



专题：星地融合移动通信及卫星互联网

基于随机几何的星地融合组网下行成功传输概率分析

宋紫旭, 孙耀华, 李睿雯, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 星地融合组网能够有效补充地面蜂窝网络覆盖, 满足6G全时全域通信需求。为深入分析星地融合组网下行成功传输概率, 利用随机几何工具, 采用二项式点过程和泊松点过程分别对卫星和地面基站的空间分布进行建模, 推导了典型用户下行成功传输概率表达式。通过蒙特卡洛仿真验证了理论推导的正确性, 并研究了星地异频组网下地面基站部署空洞半径、空间链路中正交频率信道的数量和基站密度等网络参数对下行成功传输概率的影响。研究表明, 星地融合组网可有效解决地面基站存在部署空洞的问题; 在一定范围内提高卫星频段信道划分数和增加地面基站密度均可有效提高下行成功传输概率。

关键词: 星地融合组网; 随机几何; 下行成功传输概率; 二项式点过程; 泊松点过程

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025141

Successful transmission probability analysis for satellite-terrestrial integrated networks based on stochastic geometry

SONG Zixu, SUN Yaohua, LI Ruiwen, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Satellite-terrestrial integrated network can effectively complement the coverage of terrestrial cellular networks, meeting the full-time, full-area communication requirements of the 6G. To thoroughly analyze the downlink successful transmission probability in satellite-terrestrial integrated networks, stochastic geometry tools were employed, where binomial point processes (BPP) and Poisson point processes (PPP) were adopted to model the spatial distributions of satellites and terrestrial base stations (BSs). A closed-form expression for the downlink successful transmission probability of a typical user was derived. The accuracy of the theoretical derivation was verified through Monte Carlo simulations, and the impacts of key network parameters—including the deployment void radius of terrestrial BSs, the number of orthogonal frequency channels in spatial links, and BSs density—on the downlink successful transmission probability were investigated under satellite-terrestrial heterogeneous frequency networking. The results indicated that: the satellite-terrestrial integrated network effectively addressed the deployment void problem of terres-

收稿日期: 2025-03-12; 修回日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62371071)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62371071)

trial BSs; within a certain range, increasing the number of satellite frequency-domain channel partitions or terrestrial BSs density significantly improved the downlink successful transmission probability.

Key words: satellite-terrestrial integrated network, stochastic geometry, downlink successful transmission probability, BPP, PPP

0 引言

随着信息技术的飞速发展, 社会对通信技术的需求日益增长。5G虽然在速率、时延和连接数密度等方面取得了显著突破, 但在覆盖范围、频谱效率、智能化水平等方面仍存在局限性, 无法完全满足未来复杂多样的应用场景需求。6G的提出旨在突破这些局限性, 为未来社会提供更高效、更智能的通信解决方案。6G不仅将数据传输速率提升至Tbit/s级别, 还将时延降低到微秒级, 同时实现全球无缝覆盖。此外, 6G还将深度融合通信、感知、计算和人工智能等技术, 推动“万物互联”向“万物智联”转变, 为数字孪生、智能体互联等新兴应用场景提供支撑。

星地融合组网作为6G的关键技术, 能够实现地面通信网络的覆盖增强和补盲, 满足地面和立体空间的全域、全天候的泛在覆盖需求, 从而实现用户随时随地按需接入^[1-2]。近年来, 由于低轨卫星星座不仅能满足全球无缝覆盖需求, 还具有低时延、丰富的频谱资源和强大的抗干扰能力等特性, AST SpaceMobile、Lynk Global、SpaceX等新兴卫星创业公司开始专注手机直连低轨卫星通信, 使其在应急通信、物联网、智慧城市等领域展现出巨大的应用潜力, 引发新一轮卫星通信和地面移动通信融合的热潮^[3-4]。此外, 国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)、第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)等主要标准化组织已启动星地融合组网的研究工作。2019年ITU-R提出4种星地融合应用场景。2022年3GPP R17阶段完成第一个融合标准, 之后的R18和R19继续推进非地

面网络(non-terrestrial network, NTN)技术的实用化和性能优化。2023年6月, 国际电信联盟无线电局卫星研究组第二工作组(ITU-R SG4 WP4B)通过了中国提出的《卫星国际移动通信(international mobile telecommunications, IMT)未来技术趋势》研究报告立项, 重点关注卫星在IMT-2030中的应用驱动力及关键技术^[4]。面向未来星地融合组网的部署和应用, 有必要进行网络参数对传输性能影响的分析与评估。

在网络性能分析方面, 随机几何是学术界常用的分析工具。在无线通信中, 随机几何通过有效描述和分析具有随机性和不规则性的复杂网络节点分布, 分析其覆盖和连通性等问题, 为网络设计提供了理论依据, 具有普适性。相较于文献[5]和文献[6]中的数值仿真方式, 面对网络模型的扩大, 利用随机几何能够高效且简便地分析网络参数对成功传输概率和平均可达速率等性能指标的影响^[7]。针对地面移动通信网络场景, 现有研究大多采用泊松点过程(Poisson point process, PPP)对地面基站的空间分布进行建模。例如, 文献[8]采用PPP对单层蜂窝网络基站分布进行建模, 推导出下行链路成功传输概率表达式。在文献[9]中, 进一步将该分析方法扩展至K层异构蜂窝网络。文献[10]基于非齐次PPP过程, 分析了毫米波蜂窝网络中视距和非视距情况下的成功传输概率。

随着低轨卫星通信的发展, 已有学者利用随机几何分析了低轨卫星通信网络的上行和下行成功传输概率。PPP分布是其中一种常用的建模方式, 可以预测给定范围内卫星或者用户数量的概率。文献[11]和文献[12]采用PPP分布对卫星空间



