

低轨卫星互联网星座系统链路效能仿真建模设计方法

马东俊^{1,2}, 韩福勇², 张少伟², 朱雪田², 李红艳¹

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710126;

2. 中国星网网络创新研究院有限公司, 北京 100029)

摘 要: 随着新技术的持续涌现与全球互联网需求的爆发式增长, 商业低轨卫星系统的部署已成为当下发展的关键课题。为了给未来低轨互联网星座的滚动建设提供科学设计依据与系统级验证评估方案, 同时有效降低因技术瓶颈和系统风险导致的额外建设成本, 设计一种低成本、高保真的低轨互联网系统链路效能仿真建模设计方法, 使其能够通过输入星座规模、星载设备性能、终端部署与接入能力等参数, 验证系统能否实现全球无缝覆盖的链路性能目标。

关键词: 低轨互联网星座; 系统仿真建模设计; 链路性能分析

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025036

Design Method for Link Performance Simulation Modeling of Low Earth Orbit Satellite Internet Constellation System

MA Dongjun^{1,2}, HAN Fuyong², ZHANG Shaowei², ZHU Xuettian², LI Hongyan¹

1. Xidian University, Xi'an 710126, China

2. China Satellite Network Innovation Co., Ltd., Beijing 100029, China

Abstract: With the continuous emergence of new technologies and the explosive growth of global Internet demand, the deployment of commercial low earth orbit (LEO) satellite systems has become a key issue in current development. To provide scientific design basis and system-level verification and evaluation plan for the rolling construction of future LEO Internet constellations, and to effectively reduce the additional construction costs caused by technical bottlenecks and system risks, a low-cost, high-fidelity LEO Internet system link performance simulation modeling design method is designed, which can verify whether the system can achieve the global seamless coverage link performance target by inputting parameters such as constellation scale, on-board equipment performance, terminal deployment and access capability.

Keywords: LEO Internet constellation, system simulation modeling design, link performance analysis

0 引言

中低轨卫星互联网作为全球信息通信基础设施的新兴领域, 正经历技术突破、政策驱动与市场扩张的快速发展阶段^[1], 低轨卫星网络具备拓扑动态、网络异构、技术体制多样等特点^[2], 且涉及领域范围广、技术跨度大^[3]。因此, 针对这样一个复杂大系统的建设, 需要依托计算机仿真技术构建虚拟试验环境, 并通过数字化手段模拟卫星运行、信号传输、用户接入等全场景流程, 从而实现对于未来组网方案的链路有效性验证与性能优

化分析。对于低轨卫星互联网这类复杂的空间信息系统而言, 组网技术涉及星座拓扑设计、星间链路调度、波束切换策略、系统容量优化等多项关键技术环节。这些技术的有效性不仅需要理论层面的推导论证, 更需要在接近真实的在轨环境中进行海量数据测试与长周期验证。文献[4-5]介绍了低轨卫星信道特性的影响因素, 设计了动态卫星信道的建模仿真。文献[6]介绍了地球自转参数估计及全球电离层建模。文献[7]结合离散事件模拟技术和虚拟化仿真技术, 提出了一种低轨卫星网络仿真系统设计方案。该系统采用分层设计, 包括控制层、资源管

理层、载体层及任务调度层。

低轨卫星互联网系统链路效能仿真模型将卫星轨道参数、信道传播特性、终端分布场景等关键要素作为输入,为各类组网技术提供贴近实际的仿真设计平台。其通过直观的参数配置以及可视化的仿真结果,可以快速迭代试验方案,高效验证不同组网策略的链路性能表现,从而为关键技术^[8-9]的突破提供可靠数据支撑。因此,构建一套低轨卫星互联网系统链路效能仿真建模方法是推动低轨卫星互联网组网技术研究走向深入、实现工程化应用的重要支撑,低轨卫星互联网应用场景如图 1 所示。

