度与区域可见性强相关。对于相同区域,分析方法得到的容量密度都只有系统仿真得到的 1/4,这是由于分析方法过度估计了波束间的干扰,评估出终端平均 SINR 仅为 -1.584 dB,远远小于用系统仿真得出的 9 dB 左右的值。由此可见,分析方法严重低估了系统的吞吐能力。通过观察 3 个典型区域,可以看出随着可见卫星

数的增多,波束间的干扰增大,从而带来 SINR 的降低。例如,对比区域 A 和 B,区域 B 的平均可见卫星数为 14.2 颗,比区域 A 多 30%,而终端平均 SINR 则只比区域 A 小了 0.44 dB。相比于 SINR 的降低程度,卫星的增加影响更大,因此容量密度的排序为区域 C> 区域 B> 区域 A,但可见性增加的边际效应略微减少。如果采用分析方法评估,每个区域的平均 SINR 都相同,容量密度完全跟可见性成正比。此外,通过系统仿真的结果可以看到容量密度在时间维度上具有较大方差。以区域 A 为例,其最低容量密度(5%)为 1.2 kbit/s/km²,只有平均容量密度(50%)的 72%,最高容量密度(95%)的 51%。作为对比,用分析方法进行评估只能得出一个值,无法体现容量密度在时间维度上的抖动。

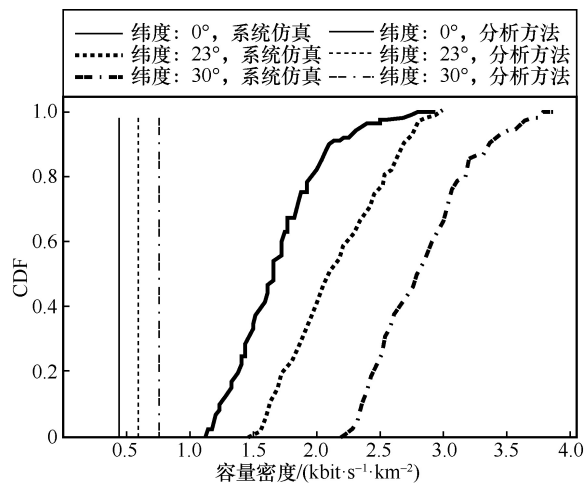


图 9 不同纬度区域容量密度 CDF 曲线

由于星座构型的特点,相同纬度下不同经度区域的卫星可见性是相同的,因此影响容量密度的一个重要因素就是气衰。对于低频气衰的影响可以忽略,因此这里主要关注高频场景下的气衰问题。定义仿真区域 C1 和 C2,其区域中心都位于纬度 30° ,但分别位于经度 120° 和 90° 上。本文仿真了两组气衰模型,第一组用随机气衰值,第二组用 95% 可用度的气衰值。仿真结果如图

表 8 不同纬度区域容量密度和可见性对比

典型区域	5%容量密度 /(kbit·s ⁻¹ ·km ⁻²)	50%容量密度 /(kbit·s ⁻¹ ·km ⁻²)	95%容量密度 /(kbit·s ⁻¹ ·km ⁻²)	平均可见 卫星数/颗	终端平均 SINR /dB	分析方法容量密度 /(kbit·s ⁻¹ ·km ⁻²)	分析方法平均 SINR /dB
A	1.200	1.663	2.350	10.87	10.086	0.445	-1.584
B	1.601	2.096	2.786	14.21	9.647	0.591	-1.584
C	2.324	2.807	3.571	18.53	8.806	0.757	-1.584

10 所示, 东经 90° 位置两组气衰条件下平均容量密度分别为 $2.781 \text{ kbit/s/km}^2$ 和 $2.780 \text{ kbit/s/km}^2$, 差别非常微小; 而东经 120° 位置完全随机的气衰条件下平均容量密度为 $2.677 \text{ kbit/s/km}^2$, 比东经 90° 小了 3.74% 。95% 可用度的气衰条件下为 2.17 kbit/s/km^2 , 则比东经 90° 小了 21.9% 。

