



专题：手机直连卫星通信

基于随机几何的星地融合无线网络上行覆盖性能分析

李睿雯, 孙耀华, 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: 星地融合无线网络 (STIN) 是实现全球无缝立体覆盖的重要途径。为指导星地融合无线网络实际部署, 对上行覆盖性能成因规律进行分析。利用随机几何对星地异频部署场景进行了建模, 其中, 卫星在轨道上服从一维泊松点过程 (PPP) 分布, 地面基站和用户服从二维 PPP 分布。基于此, 推导了星地融合无线网络上行覆盖概率关于基站密度、轨道倾角等参数的表达式。实验仿真验证了理论推导结果的正确性, 并分析了网络设计参数对上行覆盖概率的影响。

关键词: 随机几何; 星地融合无线网络; 上行覆盖概率

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024100

Performance analysis of satellite-terrestrial integrated wireless network based on stochastic geometry

LI Ruiwen, SUN Yaohua, PENG Mugen

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

Abstract: Satellite-terrestrial integrated wireless network (STIN) is a pivotal approach in achieving worldwide wireless connectivity. To guide base stations deployment of STIN, an analysis of the uplink coverage probability was conducted. Stochastic geometry was used to modeled the STIN under a setting of distinct frequencies. The satellite stations modeled as a one-dimensional Poisson point process (PPP) on orbit, base stations and users were represented as two-dimensional PPP. The expression for the uplink coverage probability was derived in terms of parameters such as base station density and orbital inclination. The correctness of the derived expression was verified through experimental simulations, and the impact of network parameters on the uplink coverage probability were analyzed.

Key words: stochastic geometry, STIN, uplink coverage probability

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15

通信作者: 孙耀华, sunyaohua@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2902600); 国家自然科学基金资助项目 (No.62371071); 中国通信学会青年人才托举项目 (No.2021QNRC001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902600), The National Natural Science Foundation of China (No.62371071), Young Elite Scientist Sponsorship Program by China Institute of Communications (No. 2021QNRC001)

0 引言

随着5G的大规模商用,全球开启了对6G的研究与探索^[1]。其中,产业界预期6G在5G的基础上将进一步满足空天地海一体化的全球无缝立体覆盖需求,提供随时随地安全可靠的连接^[2]。考虑地面通信网络无法独立实现前述愿景,卫星通信网络将作为6G的重要组成,与地面通信网络优势互补,最终形成星地融合无线网络(satellite-terrestrial integrated wireless network, STIN)^[3-5]。目前,国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)、第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)和IMT-2030(6G)推进组等标准化组织都已开展了针对STIN性能评估、关键技术以及网络架构的研究。

在性能评估方面,文献[6]比较了以Telesat、OneWeb和Starlink为代表的低轨卫星通信系统在星座轨道、通信频段、波束及链路预算等方面的异同,评估了不同数量信关站下各系统的吞吐量。爱立信研究团队采用系统级仿真评估分析了5G NR体制下单颗低轨卫星的通信容量以及区域容量密度^[7]。但上述研究以数值仿真手段为主,当网络节点较多时,存在仿真效率低等问题,同时无法从理论上揭示系统设计参数对网络性能的影响。作为无线网络研究中广泛采用的性能分析工具,随机几何通过将网络节点位置建模为空间点过程,能高效地支撑网络覆盖概率、用户遍历容量等性能指标分析。针对地面移动通信网络,大部分研究采用泊松点过程(Poisson point process, PPP)对用户和地面基站分布进行建模。面向下行通信场景,文献[8]分析了单层蜂窝网络的覆盖概率,文献[9]分析了多层异构网络的覆盖概率,文献[10]分析了基于最大偏置接收功率进行接入点选择时的多层异构网络平均用户速率。面向上行通信场景,文献[11]研究了传输功率控

制对网络覆盖概率的影响,文献[12]研究了多层蜂窝网络的覆盖概率,文献[13]研究了复合瑞利-对数(Rayleigh-lognormal)正态阴影衰落环境中局部和周围环境阴影对上行覆盖概率的影响。