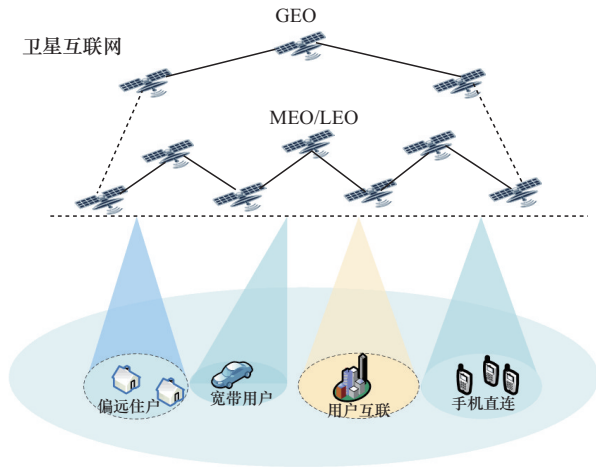


图 1 低轨卫星互联网应用场景

1 仿真系统组成

低轨卫星互联网链路效能评估仿真系统能够实现星座建模、天线建模、地面终端部署建模、传播损耗建模、服务区划分建模以及链路效能（速率、容量）计算。仿真系统架构如图 2 所示。

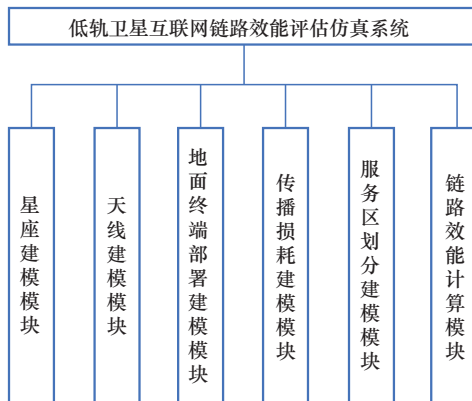


图 2 仿真系统架构

下文将对上述 6 个模块进行详细介绍。

星座建模通过配置轨道六根数,实现 Walker 星座的倾斜轨星座建模,能够基于时间外推获取卫星在不同时刻的位置信息。

天线建模通过配置阵子数、收发频点、阵子间距等参数,实现星载相控阵模型建模;通过配置天线直径、收发频点、天线效率等参数,实现抛物面天线模型建模;通过配置固定天线增益值,可构建全向天线建模模型,用于计算卫星或地面终端的收发天线增益。

地面终端部署建模通过经纬度划分、近均匀分布等分布方式实现地面终端的地面分布建模。

服务区划分建模根据卫星、波束、终端等的位置计算卫星服务小区以及完成卫星波束服务区域计算等。

传播损耗建模能够实现自由空间损耗建模、固定损耗值配置(如人体损耗、极化损耗等)。

链路效能计算模块根据卫星、终端的收发侧性能参数、传播损耗等数据计算链路速率、通信容量等效能指标。

2 仿真系统建模方法

2.1 星座建模方法

首先,由星座构型参数生成轨道六根数(即开普勒轨道要素),令 p 代表平面编号, q 表示平面上的卫星编号,则参考卫星(种子卫星)的编号为 $(1,1)$,历元时刻 t_0 下第 (p,q) 颗卫星的轨道根数如下

$$\text{半长轴: } a_{p,q} = a_{1,1}$$

$$\text{偏心率: } e_{p,q} = e_{1,1}$$

$$\text{轨道倾角: } i_{p,q} = i_{1,1}$$

$$\text{升交点赤经: } \Omega_{p,q} = \Omega_{1,1} + (i-1) \cdot \Delta\Omega$$

$$\text{近地点幅角: } \omega_{p,q} = \omega_{1,1}$$

$$\text{平近点角: } M_{p,q} = M_{1,1} + (i-1) \cdot \Delta M + \frac{360}{S} \cdot (q-1)$$

星座构型参数包括轨道面数(P)、每轨卫星数(Q)、升交点赤经增量($\Delta\Omega$)、平近点角增量(ΔM)。卫星轨道根数是描述卫星运动状态的核心参数,其数值直接影响卫星的轨道特性、覆盖能力及星座组网效能。其中,半长轴 a 决定轨道椭圆的大小,直接影响卫星运行周期;偏心率 e 影响轨道形状,当 $e=0$ 时为圆轨道,当 $0 < e < 1$ 时为椭圆轨道;轨道倾角 i 决定卫星星下点轨迹的纬度范围;升交点赤经 Ω 定义轨道平面在惯性空间中的方位,其取值会影响多颗卫星的相对位置分布;近地点幅角 ω 决定近地点在轨道平面内的方位,直接影响卫星经过近地点时的覆盖区域;平(真)近点角 M 用于描述卫星在轨道上的瞬时位置,是计算星地距离、多普勒频移的核心参数。