位置进行建模，推导出接触角的近似分布，并进一步分析了单层卫星网络下行和上行成功传输概率表达式。文献[13]采用非齐次PPP建模卫星分布，分析了噪声受限条件下用户下行成功传输概率。然而，PPP分布虽被广泛应用，但低轨星座场景具有网络区域受限且卫星数固定的特点，因此，采用二项式点过程（binomial point process, BPP）进行建模更具优势^[14]。在文献[15]中，基于BPP分布，作者推导了单层低轨卫星网络的下行成功传输概率表达式，且证明该表达式可以较好地拟合沃克星座（沃克星座是一种轨道平面满足均匀分布，且卫星在轨道面内满足均匀分布的星座）。文献[16]考虑了多层星座场景，利用BPP分布推导出卫星到观测点的最近距离分布，并进一步在文献[17]中推导出用户-卫星-信关站端到端链路的成功传输概率。文献[18]将有限空间中的多颗卫星和民用航空器位置建模为三维BPP，分析了卫星、民用航空器和地面基站间的下行成功传输概率。上述文献考虑的均为齐次BPP，即随机星座满足均匀分布，虽与大部分实际星座分布不符，但仿真表明和真实星座的性能指标几乎完全匹配。它们之间只有微小的偏差，可以通过考虑卫星沿不同纬度分布不均匀的影响来进行补偿。因此，在一些特定的应用场景下，齐次BPP分布可以作为一种近似方法，为后续的详细设计和优化提供基础。例如，在规划大规模卫星星座的初步设计和性能评估时，可以先假设卫星均匀分布，估算其覆盖性能和通信能力等，再根据实际情况进行调整和优化。

目前，利用随机几何分析星地融合组网的性能也逐渐成为研究热点。文献[19]针对低轨卫星辅助岸到船通信场景，推导了端到端成功传输概率及平均可达速率。文献[20]基于PPP分布，比较了3种星地融合通信传输方案下的成功传输概率，但地面衰落模型为Nakagami-m衰落。在文献[21]中，作者利用PPP对卫星和地面基站的空

间分布进行建模，分析了上行成功传输概率，但基于理想化假设，卫星和地面基站天线模型均简化为全向天线。此外，上述文献均未考虑地面基站存在部署空洞的情况，且不适用于卫星数目固定的场景。综合上述因素，关于星地融合组网下行成功传输概率的分析还需进一步的研究。为体现本研究的必要性，作者对上述文献场景建模进行了总结。相关研究对比见表1，其中“√”表示考虑了对应内容，“×”表示未考虑。本工作较之于其他文献考虑了更现实的模型，同时将其应用于较新的星地融合场景中。

表1 相关研究对比

相关研究	接触距离分布	卫星频域信道划分	实际卫星天线模型	星地融合网络
文献[11,13]	×	×	×	×
文献[12]	×	×	√	×
文献[15-17]	√	√	×	×
文献[19]	√	√	×	√
文献[20]	√	×	×	√
文献[21]	×	×	×	√
文献[7]	×	×	√	√
本文	√	√	√	√

具体来说，为解决上述相关研究的不足，本文考虑了星地融合网络中异频组网的场景，利用低轨卫星弥补地面基站覆盖不足的问题。在建模方面，本文利用球面BPP对处于不同正交频率信道的卫星分布进行建模，利用PPP对地面基站分布进行建模，推导出典型用户到服务基站和服务卫星的最近距离分布等空间几何统计特性，最终得到星地融合组网的下行成功传输概率表达式。最后，使用蒙特卡洛仿真分析验证了理论推导的正确性，并研究了星地异频组网下地面基站部署空洞半径、空间链路中正交频率信道的数量和基站密度等网络参数对下行成功传输概率的影响。

1 星地融合组网模型

为便于后续的性能分析，本节给出星地融合

组网场景下的系统模型、星地信道以及星载天线方向图等数学模型，还介绍了用于辅助网络性能分析的相关引理。

1.1 系统场景建模

本文提出的星地融合组网场景的卫星分布模型和典型用户可视范围如图 1 所示。该模型主要包括典型用户、低轨卫星星座和多个地面基站。假设以地球中心为原点，以原点指向北极的矢量为 z 轴，以地球赤道面内的矢量为 y 轴，构建三维直角坐标系。其中， x 轴方向向量与 y 轴和 z 轴向量垂直，地球半径为 R_e 。由于本文的分析过程仅依赖于用户和卫星的相对位置，因此分析过程适用于地球上任意位置的用户。假设典型用户的坐标 $\mathbf{u}=(0,0,R_e)$ ，典型用户配备全向天线。

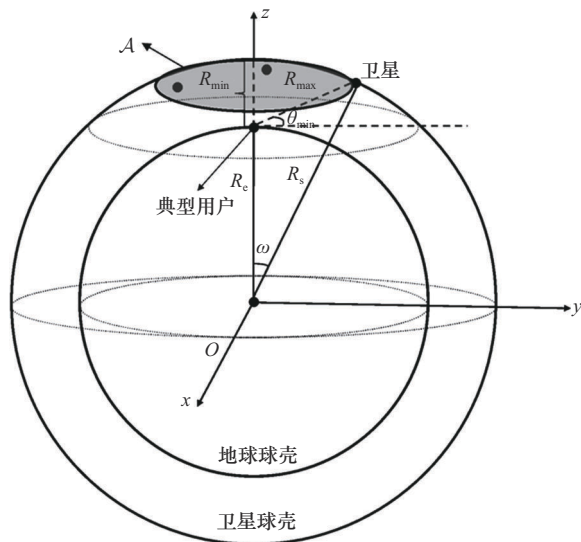


图1 卫星分布模型和典型用户可视范围

关于卫星星座，假设卫星服从以原点 $O \in \mathbb{R}^3$ 为中心的均匀分布^[15-17]，记球面半径为 R_s 。

$$S_{R_s}^2 = \{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 : \|\mathbf{x}\|_2 = R_s \} \quad (1)$$

其中， \mathbf{x} 表示卫星位置。假设该星座含有 N 颗卫星，其位置集合可定义为 $\mathbf{X}_{\text{sat}} = \{ \mathbf{x}_{\text{sat},1}, \mathbf{x}_{\text{sat},2}, \dots, \mathbf{x}_{\text{sat},N} \}$ 。

此外，假设卫星的轨道高度为 R_H ，将星座可用的频谱资源划分为 K 个 ($K \leq N$) 正交的频域信道，每个信道随机分配给 N 颗卫星，则可视范围

内使用同一信道的干扰卫星数 N_I 满足 $0 \leq N_I \leq \frac{N}{K} - 1$ 。因此，该星座在特定球面上将形成一个半径为 $R_s = R_e + R_H$ 的齐次 BPP 分布。典型用户在该场景下的可视范围面积 $|A|$ 和卫星在小于 r 的距离内与该用户成功通信的分布范围面积 $|A_{r,\text{sat}}|$ 的数学表达式如下。

$$|A| = \frac{\pi R_s (R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2)}{R_e}, \quad R_{\text{min}} \leq r \leq R_{\text{max}} \quad (2)$$

$$|A_{r,\text{sat}}| = \frac{\pi R_s (r^2 - R_{\text{min}}^2)}{R_e} \quad (3)$$

其中， $R_{\text{min}} = R_s - R_e = R_H$ ，表示典型用户与服务卫星通信的最小距离； $R_{\text{max}} = \sqrt{R_s^2 - R_e^2 + (R_e \sin \theta_{\text{min}})^2} - R_e \sin \theta_{\text{min}}$ ，表示其通信最大距离， θ_{min} 为最小通信仰角。