随着低轨卫星通信的快速发展,基于随机几何的低轨卫星通信网络性能分析与优化得到了广泛关注,其中,基于二项点过程(binomial point process, BPP)分布对低轨卫星位置进行建模是主流方式之一。文献[14]推导了瑞利信道和无衰落信道条件下的网络覆盖概率和平均用户速率。文献[15]考虑了多层低轨卫星星座,推导了地球球面上任意位置用户和最近卫星间的距离分布,文献[16]进一步推导了用户-卫星-信关站端到端链路的覆盖概率。除BPP分布外,部分学者利用球面PPP对低轨星座进行建模。文献[17]采用视距/非视距(line of sight/non line of sight, LOS/NLOS)无线传输信道模型,通过推导用户和卫星最小接触角得到了下行覆盖概率解析表达式。文献[18]和文献[19]假设卫星采用定向波束成形,根据卫星波束宽度计算卫星天线增益,进而推导了网络的覆盖概率,此外,通过优化卫星波束宽度平衡了波束覆盖和星间干扰。文献[20]和文献[21]推导了下行覆盖概率的解析表达式及其紧上下界近似表达式,得到了使覆盖概率最优的星座卫星数量。考虑不同纬度上的卫星分布差异,文献[22]和文献[23]将卫星位置建模为非齐次泊松点过程(non-homogeneous Poisson point process, NPPP),分别分析了无星间干扰和有星间干扰时的覆盖概率和平均用户速率。

相比下行通信场景,针对上行通信的研究较少。文献[24]在卫星天线增益恒定条件下,研究了多色频率复用时的上行覆盖概率。文献[25]考虑实际星载天线方向图,从中断概率和遍历容量两个方面对低轨巨星星座进行了研究。然而,以上研究均将卫星建模为球面上空间点过程,未能体现卫星沿轨道运行的特点,难以刻画卫星轨道



参数对系统性能的影响。为此，文献[26]假设低轨卫星服从轨道上的一维PPP分布，推导了单轨道和多轨道场景下的网络下行覆盖概率。

目前，部分研究已开始利用随机几何方法分析STIN性能。文献[27]推导了地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）和地面通信网络共存场景下的下行中断概率和区域频谱表达式。文献[28]推导了星地融合网络场景下上行覆盖概率，但其中卫星天线增益在各方向相同。此外，前述文献没有考虑卫星轨道参数对系统性能的影响。如何构造合适的STIN模型并对其进行上行覆盖分析还需要进一步研究。

本文考虑了STIN中的异频双连接场景，假设典型用户可在不同频点同时连接卫星和地面基站。在该场景下，采用随机几何对卫星沿轨道分布，地面基站和用户分布进行建模。随后推导了卫星可视概率、典型用户到服务基站的距离分布等。基于此，进一步得到了STIN的上行覆盖概率，并通过仿真结果验证了推导正确性。

1 系统模型

为便于后续性能分析，本节首先给出网络场景、通信信道等的数学模型。

1.1 网络场景模型

考虑位于 $(0, 0, R_E)$ 配备全向天线的典型手机用户 u 。异频STIN通信场景如图1所示，假设以用户为圆心、 R_0 为半径的范围内没有地面基站。为了实现可靠数据传输，典型手机用户 u 可采用不同频点同时连接距离最近的低轨卫星和地面基站，卫星和地面基站均可接收典型用户发送的信息，只要有一路接收成功，即视为传输成功。需要指出，本文分析过程仅依赖于用户和卫星轨道的相对位置，因此分析过程适用于地球上任意位置用户。