接着设定仿真时间段 $[t_i, t_f]$ ，使用轨道预报模型生成设定时间段内的星历，对于此类仅考虑长期摄动效应的预报模型，一般将卫星轨道看作一个长期进动的椭圆，其中， $a_{p,q}$ 、 $e_{p,q}$ 、 $i_{p,q}$ 不随时间变化， $\Omega_{p,q}$ 、 $\omega_{p,q}$ 、 $M_{p,q}$ 与时间的关系为：

$$\begin{aligned}\Omega_{p,q}(t) &= \Omega_{p,q}(t_0) + \dot{\Omega} \cdot (t - t_0) \\ \omega_{p,q}(t) &= \omega_{p,q}(t_0) + \dot{\omega} \cdot (t - t_0) \\ M_{p,q}(t) &= M_{p,q}(t_0) + \dot{M} \cdot (t - t_0)\end{aligned}\quad (1)$$

其中， $\dot{\Omega}$ 、 $\dot{\omega}$ 、 $\dot{M}$ 分别为升交点赤经、近地点幅角和平近点角的平均变化率。

最后根据各时刻轨道根数，按以下公式计算卫星位置与速度，生成星历并用于后续仿真分析：

$$\begin{aligned}x &= r(\cos(\omega + v)\cos\Omega - \cos(i)\sin(\omega + v)\sin\Omega) \\ y &= r(\cos(\omega + v)\sin\Omega + \cos(i)\sin(\omega + v)\cos\Omega) \\ z &= r(\sin(\omega + v)\sin(i)) \\ \dot{x} &= \sqrt{\frac{\mu}{p}}(\cos v + e)(-\sin(\omega)\cos\Omega - \cos(i)\sin(\Omega)\cos\omega) - \\ &\quad \sqrt{\frac{\mu}{p}}\sin(v)(\cos(\omega)\cos\Omega - \cos(i)\sin(\Omega)\sin\omega) \quad (2) \\ \dot{y} &= \sqrt{\frac{\mu}{p}}(\cos v + e)(-\sin(\omega)\sin\Omega + \cos(i)\cos(\Omega)\cos\omega) - \\ &\quad \sqrt{\frac{\mu}{p}}\sin(v)(\cos(\omega)\sin\Omega + \cos(i)\cos(\Omega)\sin\omega) \\ \dot{z} &= \sqrt{\frac{\mu}{p}}((\cos v + e)\sin(i)\cos\omega - \sin(v)\sin(i)\sin\omega)\end{aligned}$$

其中， $r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos v}$ ， $p = a \cdot (1 - e^2)$ ， v 为真近点角，计算方法如下：

$$\begin{aligned}M &= E - e \cdot \sin E \\ \sin v &= \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{1 - e \cos E} \\ \cos v &= \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E} \\ v &= \text{atan2}(\sin v, \cos v)\end{aligned}\quad (3)$$

其中，偏近点角 E 需迭代求解。

2.2 天线建模方法

根据终端类型的不同，天线可以分为全向天线、相控阵天线、抛物面天线3种。全向天线在水平方向图上为360°全平面均匀辐射，覆盖范围广，适用于手持类终端的移动通信场景，能够适应各种姿态，保证信号接收水平的稳定性。相控阵天线由于能够实现特定角度的波束成形，获得较高天线增益，适用于高频率大带宽终端通信场景。抛物面天线是由抛物面反射器和位于焦点上的馈源组成的面天线，抛物面通常可以旋转，以便实现跟星操作，且具有极高天线增益，适用于信关站这类宽带大容量设备。

2.2.1 全向天线

全向天线是一种在水平方向上实现360°均匀辐射的无线电天线，其核心特性是无方向性，即信号覆盖范围呈球对称分布，全向天线模型如图3所示。

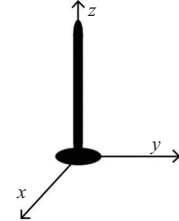
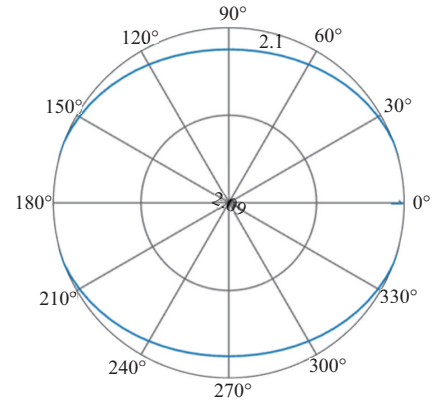