异频星地组网场景如图 2 所示。假设以典型用户为圆心、半径为 R_0 的范围内没有基站，空洞外的基站分布可建模为半径为 r ($r \geq R_0$)，密度为 λ_{bs} 的齐次 PPP 分布，其位置集合可以表示为 $\{ \mathbf{x}_{\text{bs},1}, \mathbf{x}_{\text{bs},2}, \dots, \mathbf{x}_{\text{bs},i} \}$ 。

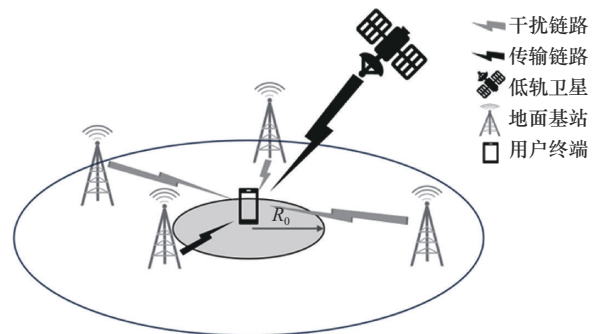


图2 异频星地组网场景

其中，圆环范围 $|A_{r,\text{bs}}|$ 内含有基站数等于 m 时的概率如下。

$$P(M=m) = \frac{(|A_{r,\text{bs}}| \lambda_{\text{bs}})^m}{m!} e^{-|A_{r,\text{bs}}| \lambda_{\text{bs}}} \quad (4)$$

$$|A_{r,\text{bs}}| = \pi (r^2 - R_0^2) \quad (5)$$



1.2 传播模型

1.2.1 信道模型

由于地-地的信道条件与星-地的信道条件存在差异，需对二者分别建模。关于地-地信道模型，考虑到地面基站的多径效应，参考文献[22]，采用均值为1的瑞利分布，即 $h_{bs,i} \sim \exp(1)$ 。第 i 个基站到典型用户的自由空间路径损耗 $L_{bs,i}$ 表示如下。

$$L_{bs,i} = \left(\frac{c}{4\pi f_{bs}} \right)^2 r_{bs,i}^{-\alpha_{bs}}, \mathbf{x}_{sat,i} \in \mathbf{X}_{bs} \quad (6)$$

其中， c 为光速， f_{bs} 为基站的工作频点， $r_{bs,i} = \|\mathbf{x}_{bs,i} - \mathbf{u}\|$ 表示基站到典型用户的距离， α_{bs} 为地面通信链路间的路径损耗指数。

同理，关于星-地信道模型，第 i 个卫星到典型用户的自由空间路径损耗可表示为：

$$L_{sat,i} = \left(\frac{c}{4\pi f_{sat}} \right)^2 r_{sat,i}^{-\alpha_{sat}}, \mathbf{x}_{sat,i} \in \mathbf{X}_{sat} \quad (7)$$

由于卫星信号传播受到各种因素的影响，包括自由空间、路径损耗、散射、反射、衍射、阴影和多径等^[19]，采用阴影莱斯（shadowed-Rician, SR）衰落能够准确地对这些特性进行建模。该模型包含描述信号视距成分的 Nakagami-m 衰落以及描述非视距多径成分的 Rice 衰落，文献[23]验证了其能够很好地拟合实测数据。第 i 个卫星到用户的 SR 衰落增益可表示为 $h_{sat,i} \sim \text{SR}(b, m, \Omega)$ ，其概率密度分布的表达式如下。

$$f_{h_{sat,i}}(x) = \left(\frac{2bm}{2bm + \Omega} \right)^m \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{x}{2b}\right) \cdot {}_1F_1\left(m, 1, \frac{\Omega x}{2b(2bm + \Omega)}\right) \quad (8)$$

其中， b 表示散射分量的平均功率， m 表示 Nakagami-m 衰落系数， Ω 表示直射分量的平均功率， ${}_1F_1(\cdot, \cdot, \cdot)$ 为超几何函数。

由于式 (8) 十分复杂，文献[24]提供一种方法将其近似为伽马随机变量 $G(\alpha_s, \beta_s)$ ：

$$f_{h_{sat,i}}(x) \approx \frac{x^{\alpha_s - 1} e^{-\frac{x}{\beta_s}}}{\beta_s^{\alpha_s} \Gamma(\alpha_s)} \quad (9)$$

此处， $\alpha_s = \frac{m(2b + \Omega)^2}{4mb^2 + 4mb\Omega + \Omega^2}$ 表示形状参数，

$\beta_s = \frac{4mb^2 + 4mb\Omega + \Omega^2}{m(2b + \Omega)}$ 表示尺度参数。 $h_{sat,i}$ 的互

补累积分布函数（complementary cumulative distribution function, CCDF）由文献[7]给出。其中 $H_{sat,i}$ 表示第 i 颗卫星到用户的衰落功率， $\varepsilon = (\alpha_s!)^{-\frac{1}{\alpha_s}}$ 且等式在 $\alpha_s = 1$ 时成立。

$$P[H_{sat,1} > x] = \sum_{l=1}^{\alpha_s} \binom{\alpha_s}{l} (-1)^{l+1} e^{-\frac{\varepsilon x}{\beta_s}} \quad (10)$$

1.2.2 天线增益

地面基站假设为全向天线，而星载天线模型根据文献[25]提供的标准可以表示为：

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_m, & \varphi < \varphi_{3dB} \\ G_m \times 3 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right), & \varphi_{3dB} < \varphi < Y \\ G_m + L_S \times 25 \lg \left(\frac{\varphi}{Y} \right), & Y < \varphi < Z \\ L_F, & Z < \varphi \end{cases} \quad (11)$$

其中， $Y = 1.5\varphi_{3dB}$ ， $Z = Y \times 10^{0.04}(G_m + L_S + L_F)$ 。 φ_{3dB} 表示半功率波束宽度，单位为°； G_m 表示天线峰值发射增益，单位为 dBi； L_S 表示近主瓣的旁瓣电平，单位为 dBi； L_F 表示最远旁瓣电平，单位为 dBi； φ 表示波束中心线和用户间的离轴角，单位为°。