低轨卫星分布建模方面，考虑单个低轨卫星

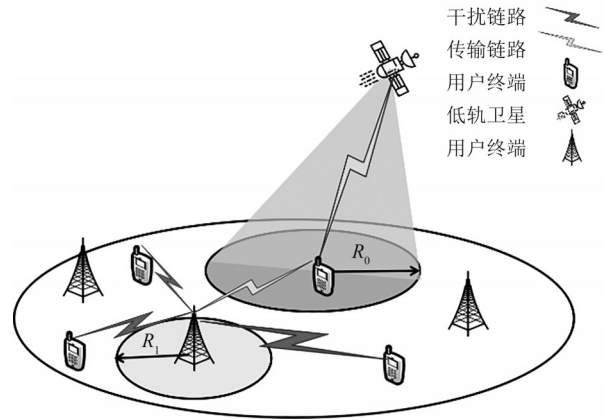


图1 异频STIN通信场景

轨道，其是以地球球心为原点、半径为 $R = R_E + R_H$ 的同心圆，其中， R_E 为地球半径， R_H 为卫星轨道高度，基于一维PPP的低轨卫星分布建模如图2所示。如图2（a）所示，卫星轨道 $\mathcal{O}$ 可以由其所所在平面的法向量 $\bar{\mathbf{v}} = (1, \theta, \phi)$ 确定。其中， $\theta \in [0, \pi]$ 和 $\phi \in [0, 2\pi]$ 分别表示球坐标系下的轨道极角和方位角。假设卫星沿轨道分布服从密度为 λ_{sat} 的一维泊松点过程。卫星位置集合记为 $\Phi_{\text{sat}} = \{\mathbf{x}_{\text{sat}, 1}, \mathbf{x}_{\text{sat}, 2}, \dots, \mathbf{x}_{\text{sat}, M_{\text{sat}}}\}$ ，其中， M_{sat} 为轨道上的卫星个数，服从均值为 λ_{sat} 的泊松分布，即：

$$\mathbb{P}(M_{\text{sat}} = m) = \exp(-2\pi R \lambda_{\text{sat}}) \frac{(2\pi R \lambda_{\text{sat}})^m}{m!} \quad (1)$$

用户与卫星通信的最小仰角为 $\omega_{\min}$ ，基于此，定义用户可视卫星运行区域为图2（a）中的 $\mathcal{A}$ 。在笛卡儿坐标中， $\mathcal{A}$ 可表示为式（2）。

$$\mathcal{A} = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : \{x^2 + y^2 + z^2 = R^2\} \cap \{z > R_{\mathcal{A}}\} \right\} \quad (2)$$

其中， $R_{\mathcal{A}}$ 是球心到可视范围 $\mathcal{A}$ 底部的距离，可表示为式（3）。

$$R_{\mathcal{A}} = r_{\max} \sin \omega_{\min} + R_E \quad (3)$$

其中， $r_{\max}$ 是典型用户与可视范围内卫星的最大距离，可以表示为式（4）。

$$r_{\max} = -R_E \sin \omega_{\min} + \sqrt{R^2 (\sin \omega_{\min})^2 + 2R_E R_H + R_H^2} \quad (4)$$