图3 全向天线模型

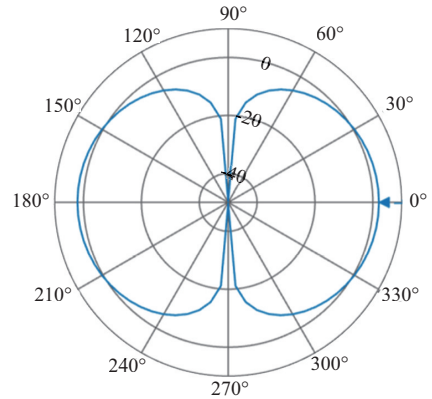
全向天线（半波偶极子）的归一化电场方向图在球坐标系中可以表示为：

$$E(\theta, \varphi) = \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right)^2 \quad (4)$$

其中， θ 是俯仰角，取值范围为0~180°； φ 是方位角，取值范围为0~360°，其方向图如图4所示。



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

图4 天线方向图

2.2.2 相控阵天线

相控阵天线采用二维均匀平面阵列 (uniform planar array, UPA), 能够通过堆叠的形式充分利用空间。UPA 在二维平面由多个固定间距的阵列单元组成, 通过控制阵元间相差实现不同方向的波束扫描, 天线模型如图 5 所示。

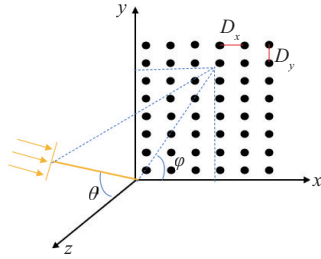


图5 UPA天线模型

阵列天线辐射特性由阵元辐射、阵列方向图和射频前端收发特性共同决定。对于单个阵元, 其建模参数见表1, 单个阵元天线方向图如图6所示。

表1 阵列天线单个阵元建模参数

参数名称	参数标识
阵元旁瓣/dB	SLA
阵元辐射方向图/dB	$A_E(\theta, \varphi) = \text{Max}(10 \lg(\cos^2(\theta)) - \text{SLA})$

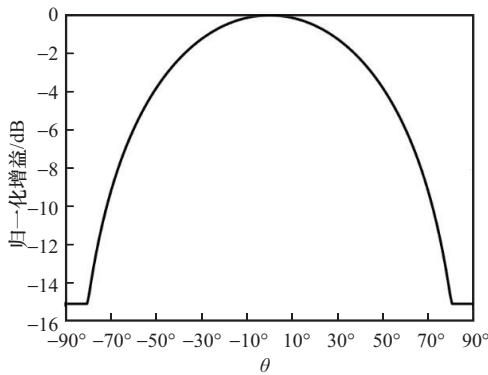


图6 单个阵元天线方向图 (SLA=15 dB)

阵元在 xoy 平面内按固定间距分布, 沿 x 方向的阵元间距为 D_x , 沿 y 方向的阵元间距为 D_y , 天线波束在空间的辐射角度为 (θ_0, φ_0) , 其中仰角 θ_0 的范围限定在 -90° 到 $+90^\circ$ 间, 扫描角 φ_0 的范围限定在 0° 到 360° 间, 阵列天线建模参数见表2, 阵列天线收发特性见表3, 阵元天线方向图如图7所示。

表2 阵列天线建模参数

参数名称	参数标识
工作波长	λ
主辐射方向	(θ_0, φ_0)
边缘辐射方向	(θ_s, φ_s)
辐射效率	effi
阵元间距	$D_x \cdot D_y$
阵元个数	$M \cdot N$
阵列方向图	$A_A(\theta, \varphi) = A_E(\theta, \varphi) + 10 \lg \left(\left \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot v_{m,n} \right ^2 \right)$ 其中, $w_{m,n} = \exp \left(\sqrt{-1} \cdot 2\pi \left((m-1) \cdot \frac{D_x}{\lambda} \cdot \cos(\varphi) \sin(\theta) + (n-1) \cdot \frac{D_y}{\lambda} \cdot \sin(\varphi) \sin(\theta) \right) \right)$ $v_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{M \cdot N}} \exp \left(\sqrt{-1} \cdot 2\pi \left(-(m-1) \cdot \frac{D_x}{\lambda} \cdot \cos(\varphi_0) \sin(\theta_0) - (n-1) \cdot \frac{D_y}{\lambda} \cdot \sin(\varphi_0) \sin(\theta_0) \right) \right)$ 公式中, $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$
阵列波束主轴 (θ_0, φ_0) 增益	$\text{Gain}(\theta_0, \varphi_0) = 10 \lg \left(\text{effi} \cdot 4\pi \cdot \frac{A}{\lambda^2} \right);$ $A = M \cdot N \cdot D_x \cdot D_y$
阵列波束边缘角 (θ_s, φ_s) 扫描损失 Loss	$\text{Loss}(\theta_s, \varphi_s) = A_A(\theta_s, \varphi_s) - 10 \lg(M \cdot N)$