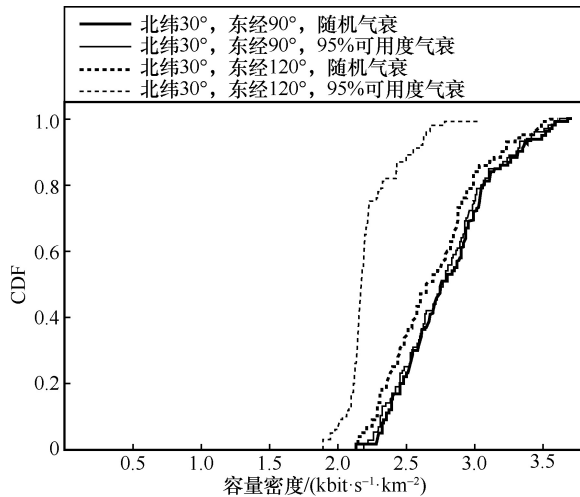


图 10 不同经度地区容量密度差异

然后以经纬度 1° 为单位仿真地球所有经纬度区域的容量密度, 容量密度基本在纬度上随星座可见性变化, 相同纬度上随经度不同略有差异。

3.2 星地一体化网络场景分析

本节部署一个简单的星地一体化网络, 给出卫星和蜂窝的容量密度。假设在区域 C 的中心位置部署蜂窝小区, 带宽使用低频 5 MHz 。中心 10 km 半径为密集城区部署, 用半径为 400 m 的小区全覆盖, 小区负载为 20% ; 中心 10 km 到 30 km 半径为城镇部署, 用半径为 600 m 的小区全覆盖, 小区负载为 15% 。其他区域没有蜂窝覆盖。通过仿真, 可得到密集城区容量密度为 $86.43 \text{ Mbit/s/km}^2$, 城镇容量密度为 $36.63 \text{ Mbit/s/km}^2$ 。接着采用星座 A, 每卫星部署 50 个波束, 在上述蜂窝覆盖外用卫星进行同频补充覆盖。隔离距离为 0 , 即卫星小区边缘和最边缘的蜂窝小区边缘刚好相邻, 并假设卫星波束的负载为 10% 。基于上述场景, 可获得密集城区容量密度为 83.1 Mbit/s/km^2 , 城镇容量密度为 $34.36 \text{ Mbit/s/km}^2$, 可以看出同频干扰导致容量密度分别下降 3.85% 和 6.20% 。城镇区域由于距离卫星波束覆盖更近, 容量下降更多。同样, 蜂窝覆盖区域周边的卫星波束容量密度受蜂窝覆盖干扰较大, 但一定距离外其影响几乎可以忽略不计, 如图 11 所示。对比蜂窝小区和