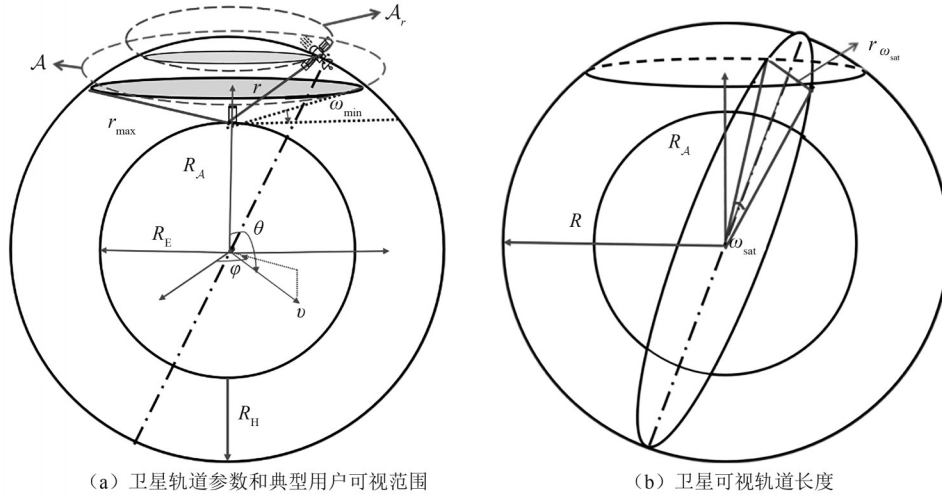


图2 基于一维PPP的低轨卫星分布建模

记 $r_{\min}$ 代表典型用户与可视范围内卫星的最小距离, 可以表示为式 (5)。

$$r_{\min} = \sqrt{R^2 + 2R_E R \sin \theta + R_E^2} \quad (5)$$

对于地面基站, 假设其分布服从密度为 λ_{bs} 的泊松点过程。地面基站位置的集合表示为 $\Phi_{bs} = \{\mathbf{x}_{bs,1}, \mathbf{x}_{bs,2}, \dots, \mathbf{x}_{bs,M_{bs}}\}$ 。如图1所示, 假设以服务基站为圆心、 R_1 为半径的范围内也没有干扰用户。干扰用户位置分布建模为密度 λ_{user} 泊松点过程, 干扰用户位置的集合表示为 $\Phi_{user} = \{\mathbf{x}_{user,1}, \mathbf{x}_{user,2}, \dots, \mathbf{x}_{user,M_{user}}\}$ 。

1.2 信道模型

由于地面基站与用户之间的信道条件与卫星与用户之间的信道条件存在差异, 需要对星地信道和地面信道分别建模。星地信道模型由路径损耗、小尺度衰落和天线增益组成。第 i 个卫星到典型用户的路径损耗可以表示为:

$$r_{sat,i}^{-\alpha_{sat}} = \|\mathbf{x}_{sat,i} - \mathbf{u}\|^{-\alpha_{sat}}, \mathbf{x}_{sat,i} \in \Phi_{sat} \quad (6)$$

其中, $\|\mathbf{x}_{sat,i} - \mathbf{u}\|$ 表示典型用户与卫星之间的距离, α_{sat} 是星地链路的路径损耗指数。此外, 利用阴影莱斯 (shadowed-Rician, SR) 衰落模型模拟用户与卫星之间的小尺度衰落, 该模型分别采用 Nakagami- m 与 Rice 分布描述信号 LOS 成分与

NLOS 多径成分。将第 i 个卫星到用户的 SR 衰落增益表示为 $h_{sat,i} \sim \text{SR}(b, m, \Omega)$ 。其中, b 表示散射分量的平均功率, m 表示 Nakagami 衰落系数, Ω 表示直射分量的平均功率。 $h_{sat,i}$ 的概率密度分布可以表示为式 (7)。

$$f_{h_{sat,i}}(x) = \left(\frac{2bm}{2bm + \Omega} \right)^m \frac{1}{2b} \exp\left(-\frac{x}{2b}\right) \cdot {}_1F_1\left(m, 1, \frac{\Omega x}{2b(2bm + \Omega)}\right) \quad (7)$$

其中, ${}_1F_1(\cdot)$ 为超几何函数。然而, 式 (7) 十分复杂, 根据文献[29]的方法将其近似为一个伽马随机变量。

$$f_{h_{sat,i}}(x) = \frac{1}{\beta^\xi \Gamma(\xi)} x^{\xi-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad (8)$$

其中, $\Gamma(\xi) = \int_0^\infty t^{\xi-1} \exp(-t) dt$ 是伽马函数, $\xi =$

$\frac{m(2b + \Omega)^2}{4b^2m + 4bm\Omega + \Omega^2}$ 为形状参数, $\beta =$

$\frac{4b^2m + 4bm\Omega + \Omega^2}{m(2b + \Omega)}$ 为尺度参数。 $h_{sat,i}$ 的互补累积

分布函数可表示为:



$$P[h_{\text{sat},i} > x] = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\beta^\xi \Gamma(\xi)} t^{\xi-1} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) dt = \frac{1}{\beta^\xi \Gamma(\xi)} \int_{\frac{x}{\beta}}^{+\infty} (v\beta)^{\xi-1} e^{-v} \beta dv = \frac{1}{\Gamma(\xi)} \int_{\frac{x}{\beta}}^{+\infty} v^{\xi-1} e^{-v} dv \approx 1 - \left(1 - e^{-\frac{Ax}{\beta}}\right)^\xi \quad (9)$$

其中, $A = (\xi!)^{-\frac{1}{\xi}}$ 。根据二项式定理, $h_{\text{sat},i}$ 的互补累积分布函数为:

$$P[h_{\text{sat},i} > x] = \sum_{l=1}^{\xi} \binom{\xi}{l} (-1)^{l+1} e^{-l \frac{Ax}{\beta}} \quad (10)$$