表3 阵列天线收发特性

参数名称	参数标识
单波束总辐射功率 (total radiated power, TRP)	P
噪声温度	T_0
等效全向辐射功率 (effective isotropic radiated power, EIRP)	$\text{EIRP} = 10 \lg(P) + \text{Gain}(\theta_0, \varphi_0)$
接收品质因数 (gain-to-noise temperature ratio, G/T Ratio)	$\frac{G}{T} = \text{Gain}(\theta_0, \varphi_0) - 10 \lg(T_0)$

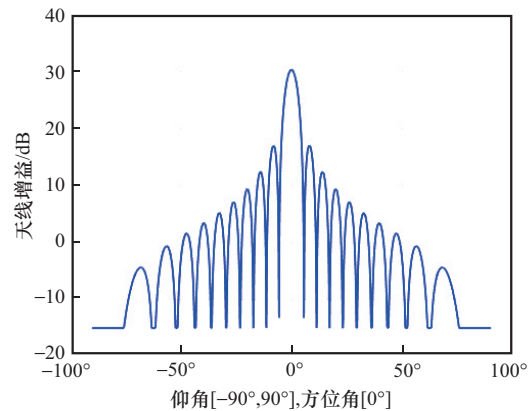


图7 阵元天线方向图 (SLA=15 dB)

2.2.3 抛物面天线

抛物面天线是一种利用旋转抛物面反射器实现定向信号传输的高性能天线，其核心结构由抛物面反射器和位于焦点的馈源组成，发射模式下，馈源发出的电磁波经抛物面反射器反射后形成平行波束；接收模式下，入射波被反射面汇聚至馈源。

抛物面天线的仿真参数见表4，抛物面天线方向图如图8所示。

表4 抛物面天线仿真参数

参数名称	参数标识
抛物面天线口径	D
天线辐射效率	effi
馈电功率	P
噪声温度	T_0
天线方向图(dB)	$A_A(\theta) = 10 \lg \left(\left \frac{2J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \cdot \sin(\theta)} \right ^2 \right)$ 其中, J_1 为一阶第一类贝塞尔函数
3 dB 波束宽度	$\text{HPBW} \approx \frac{70\lambda}{D}$
抛物面天线增益	$\text{Gain} = 10 \lg \left(\text{effi} \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right)$
EIRP	$\text{EIRP} = 10 \lg(P) + \text{Gain}$
G/T	$\frac{G}{T} = \text{Gain} - 10 \lg(T_0)$

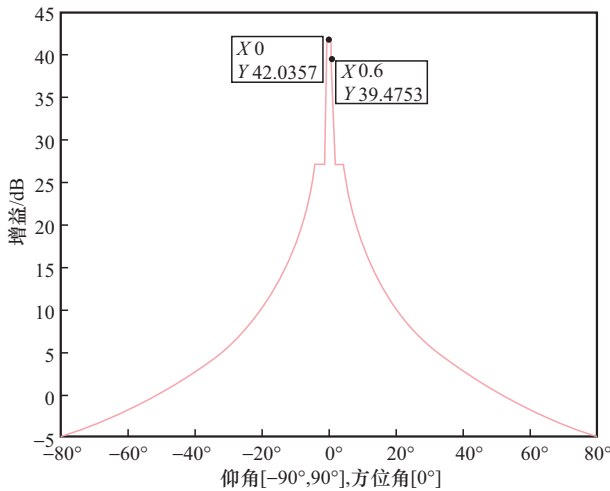


图8 ITU-R S.1528 抛物面天线方向图

2.3 终端部署方法

在地球为标准球体的假设下，为实现终端均匀部署，提出使用“菲波那契网格”在球面上实现网格点等效终端均匀部署。服务区内终端应均匀撒点以测算服务区内各个位置的网络性能，假设需要生成 N 个终端，则撒点