卫星小区的容量密度, 可以看到它们相差大约 4 个数量级。由此可见卫星通信系统容量有很大的提升空间, 下面将提供几种提升容量的方案并给出对应的仿真结果。

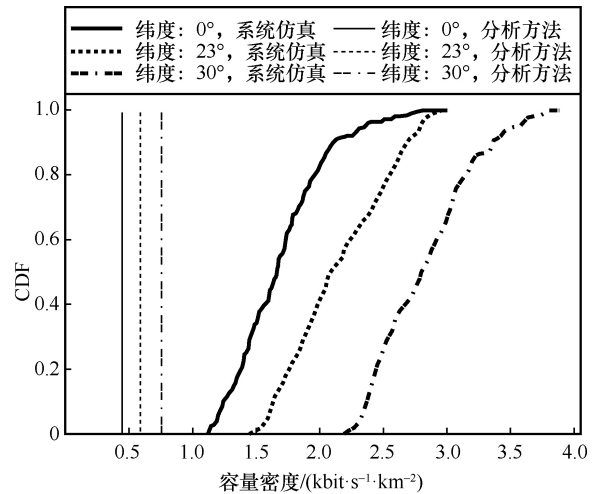


图 11 星地同频部署下的卫星容量密度分布

3.3 提升最大点亮波束数

首先可以提升单星最大点亮波束数, 分析其对星座容量密度的影响。提升最大点亮波束数必然会造成波束间干扰的增加, 因此本文同时仿真不同波束隔离距离。选取低频和区域 C 作为基本的仿真假设, 仿真 0 km 、 20 km 和 40 km 共 3 种波束隔离距离下的不同最大点亮波束数的容量密度。统计 50% 的区域容量密度, 如图 12 所示。当点亮波束数为 20 个时, 0 km 、 20 km 和 40 km 3 种波束隔离距离, 其容量密度分别是 $11.76 \text{ kbit/s/km}^2$ 、 $12.37 \text{ kbit/s/km}^2$ 和 $12.81 \text{ kbit/s/km}^2$, 隔离距离越大容量密度越大。当点亮波束数增加到 60 个时, 20 km 隔离的场景明显超过 40 km 隔离。这是由于容量密度的大小受 SINR 和覆盖两个因素的影响, 较大的隔离距离可以降低波束间干扰(平均 SINR 从 10.14 dB 提升到 11.66 dB), 但需要以更少的波束覆盖为代价(覆盖率从 14.10% 下降到 10%)。同样, 当点亮波束数增加到 80 个和 200 个时, 不隔离场景下的容量密度超过 40 km 隔离和 20 km 隔离场景, 这也是由于隔离距离小的覆盖率极大超过隔离距离大的覆盖率。不管哪种隔离距离, 随着点亮波束数的增加, 容量密度都会趋于饱和(容量密度曲线趋平)。

除此之外, 在图 12 中展示了采用 1.1 节中提出的分析方法得到的容量密度线, 可以看到, 容量密度随着星座总波束数的增加呈线性增长的趋势, 无法反映波束干扰和覆盖等因素带来的容量密度饱和的趋势。

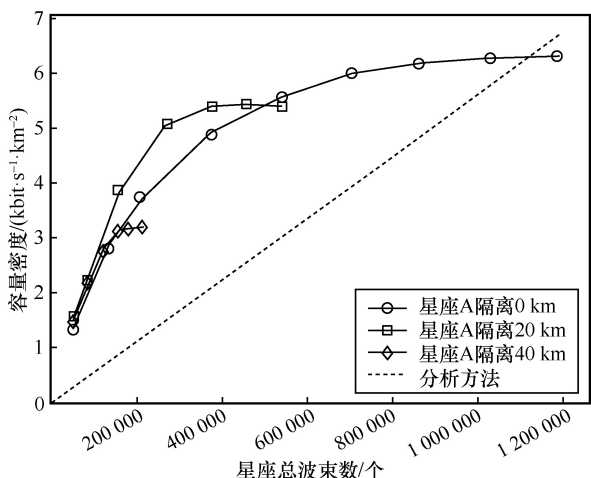


图 12 不同隔离距离最大点亮波束数和容量密度的关系

3.4 提升卫星规模

除了增加单星最大点亮波束数,增加星座卫星规模也可以提升星座总的服务波束数量,从而提升系统容量。为了评估卫星规模对容量密度的影响,本文增加两种星座规模,如表 9 所示的星座 B 和星座 C,它们是星座 A 的相似星座(相同壳层高度和倾角)。固定其他仿真参数,如固定仿真区域 C,波束不隔离。选择固定星座整体最大波束数量来仿真,这样每颗卫星的最大点亮波束数为星座最大波束数除以星座卫星数。3 个星座的最大点亮波束数量和容量密度的关系如图 13 所示。不难看出,在相同总波束数的情况下,卫星数量越多(每颗卫星最大点亮波束数越少),容量密度越大。在相同总波束数情况下,3 个星座的覆盖率相当,唯一区别是 SINR,星座 C>星座 B>星座 A,这也是造成容量密度差异的唯一因素。每个星座都有一个容量上限,星座规模越大容量上限越高,但规模的上涨带来的增益却大幅下降,例如星座 A 有卫星 2 700 颗,容量密度为 6.29 kbit/s/km²;星座 B 卫星数量是星座 A 的 2.78 倍,而容量密度为 6.93 kbit/s/km²,仅较星座 A 提升 10.2%;星座 C 卫星数量是星座 B 的 1.96 倍,容量密度为 7.32 kbit/s/km²,仅较星座 B 提升 5.6%。