当卫星到用户间距离为 $r_{sat,i}$ 时，其关系如下。

$$\varphi(r) = \arccos\left(\frac{R_s^2 + r_{sat,i}^2 - R_e^2}{2R_s r_{sat,i}}\right) \quad (12)$$

1.3 相关引理

在可视范围内，距离典型用户最近的卫星和基站可以被视为服务卫星和服务基站。为在后续章节中推导出网络性能的表达式，本节给出相关引理。

1.3.1 服务基站最近距离分布的概率密度函数

假设 $\mathbf{x}_{\text{bs},1}$ 表示最近服务基站的位置，其到典型用户的距离为 $R_{\text{bs}} = \|\mathbf{x}_{\text{bs},1} - \mathbf{u}\|$ ($r_{\text{bs}} \geq R_0$)。由于基站满足泊松分布，可优先考虑最近基站离典型用户距离大于 r 的概率，即距离 r 内不存在基站的概率。记 CCDF 为 $F_{R_{\text{bs}}}^{\text{C}}(r)$ ，则根据式 (5)，给定圆环范围 $|A_{r,\text{bs}}|$ 内不存在基站的概率为：

$$F_{R_{\text{bs}}}^{\text{C}}(r) \triangleq P(R_{\text{bs}} > r) \triangleq P(|\mathbf{X}_{\text{bs}} \cap A_{r,\text{bs}}| = 0) = \exp\left(-\pi(r^2 - R_0^2)\lambda_{\text{bs}}\right) \quad (13)$$

因此，服务基站最近距离分布的概率密度函数 (probability density function, PDF) 如下。

$$f_{R_{\text{bs}}}(r) = \mathbb{P}(R_{\text{bs}} \leq r)' = \left(1 - F_{R_{\text{bs}}}^{\text{C}}(r)\right)' = 2\pi\lambda_{\text{bs}}r \exp\left(-\pi(r^2 - R_0^2)\lambda_{\text{bs}}\right), r \geq R_0 \quad (14)$$

1.3.2 卫星分布的 PDF

由图 1 可知，用户可视范围内任意球冠面积 $|A_{r,\text{sat}}| = 2\pi R_s^2(1 - \cos \omega)$ 。假设任意卫星与典型用户的距离为 R ，根据文献[15]，其可以表示为：

$$R^2 = R_{\text{min}}^2 + \frac{|A_{r,\text{sat}}|}{\pi} \left(1 - \frac{R_{\text{min}}}{R_s}\right) \quad (15)$$

因此，任意卫星的距离分布概率为：

$$P(R \leq r) \triangleq P(R^2 \leq r^2) = P\left[|A_{r,\text{sat}}| \leq \frac{(r^2 - R_{\text{min}}^2)\pi}{\left(1 - \frac{R_{\text{min}}}{R_s}\right)}\right] \stackrel{(a)}{=} \frac{(r^2 - R_{\text{min}}^2)\pi}{\left(1 - \frac{R_{\text{min}}}{R_s}\right)4\pi R_s^2} = \frac{(r^2 - R_{\text{min}}^2)}{4R_e R_s} \quad (16)$$

由于卫星均匀分布，(a)可由该球冠面积占整个球面面积的比例所得。因此，累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 可表示为：

$$F_R(r) \triangleq P(R \leq r) = \begin{cases} 0, & r < R_{\text{min}} \\ \frac{r^2 - R_{\text{min}}^2}{4R_e R_s}, & R_{\text{min}} \leq r \leq 2R_e + R_{\text{min}} \\ 1, & r > 2R_e + R_{\text{min}} \end{cases} \quad (17)$$

由此可得对应的 PDF：

$$f_R(r) = F_R'(r) = \begin{cases} \frac{r}{2R_e R_s}, & R_{\text{min}} \leq r \leq 2R_e + R_{\text{min}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

1.3.3 服务卫星最近距离分布的 PDF

假设 $\mathbf{x}_{\text{sat},1}$ 表示最近服务卫星的位置，其到典型用户的距离为 $R_{\text{sat}} = \|\mathbf{x}_{\text{sat},1} - \mathbf{u}\|$ ($R_{\text{sat}} \geq R_{\text{min}}$)。与地面服务卫星最近距离分布求解同理，由于卫星满足 $N \sim B(N, F_R(r))$ 的二项式分布，记 CCDF 为 $F_{R_{\text{sat}}}^{\text{C}}(r)$ ，则给定范围内不存在卫星的概率如下。

$$F_{R_{\text{sat}}}^{\text{C}}(r) \triangleq \mathbb{P}(R_{\text{sat}} > r) = \binom{N}{0} (F_R(r))^0 (1 - F_R(r))^N = \left(1 - \frac{r^2 - R_{\text{min}}^2}{4R_e R_s}\right)^N, R_{\text{min}} \leq r \leq 2R_e + R_{\text{min}} \quad (19)$$

因此，服务卫星最近距离分布的 PDF 为：

$$f_{R_{\text{sat}}}(r) = \mathbb{P}(R_{\text{sat}} \leq r)' = \left(1 - F_{R_{\text{sat}}}^{\text{C}}(r)\right)' = \frac{rN}{2R_e R_s} \left(1 - \frac{r^2 - R_{\text{min}}^2}{4R_e R_s}\right)^{N-1}, R_{\text{min}} \leq r \leq 2R_e + R_{\text{min}} \quad (20)$$

1.3.4 已知服务卫星条件下的干扰卫星 PDF

当服务卫星距离为 $R_{\text{sat}} = r$ 时，假设干扰卫星距离用户为 R_i ($0 \leq i \leq N_I$)，则干扰卫星离用户距离小于或等于 r_i 的条件 CDF 为：

$$F_{R_i|R_{\text{sat}}}(r_i|r) \triangleq P(R_i \leq r_i | R_{\text{sat}} = r) = \frac{\mathbb{P}(r < R_i \leq r_i)}{\mathbb{P}(R > r)} = \frac{F_R(r_i) - F_R(r)}{1 - F_R(r)} \quad (21)$$



由于此条件下 $F_R(r)$ 为确定值，式 (21) 的 PDF 为：

$$f_{R_i|R_{\text{sat}}}(r_i|r) = F_{R_i|R_{\text{sat}}}(r_i|r)' = \frac{f_R(r_i)}{1 - F_R(r)} = \frac{2r_i}{4R_e R_s - r^2 + R_{\text{min}}^2}, r < r_i \leq 2R_e + R_{\text{min}} \quad (22)$$