公式可表示为：

$$\begin{cases} x = \sqrt{1 - \left(\frac{2n-1}{N-1}\right)^2} \times \cos(2\pi n\varphi) \times R_{\text{earth}} \\ y = \sqrt{1 - \left(\frac{2n-1}{N-1}\right)^2} \times \sin(2\pi n\varphi) \times R_{\text{earth}} \\ z = \frac{2n-1}{N-1} \times R_{\text{earth}} \end{cases}, n=1,2,\dots,N \quad (5)$$

其中, R_{earth} 表示地球半径, $\varphi = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 。 x 、 y 、 z 分别表示终端点位在地心地固 (earth-centered, earth fixed, ECEF) 坐标系下的 x 、 y 、 z 坐标。

2.4 传播模型方法

假设卫星与地面目标终端间的信号在理想且无阻碍的自由空间中传播，则根据自由空间损耗模型可知，其计算路径损耗为：

$$\text{PL} = 32.4 + 20 \lg(d_{\text{Sat_UE}}) + 20 \lg(f) \quad (6)$$

其中，发射端和接收端的距离 $d_{\text{Sat_UE}}$ 单位为 km，载波频率 f 单位为 MHz，据此可以得到路径损耗。

此外，星地信号传输过程还需考虑天气、雨衰落、人体损耗、天线极化损耗等影响信号质量的因素。

对于星地距离，首先需要将卫星、地面终端的经纬度转换至 ECEF 坐标系，得到对应的位置信息，从而根据欧几里得公式计算二者间的距离：

$$d_{\text{Sat_UE}} = \sqrt{(x_{\text{sat}} - x_{\text{UE}})^2 + (y_{\text{sat}} - y_{\text{UE}})^2 + (z_{\text{sat}} - z_{\text{UE}})^2} \quad (7)$$

其中， x_{sat} 、 y_{sat} 、 z_{sat} 表示目标卫星的坐标， x_{UE} 、 y_{UE} 、 z_{UE} 表示卫星服务区范围内的终端坐标。

2.5 服务区划分计算

卫星服务区可根据需要形成不同形状区域，以锥形服务区为例，通过设置卫星离轴角进行建模，在地面形成圆形的卫星服务区投影区域，如图9所示。

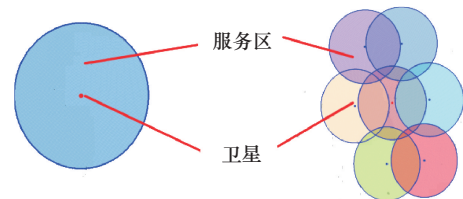


图9 卫星服务区划分

2.6 链路性能计算模块

根据收发端性能参数及路径损耗，可计算上下行链路接收信噪比 (signal-to-noise ratio, S/N)，以下行链路为例，终端接收信噪比 $S/N_{\text{UE,Rx}}$ 建模公式为：