表 9 3 种规模的星座

壳层	高度/km	倾角/(°)	星座 A	星座 B	星座 C
0	460	53	30×30 颗	50×50 颗	70×70 颗
1	465	43	30×30 颗	50×50 颗	70×70 颗
2	470	33	30×30 颗	50×50 颗	70×70 颗

图 13 中给出了分析方法得到的容量密度线,可以看出该评估方法的误差。

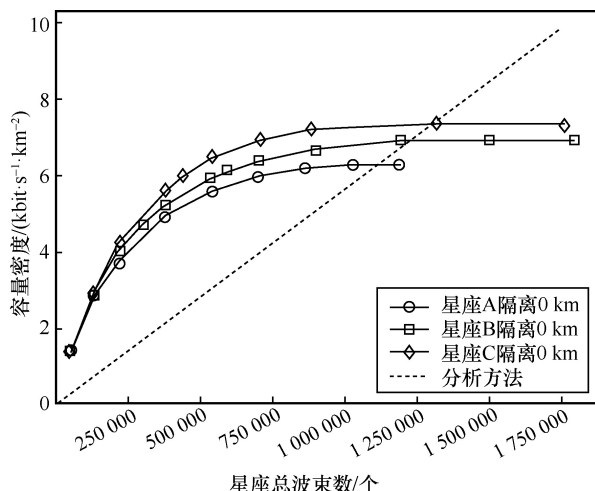


图 13 3 个星座规模最大点亮波束数和容量密度的关系

3.5 提高卫星天线增益

通过以上仿真分析可以看到,提升单星最大波束数和星座规模,都能提升容量上界,但边际效应大幅下降。图 13 的虚点线上界的容量密度(7.32 kbit/s/km²)是实线第一个点(1.36 kbit/s/km²)的 5.4 倍,即使继续提升星座规模,提升上限也仅不到一个数量级。其实,还可以提升卫星天线的增益来达到系统容量密度的提升。提升卫星天线增益可以提升终端接收的信噪比,同时减小地面波束覆盖范围,使得星座波束数量上限提高,这些都会极大提升系统容量密度。例如,将卫星天线增益从 38 dB 提高到 45 dB,波束地面覆盖半径从 10 km 缩小到 4 km 左右。仿真星座 A 在区域 C 的容量密度,结果如图 14 所示,高增益天线将星座 A 的容量密度上界从 6.29 kbit/s/km² 大幅提升到 31.20 kbit/s/km²。

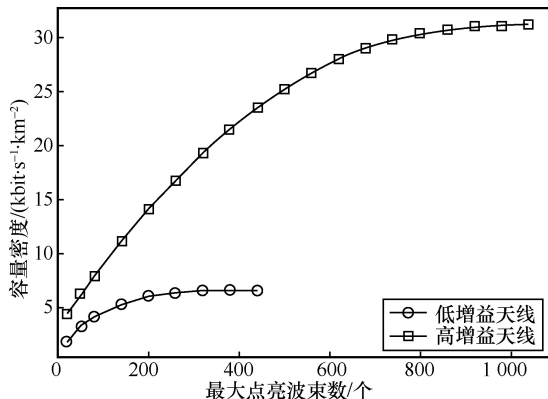


图 14 高低增益天线容量密度曲线

参考文献:

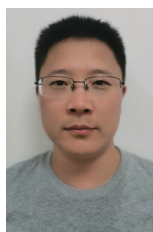
[1] AZARI M M ,SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. Evolution of