1.3.5 二项式分布中正向结果的概率

卫星服从 BPP 分布，因此当服务卫星处于可视范围内时，干扰卫星数在可视范围内也服从 $N_I \sim B\left(\frac{N}{K} - 1, P_I\right)$ 的 BPP 分布，其中 P_I 为干扰卫星可视的概率。由于卫星均匀分布，代入式 (2)、式 (3)， P_I 由于干扰卫星可存在的表面积与除去当前服务卫星所构成的球冠面积的总球面面积之比所得。

$$P_I = \frac{|A| - |A_{r,\text{sat}}|}{4\pi R_s^2 - |A_{r,\text{sat}}|} = \frac{R_{\text{max}}^2 - r^2}{4R_s R_e - r^2 + R_{\text{min}}^2} \quad (23)$$

2 星地融合场景下的下行成功传输概率推导

本节利用随机几何，结合干扰卫星功率和干扰基站功率的拉普拉斯变换，推导出星地组网场景下典型用户的下行传输成功概率表达式。在地面通信链路中，下行成功传输概率定义为信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 高于阈值 τ 的概率，记为 $P_{\text{bs}}(\tau)$ ，并由式 (24) 给出。

$$P_{\text{bs}}(\tau) \triangleq p(\text{SINR}_{\text{bs}} > \tau) \quad (24)$$

$$P_{\text{bs}}(\tau) \triangleq p(\text{SINR}_{\text{bs}} > \tau) = \mathbb{E}_{r,H,I} \left\{ p \left(\frac{G_{\text{bs},1} P_{\text{bs}} H_{\text{bs},1} L(r_{\text{bs},1})}{\sum_{\mathbf{x}_{\text{bs},i} \in \mathbf{X}_{\text{bs}} \setminus \{\mathbf{x}_{\text{bs},1}\}} G_{\text{bs},i} P_{\text{bs}} H_{\text{bs},i} L(r_{\text{bs},i}) + \sigma^2} > \tau | R_{\text{bs}} = r_{\text{bs}} \right) \right\} \stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{r,H,I} \left\{ p \left(H_{\text{bs},1} > \frac{\tau (I_{\text{bs}} + \sigma^2)}{G_{\text{bs},1} P_{\text{bs}} L(r_{\text{bs},1})} | R_{\text{bs}} = r_{\text{bs}} \right) \right\} \stackrel{(c)}{=} \int_{R_0}^{\text{inf}} \exp(-s_{\text{bs}} \sigma^2) \mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}}) f_{R_{\text{bs}}}(r_{\text{bs}}) dr_{\text{bs}} \quad (30)$$

其中， $I_{\text{bs}} = \sum_{\mathbf{x}_{\text{bs},i} \in \mathbf{X}_{\text{bs}} \setminus \{\mathbf{x}_{\text{bs},1}\}} G_{\text{bs},i} P_{\text{bs}} H_{\text{bs},i} L_{\text{bs},i}$ 代入 (b) 中， $s_{\text{bs}} = \frac{\tau}{G_{\text{bs},1} P_{\text{bs}} L(r_{\text{bs}})}$ 和 $h_{\text{bs},i} \sim \exp(1)$ 代入 (c) 中。 $\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}})$ 为聚合干扰 I_{bs} 的拉普拉斯变换，可以表达为：

$$\text{SINR}_{\text{bs}} = \frac{G_{\text{bs},1} P_{\text{bs}} H_{\text{bs},1} L(r_{\text{bs},1})}{\sum_{\mathbf{x}_{\text{bs},i} \in \mathbf{X}_{\text{bs}} \setminus \{\mathbf{x}_{\text{bs},1}\}} G_{\text{bs},i} P_{\text{bs}} H_{\text{bs},i} L(r_{\text{bs},i}) + \sigma^2} \quad (25)$$

其中， τ 表示信号成功传输所需的最小 SINR， σ^2 表示噪声功率。

相反，当 SINR_{bs} 低于预定义阈值时，信号传输应采用空间链路，即由卫星下发信号给典型用户。其下行成功传输概率记为 $P_{\text{sat}}(\tau)$ ，可以表示为无同频干扰卫星时典型用户处接收到的 SNR 和存在同频干扰卫星时典型用户处接收到的 SINR 超过预先定义的阈值 τ 的概率之和：

$$P_{\text{sat}}(\tau) \triangleq p(\text{SINR}_{\text{sat}} > \tau | N_I > 0) + p(\text{SNR}_{\text{sat}} > \tau | N_I = 0) \quad (26)$$

$$\text{SINR}_{\text{sat}} = \frac{G(r_{\text{sat},1}) P_{\text{sat}} H_{\text{sat},1} L(r_{\text{sat},1})}{\sum_{\mathbf{x}_{\text{sat},i} \in \mathbf{X}_{\text{sat}} \cap A' \setminus \{\mathbf{x}_{\text{sat},1}\}} G(r_{\text{sat},i}) P_{\text{sat}} H_{\text{sat},i} L(r_{\text{sat},i}) + \sigma^2} \quad (27)$$

$$\text{SNR}_{\text{sat}} = \frac{G(r_{\text{sat},1}) P_{\text{sat}} H_{\text{sat},1} L(r_{\text{sat},1})}{\sigma^2} \quad (28)$$

因此，在星地融合组网场景下，下行成功传输概率是关于地面链路成功概率和空间链路成功概率的函数。

$$P_{\text{down}}^{\text{cov}} = P_{\text{bs}}(\tau) + (1 - P_{\text{bs}}(\tau)) \cdot P_{\text{sat}}(\tau) \quad (29)$$

2.1 地面网络下行成功传输概率推导

将式 (14) 代入式 (24) 中求解地面网络下行成功传输概率。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{bs}}(s_{bs}) &= \mathbb{E}_I\{\exp(-s_{bs}I_{bs})\} = \mathbb{E}_{r,H}\{\prod \exp(-s_{bs}G_{bs,i}P_{bs}H_{bs,i}L(r))\} \stackrel{(d)}{=} \\ &\mathbb{E}_r\{\prod \mathbb{E}_H\{\exp(-s_{bs}G_{bs,i}P_{bs}H_{bs,i}L(r))\}\} \stackrel{(e)}{=} \exp\left(-\int \left[1 - \mathbb{E}_H\{\exp(-s_{bs}G_{bs,i}P_{bs}H_{bs,i}L(r))\}\right] \wedge dr\right) \stackrel{(f)}{=} \quad (31) \\ &\exp\left(-\int \left[1 - \frac{1}{1 + s_{bs}G_{bs,i}P_{bs}L(r)}\right] \wedge dr\right) = \exp\left(-2\pi\lambda_{bs} \int_{r_{bs}}^{\infty} \left[1 - \frac{1}{1 + s_{bs}G_{bs,i}P_{bs}L(r)}\right] r dr\right) \end{aligned}$$