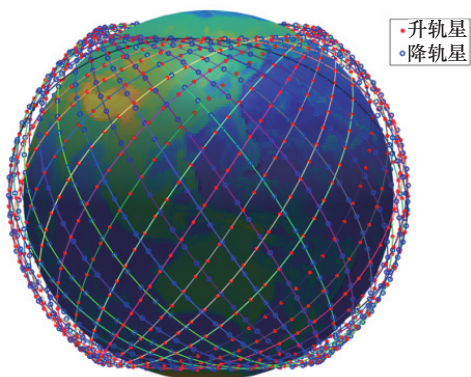


图11 星座建模仿真结果

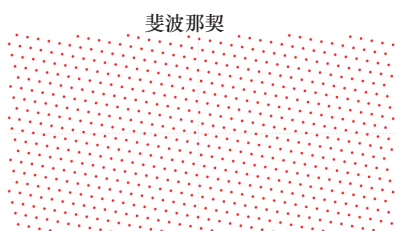


图12 基于“斐波那契网格”建模的终端位置部署仿真结果

通过单星覆盖性能热力图和CDF曲线,可得单星覆盖范围仿真结果,如图13所示。

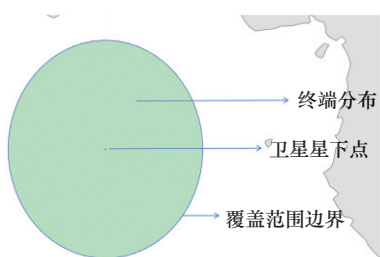


图13 单星覆盖范围仿真结果

相控阵天线下行增益、自由空间损耗热力图如图14和图15所示。

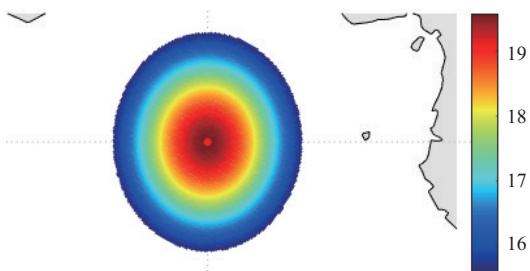


图14 相控阵天线下行增益热力图

当卫星下行波束指向每个地面终端时,绘制 C/N 热力图和CDF曲线如图16和图17所示。

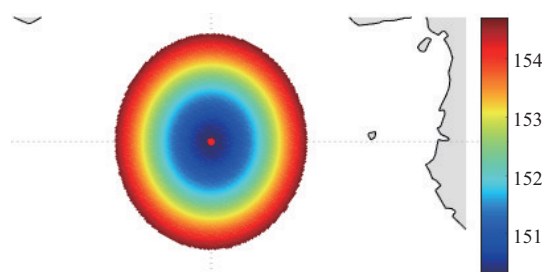
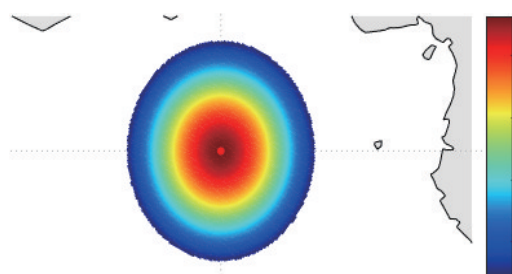
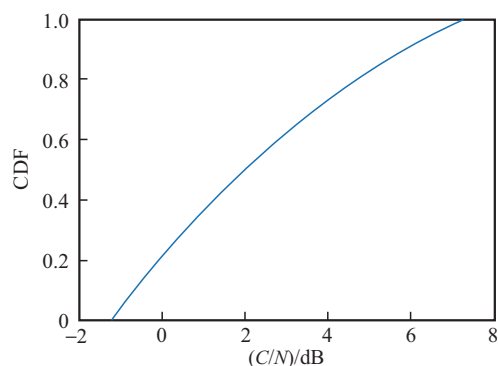


图15 自由空间损耗热力图

图16 下行 C/N 热力图图17 下行 C/N CDF 曲线

通过查找 C/N 对应的频谱效率,计算得到卫星下行单波束指向每个地面终端时的单波束速率,以及当卫星系统采用跳波束^[11-12]服务时的单星下行总容量 CDF 曲线,如图18和图19所示。

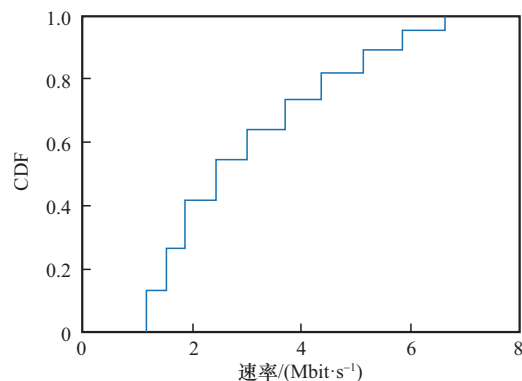


图18 下行单波束容量CDF曲线

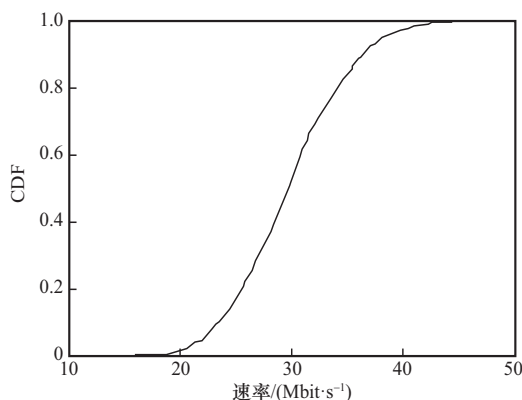


图 19 基于跳波束的下行单星容量 CDF 曲线

5 结束语

本文针对低轨卫星互联网系统链路性能评估需求,提出一种仿真建模方法和仿真流程,通过建立卫星星座、终端部署、传播模型、天线特性等模型开展卫星互联网系统性能仿真评估的建模底座,用于支撑更进一步的仿真分析。对于终端部署建模,提出一种基于“斐波那契网格”的建模思路,能够实现面终端的高效均匀部署,并通过可视化手段直观呈现天线增益、路径损耗等过程性评估数据以及最终覆盖 C/N 、速率等效能数据。基于此建模思路,当开展低轨星座轨道设计、天线性能指标设计时,仅需修改相应参数即可仿真获取最终速率、通信容量等系统性能指标,为系统链路性能分析提供快速可靠的技术支撑,可有力推动低轨卫星互联网技术的创新突破与工程实践落地。