- non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672.
- [2] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [3] LUO H J, SHI X L, CHEN Y, et al. 6G VLEO satellite networks[J]. Communications of Huawei Research, 2022, 2: 34-45.
- [4] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non terrestrial networks: TR 38.811[S]. 2018.
- [5] PULTAROVA T, HOWELL E. Starlink satellites: everything you need to know about the controversial internet megaconstellation[EB]. 2023.
- [6] ITU-R. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface: M.2410-0[S]. 2017.
- [7] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020: M.2412-0 [S]. 2017.
- [8] ITU-R. Vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface of IMT-2020: M.2514-0[S]. 2022.
- [9] DEL PORTILLO I, 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.
- [10] KOUROGIORGAS C, TARCHI D, UGOLINI A, et al. System capacity evaluation of DVB-S2X based medium earth orbit satellite network operating at Ka band[C]//Proceedings of 2016 8th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [11] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2021.
- [12] SEDIN J, FELTRIN L, LIN X Q. Throughput and capacity evaluation of 5G new radio non-terrestrial networks with LEO satellites[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [13] AMATETTI C, CONTI M, GUIDOTTI A, et al. NB-IoT random access procedure via NTN: system level performances[C]//Proceedings of ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2381-2386.
- [14] JUAN E, LAURIDSEN M, WIGARD J, et al. 5G new radio mobility performance in LEO-based non-terrestrial networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [15] CHOUGRANI H, KISSELEFF S, MARTINS W A, et al. NB-IoT random access for nonterrestrial networks: preamble detection and uplink synchronization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(16): 14913-14927.
- [16] KODHELI O, ASTRO A, QUEROL J, et al. Random access procedure over non-terrestrial networks: from theory to practice[J]. IEEE Access, 2021, 9: 109130-109143.
- [17] 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.
- [18] LIN Z Y, NI Z Y, KUANGLL, et al. Dynamic beam pattern and bandwidth allocation based on multi-agent deep reinforcement learning for beam hopping satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 3917-3930.
- [19] WANG Y, CHEN Y, QIAO Y F, et al. Cooperative beam hopping for accurate positioning in ultra-dense LEO satellite networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [20] SORMUNEN L, PUTTONEN J, KURJENNIEMI J. System level modeling of beam hopping for multi-spot beam satellite systems[C]// 23rd Ka and Broadband Communications Conference, October 16 through 19th. [S.l.: s.n.], 2017.
- [21] ZHANG J W, QIN D L, KONG C L, et al. System-level evaluation of beam hopping in NR-based LEO satellite communication system[C]//Proceedings of 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [22] SHENG M, ZHOU D, BAI W G, et al. 6G service coverage with mega satellite constellations[J]. China Communications, 2022, 19(1): 64-76.
- [23] CHENG N, QUAN W, SHI W S, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 178-185.
- [24] SCHAUB H, ALFRIEND K T. J2 Invariant relative orbits for spacecraft formations[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2001, 79: 77-95.
- [25] PEKHTEREV S. The bandwidth of the Starlink constellation and the assessment of its potential subscriber base in USA[J]. SatMagazine, 2021, 11: 54-57.
- [26] Space Exploration Holdings, LLC. Request for modification of the authorization for the SpaceX NGSO satellite system, IBFS File No. SAT-MOD-20200417-00037[Z]. 2020.

[作者简介]



孟贤 (1979—), 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为星地一体化网络仿真、低轨星座组网等。



秦大力 (1984—), 华为技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星星座仿真平台、星地融合仿真平台等。



汪宇（1990—），华为技术有限公司高级工程师，主要研究方向为空间信息网络、卫星通信移动性管理、低轨星座组网等。



罗禾佳（1986—），华为技术有限公司主任工程师，主要研究方向为卫星通信、信道编码、信号处理、多天线技术等。



孔垂丽（1990—），华为技术有限公司高级工程师，主要研究方向为卫星波束管理、低轨卫星接入等。



王俊（1976—）华为技术有限公司高级技术专家，主要研究方向为卫星通信、信道编码、无线通信、系统设计、人工智能等。