其中, (d) 遵循衰落过程和路径损耗过程在空间相互独立的特性, (f) 由均值为 1 的瑞利信道的性质所得, (e) 遵循 PPP 的概率生成函数, 可表示为:

$$E\{\prod f(x_i)\} = \exp\{-\int (1-f(x_i)) \wedge dx\} \quad (32)$$

2.2 卫星网络下行成功传输概率推导

将式 (10)、式 (20) 代入式 (26) 中求解卫星网络下行成功传输概率。

$$\begin{aligned} P_{sat}(\tau) &\triangleq p(\text{SINR}_{sat} > \tau | N_I > 0) + p(\text{SNR}_{sat} > \tau | N_I = 0) = \\ &\mathbb{E}_{r,H,I} \left\{ p\left(\frac{G(r_{sat,1})P_{sat}H_{sat,1}L(r_{sat,1})}{\sum_{\mathbf{x}_{sat,i} \in X_{sat} \cap A/\{\mathbf{x}_{sat,1}\}} G(r_{sat,i})P_{sat}H_{sat,i}L(r_{sat,i}) + \sigma^2} > \tau\right) \cdot (1-p(N_I=0)) + \right. \\ &p\left(\frac{G(r_{sat,1})P_{sat}H_{sat,1}L(r_{sat,1})}{\sigma^2} > \tau\right) \cdot p(N_I=0) \left. \right\} \stackrel{(g)}{=} \\ &\int_{R_{min}}^{R_{max}} \mathbb{E}_{H,I} \left\{ p\left(H_{sat,1} > \frac{\tau(I_{sat} + \sigma^2)}{G(r_{sat,1})P_{sat}L(r_{sat,1})}\right) \cdot (1-p(N_I=0)) + p\left(H_{sat,1} > \frac{\tau\sigma^2}{G(r_{sat,1})P_{sat}L(r_{sat,1})}\right) \cdot p(N_I=0) \right\} \cdot \\ &f_{R_{sat}}(r) dr \stackrel{(h)}{=} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \left\{ \sum_{l=1}^{\alpha_s} \binom{\alpha_s}{l} (-1)^{l+1} \exp(-s_{sat}\sigma^2) \left[\mathcal{L}_{I_{sat}}(s_{sat})(1-p(N_I=0)) + p(N_I=0) \right] \right\} \cdot f_{R_{sat}}(r) dr \quad (33) \end{aligned}$$

其中, $I_{sat} = \sum_{\mathbf{x}_{sat,i} \in X_{sat} \cap A/\{\mathbf{x}_{sat,1}\}} G(r_{sat,i})P_{sat}H_{sat,i}$ $\mathcal{L}_{I_{sat}}(s_{sat})$ 为聚合干扰 I_{sat} 的拉普拉斯变换。将 $L(r_{sat,i})$ 代入 (g), (h) 由 SR 衰落的 CCDF 决定。式 (22)、式 (23) 代入其中, 可得其表达式如下。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{sat}}(s_{sat}) &= \mathbb{E}_I\{\exp(-s_{sat}I_{sat})\} = \mathbb{E}_{N_I, R_i} \left\{ \prod_{i=1}^{N_I} \mathbb{E}_H[\exp(-s_{sat}G(r_{sat,i})P_{sat}H_{sat,i}L(r_{sat,i}))] \right\} = \\ &\mathbb{E}_{N_I} \left\{ \prod_{i=1}^{N_I} \int_r^{R_{max}} \mathbb{E}_H[\exp(-s_{sat}G(r_i)P_{sat}H_{sat,i}L(r_i))] \cdot f_{R_i|R_{sat}}(r_i|r) dr_i \right\} \stackrel{(i)}{=} \quad (34) \\ &\sum_{n_I=1}^{\frac{N}{K}-1} \left\{ \binom{\frac{N}{K}-1}{n_I} P_I^{n_I} (1-P_I)^{\frac{N}{K}-1-n_I} \cdot \left[\int_r^{R_{max}} \frac{1}{(1+s_{sat}G(r_i)P_{sat}L(r_i)\beta_s)^{\alpha_s}} \cdot f_{R_i|R_{sat}}(r_i|r) dr_i \right]^{n_I} \right\} \end{aligned}$$

其中, $s_{sat} = \frac{l\epsilon\tau}{\beta_s G(r_{sat,1})P_{sat}L(r_{sat,1})}$, (i) 由 SR 衰落的性质决定。

代入式 (29) 中可求得最终结果。

3 仿真分析

本节利用蒙特卡洛仿真验证星地融合组网

最后, 将式 (30)、式 (31)、式 (33)、式 (34)



中下行成功传输概率表达式的准确性。此外，还提供了数值结果来研究不同网络参数对信号传输性能的影响，包括基站密度、空间链路中正交频率信道的数量和地面基站部署空洞半径。在无特殊说明的情况下，默认仿真参数设置见表2。其中，卫星天线相关参数由ITU-R S.1528^[25]给出，3 dB波束宽度、卫星高度、星地频带带宽由3GPP TR 38.821^[26]表6-1.1.1.1给出。此外，在星地下行链路载频为4 GHz、星地频带带宽为30 MHz、子载波间隔为15 kHz的条件下，根据3GPP TS 38.104^[27]，其最大资源块数量为160，而资源块是正交频域信道中用于资源分配的基本单位，因此频域信道数 K 的设置应小于160。

表2 仿真参数设置

参数名称	数值
卫星数 (N)	400
划分频域信道数 (K)	150
SINR 门限 (τ)	-10~20 dB
地球半径 (R_e)	6 371 km
卫星轨道高度 (R_H)	600 km
最小仰角 (θ_{\min})	$\frac{\pi}{6}$
卫星发射功率 (P_{sat})	30 W
基站发射功率 (P_{bs})	25 W
星地下行链路载频 ($f_{c,\text{sat}}$)	4 GHz
地地下行链路载频 ($f_{c,\text{bs}}$)	2 GHz
3 dB波束宽度 ($2\cdot\psi_b$)	4.4127°
天线主瓣接收最大增益 (G_{max})	35 dBi
近主瓣的旁瓣电平 (L_S)	-6.75 dBi
最远旁瓣电平 (L_F)	5 dBi
SR信道散射分量的平均功率 ($2b$)	0.063 W
SR信道Nakagami- m 衰落系数 (m)	0.739
SR信道直射分量的平均功率 (Ω)	8.97×10^{-4} W
地面基站密度 (λ_{bs})	2 个/ km^2
地面频带带宽 (B_{bs})	40 MHz
星地频带带宽 (B_{sat})	30 MHz
噪声频谱密度 (N_{noise})	-174 dBm/Hz
地面基站空洞半径 (R_0)	100 m