参考文献

- [1] 林思德. 中低轨卫星互联网发展概况[J]. 中国无线电, 2024(11): 28-32.
LIN S D. Overview of medium and low earth orbit satellite Internet development[J]. China Radio, 2024(11): 28-32.
- [2] 张亮. 高低轨卫星一体化协调应用的关键技术与实践[J]. 无线互联科技, 2024, 21(11): 7-9.
ZHANG L. Key technologies and practices for integrated and coordinated application of high and low orbit satellites[J]. Wireless Internet Science and Technology, 2024, 21(11): 7-9.
- [3] 刘悦, 田野, 赵冬, 等. 手机直连低轨卫星的应用场景及业务需求分析[J]. 通信学报, 2024(4): 56-65.
LIU Y, TIAN Y, ZHAO D, et al. Analysis on application scenarios and requirements for direct-to-handset LEO satellite[J]. Journal on Communications, 2024(4): 56-65.
- [4] 乔艳丽. 低轨卫星移动通信建模与仿真实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- QIAO Y L. Modeling and simulation of LEO satellite mobile communication channel[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [5] 何遵文, 杜川, 张焱, 等. 多场景卫星通信信道动态建模与仿真实现[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 87-95.
HE Z W, DU C, ZHANG Y, et al. Dynamic modeling and simulation of multi-scenario satellite communication channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(1): 87-95.
- [6] GE H B, LI B F, JIA S, et al. LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): progress, opportunities, and challenges[J]. Geo-spatial Information Science, 2022, 25(1): 1-13.
- [7] 李星辰. 一种低轨卫星网络仿真系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
LI X C. Design and implementation of a LEO satellite network simulation system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [8] 孙耀华, 江沐泽涵, 彭木根. 人工智能驱动的手机直连低轨卫星通信[J]. 无线电通信技术, 2024 50(6): 1075-1086.
SUN Y H, JIANG S Z H, PENG M G. Artificial intelligence driven direct-to-handset satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(6): 1075-1086.
- [9] 朱剑锋, 孙耀华, 冯昕澳, 等. 星地融合网络中的干扰管理与频谱共享: 研究进展、关键技术及未来挑战[J]. 电信科学, 2025, 41(3): 108-127.
ZHU J F, SUN Y H, FENG X A, et al. Interference management and spectrum sharing in integrated satellite-terrestrial networks: progress, key technologies and future directions[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(3): 108-127.
- [10] ITU-R. Working document on sharing and compatibility studies under WRC-27 agenda item 1.13-Annex 7 to Working Party 4C Chair's Report[R]. 2025.
- [11] 石会鹏, 郭丁, 牟瑞硕, 等. 低轨卫星通信系统跳波束图案设计算法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(3): 612-622.
SHI H P, GUO D, MU R S, et al. Beam hopping pattern design algorithm of low earth orbit satellite communication system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(3): 612-622.
- [12] 张晨, 徐阳威, 李宛静, 等. 基于多智能体深度强化学习的低轨星座跳波束资源调度研究[J]. 通信学报, 2025, 46(1): 35-51.
ZHANG C, XU Y W, LI W J, et al. Research on low earth orbit constellation beam hopping resource scheduling based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. Journal on Communications, 2025, 46(1): 35-51.

[作者简介]



马东俊 (1992-), 女, 硕士, 中国星网网络创新研究院工程师, 主要研究方向为低轨卫星接入与组网、星地融合、5G/6G 移动通信系统关键技术等。



韩福勇（1998-），男，硕士，中国星网网络创新研究院有限公司助理工程师，主要研究方向为卫星互联网接入网、干扰共存。



朱雪田（1975-），男，博士，中国星网网络创新研究院副总经理，主要研究方向为卫星互联网网络技术研发与创新。



张少伟（1992-），男，硕士，中国星网网络创新研究院工程师，主要研究方向为低轨卫星接入与组网、频谱工程、干扰共存。



李红艳（1966-），女，博士，西安电子科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为时间确定性网络、天地一体化网络、新一代无线局域网、时变图技术等。