当基站部署空洞半径 $R_0=100$ m时，异频星地融合组网、单地面网络和单卫星网络的下行成功传输概率如图3所示，其中散点表示仿真值，折线表示理论值。图3表明仿真值和理论值高度拟合，证明了异频星地融合组网下行成功传输概率理论推导的准确性。同时该图还表明异频星地融合组网、单地面网络和单卫星网络的下行成功传输概率随着SINR门限的增大而逐渐减小，且星地融合网络可有效解决基站部署存在空洞导致覆盖较低的问题。具体来看，单卫星网络和单地面网络的下行成功传输概率在低SINR门限时差异较小，星地融合网络在 $\tau=-5$ dB时相较于单卫星网络提升了38.78%的成功传输概率，相较于地面网络提升了43.45%的成功传输概率。

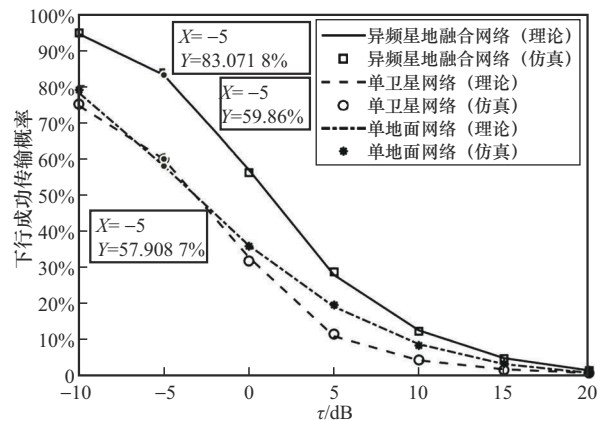
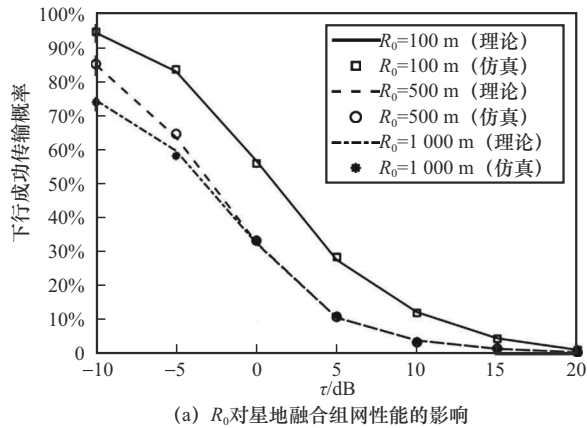


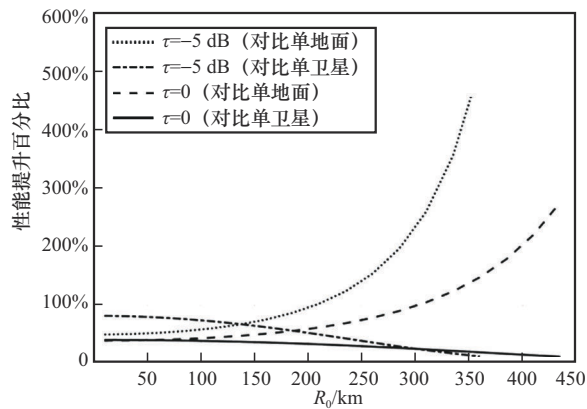
图3 $R_0=100$ m时异频星地融合组网、单地面网络和单卫星网络的下行成功传输概率

基站部署空洞半径 R_0 对星地融合网络下行成功传输概率的影响如图4所示。图4(a)表明随着 R_0 逐渐增大，下行成功传输概率会逐渐减小，直到 R_0 过大导致地面基站成功传输概率约为0时，星地融合组网的下行成功传输概率将只由单卫星网络决定，因此将保持不变。图4(b)通过计算星地融合组网相对于单地面和单卫星网络下行成功传输概率提升百分比来进一步探索 R_0 的影响。该图只截取了性能提升10%以上的数据，结

果表明，只要地面基站部署存在空洞，星地融合组网就能有效提高下行成功传输概率，且效果优于单地面网络。不过，随着 R_0 逐步增大，相对于单卫星网络，星地融合组网的性能提升在逐渐减小，以 SINR 门限为 -5 dB 时为例，在 $R_0=450$ 时已低于 10%，性能与单卫星网络相比无明显提升。



(a) R_0 对星地融合组网性能的影响



(b) 星地融合组网对比单地面和单卫星网络的性能

图4 基站部署空洞半径 R_0 对异频星地融合组网下行成功传输概率的影响

正交频域信道数 K 对异频星地融合组网下行成功传输概率的影响如图5所示。由图5可知，随着频域信道数 K 的上升，异频星地融合组网下行成功传输的概率逐步提高，这是因为在卫星数量 N 一定的情况下，信道数的增加会使分配到同一信道的卫星数目减少，干扰卫星数目也随之减少，SINR增加。此外，在 SINR 门限较低的情况下，主要由地面提供通信，因此不太受卫

星侧设计参数的变化影响，不同正交频域信道数条件下的星地融合组网的下行成功传输概率比较接近。

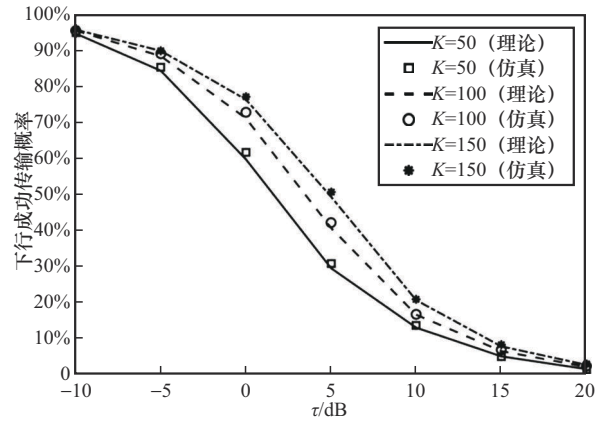


图5 正交频域信道数 K 对异频星地融合组网下行成功传输概率的影响

当基站部署空洞半径 $R_0=100$ m时，基站密度 λ_{bs} 对异频星地融合组网下行成功传输概率的影响如图6所示。由图6可知，随着 λ_{bs} 增大，下行成功传输概率先提高后降低。这是因为当基站密度较低时，干扰较低， λ_{bs} 的增加可以使服务基站到典型用户的平均距离减小，有效信号功率增大，因此成功传输概率提高。随着 λ_{bs} 增加，干扰增强，导致 SINR 降低，并且随着 SINR 门限的提高，该影响越大。

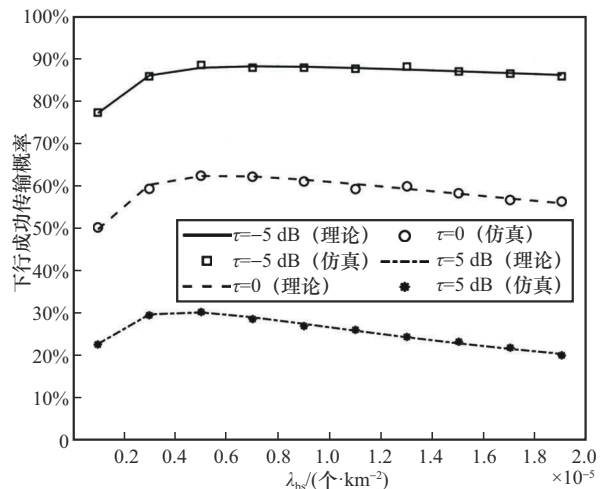


图6 基站密度 λ_{bs} 对异频星地融合组网下行成功传输概率的影响



4 结束语

本文首先探讨了星地融合组网和随机几何发展的现状。基于此，提出了一个卫星满足BPP分布，地面基站满足PPP分布的星地融合组网模型，并推导了相关引理，最终得出星地融合组网模型下典型用户下行成功传输概率的表达式。利用蒙特卡洛仿真验证了理论推导的正确性，同时揭示了地面基站部署空洞半径、空间链路中正交频率信道的数量和基站密度等网络参数对下行成功传输概率的影响。结果表明，星地融合组网可有效解决地面基站存在部署空洞的问题；在一定范围内提高卫星频域信道划分数和增加地面基站密度均可有效提高下行成功传输概率。

在未来的工作中，将进一步考虑对地面基站的空间分布进行BPP建模，并考虑高频场景下更实际的天线模型。与此同时，利用随机几何对平均可达速率进行分析也是一个可行方向。

参考文献：

- [1] 孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(4): 57-74.
SUN Y H, FENG X A, PENG M G. Mega LEO satellite constellations networking: challenges and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 57-74.
- [2] 徐晖, 陈山枝, 艾明. 面向6G的星地融合网络架构[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 9-15.
XU H, CHEN S Z, AIM. Integrated satellite and terrestrial network architecture for 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(5): 9-15.
- [3] 孙耀华, 彭木根, 赵亚飞, 等. 低轨卫星互联网: 从星地融合迈向通导遥一体化[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(6): 69-98.
SUN Y H, PENG M G, ZHAO Y F, et al. Low earth orbit satellite network: from satellite-terrestrial convergence to the integration of communication, navigation and sensing[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(6): 69-98.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] SEDIN J, FELTRIN L, LIN X Q. Throughput and capacity evaluation of 5G new radio non-terrestrial networks with LEO satellites[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [7] 李睿雯, 孙耀华, 彭木根. 基于随机几何的星地融合无线网络上覆盖性能分析[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 18-29.
LI R W, SUN Y H, PENG M G. Performance analysis of satellite-terrestrial integrated wireless network based on stochastic geometry[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 18-29.
- [8] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 3122-3134.
- [9] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550-560.
- [10] BAI T Y, HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 1100-1114.
- [11] AL-HOURANI A. An analytic approach for modeling the coverage performance of dense satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(4): 897-901.
- [12] JIA H G, JIANG C X, KUANG L L, et al. An analytic approach for modeling uplink performance of mega constellations [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2258-2268.
- [13] AL-HOURANI A. Optimal satellite constellation altitude for maximal coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(7): 1444-1448.
- [14] 梁国鑫, 张雨曼, 周家恩, 等. 基于随机几何的低轨星座下行通信链路仿真与分析[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 79-87.
LIANG G X, ZHANG Y M, ZHOU J E, et al. Simulation and analysis of downlink communication links in low earth orbit constellations based on stochastic geometry[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 79-87.
- [15] OKATI N, RIIHONEN T, KORPI D, et al. Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using

- stochastic geometry[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5120-5134.
- [16] TALGAT A, KISHK M A, ALOUINI M S. Nearest neighbor and contact distance distribution for binomial point process on spherical surfaces[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(12): 2659-2663.
- [17] TALGAT A, KISHK M A, ALOUINI M S. Stochastic geometry-based analysis of LEO satellite communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2458-2462.
- [18] CHEN Q, MENG W X, HAN S, et al. Coverage analysis of SAGIN with sectorized beam pattern under shadowed-rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(8): 4988-5004.
- [19] HU X, LIN B, LU X, et al. Performance analysis of end-to-end LEO satellite-aided shore-to-ship communications: a stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11753-11769.
- [20] KOLAWOLE O Y, VUPPALA S, SELLATHURAI M, et al. On the performance of cognitive satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(4): 668-683.
- [21] AL HOMSSI B, AL-HOURANI A. Modeling uplink coverage performance in hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(10): 3239-3243.
- [22] ETSI. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: ETSI-TR 138.901 [R].2024.
- [23] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital Communication over Fading Channels [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] 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.
- [25] ITU-R. S. 1528 : Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz[S].2001.

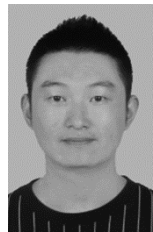
[26] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN): 38.821.v1600[S].2023.

[27] ETSI. Base station (BS) radio transmission and reception (Release 19): ETSI - TS 138 104, Recommendation 3GPP TS 38.104[S]. 2025.

[作者简介]



宋紫旭 (2002-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为星地融合无线网络。



孙耀华 (1992-), 男, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为低轨卫星通信和无线接入网络智能化。



李睿雯 (2001-), 女, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为星地融合无线网络。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线接入网络等。