卫星天线增益与波束中心线和用户间的离轴角 ψ 有关, ψ 可以根据式 (11) 求得。

$$\psi(r) = \arccos\left(\frac{R^2 + r^2 - R_E^2}{2Rr}\right) \quad (11)$$

其中, r 代表卫星到用户的距离。根据 ITU-R S.1528^[30] 对卫星天线进行建模, 天线增益可以表示为:

$$G(\psi) = \begin{cases} G_{\max}, & \psi < \psi_b \\ G_{\max} \times 3 \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right), & \psi_b \leq \psi < Y \\ G_{\max} + L_S \times 25 \log \left(\frac{\psi}{Y} \right), & Y \leq \psi < Z \\ L_F, & Z \leq \psi \end{cases} \quad (12)$$

其中, ψ_b 为 3 dB 波束宽度的半值 (单位为 $^\circ$), $G_{\max}$ 为主瓣最大增益 (单位为 dBi), L_S 为近主瓣的旁瓣电平 (单位为 dBi), L_F 为最远旁瓣电平。

$$Y = \psi_b \times \left(-\frac{L_S}{3} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad Z = Y \times 10^{0.04(G_{\max} + L_S + L_F)}.$$

地面传播模型由路径损耗和小尺度衰落组成。第 i 个地面基站到用户的路径损耗可以表示为式 (13)。

$$r_{\text{bs},i}^{-\alpha_{\text{bs}}} = \|\mathbf{x}_{\text{bs},i} - \mathbf{u}\|^{-\alpha_{\text{bs}}}, \quad \mathbf{x}_{\text{bs},i} \in \Phi_{\text{bs}} \quad (13)$$

其中, $r_{\text{bs},i}$ 表示典型用户与地面基站之间的距离,

α_{bs} 是地面链路的路径损耗指数。地面信道的小尺度衰落服从均值为 1 的瑞利分布 $h_{\text{bs},i} \sim \exp(1)$ 。

2 异频 STIN 上行覆盖概率

对于通信系统, 覆盖概率是评估网络性能的关键指标。本节首先推导了关键参数的统计特性, 包括可见范围内存在卫星的概率和服务基站和典型用户间距的概率密度函数。基于此, 进一步推导了异频 STIN 的上行覆盖概率。

2.1 关键参数统计特性推导

2.1.1 卫星可视概率

为了确定卫星的可视范围, 首先分析可视轨道的长度。由于可视轨道的长度和变量 R 、 θ 和 $R_{\mathcal{A}}$ 有关, 将该长度记为 $L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})$ 。当 $\cos\left|\frac{\pi}{2} - \theta\right| > \frac{R_{\mathcal{A}}}{R}$ 时, 卫星轨道不经过用户的可视范围, 此时 $L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}) = 0$ 。当 $\cos\left|\frac{\pi}{2} - \theta\right| \leq \frac{R_{\mathcal{A}}}{R}$ 时, 如图 2 (b) 所示, 通过构造等腰三角形并利用余弦定理可以得到 ω_{sat} , 表示为式 (14)。

$$\omega_{\text{sat}} = \arccos\left(\frac{2R^2 - r_{\mathcal{A}}^2}{2R^2}\right) \quad (14)$$

其中, $r_{\mathcal{A}}$ 是 $\mathcal{A}$ 底部圆的半径, 可以表示为式 (15)。

$$r_{\mathcal{A}} = 2 \sqrt{R^2 - R_{\mathcal{A}}^2 \left(\frac{1}{\sin \theta} \right)^2} \quad (15)$$

利用 R 和 ω_{sat} , 根据弧长表达式可以计算出 $L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})$, 如下。

$$L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}) = R\omega_{\text{sat}} = R \times \arccos\left(\frac{2R^2 - r_{\mathcal{A}}^2}{2R^2}\right) = R \times \arccos(\eta(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) \quad (16)$$

其中, $\eta(R, \theta, R_{\mathcal{A}}) = \frac{R_{\mathcal{A}}^2}{2R^2(\sin \theta)^2} - 1$ 。记典型用户可视范围内卫星轨道上至少存在一个卫星算网概率为 P_{vis} 。基于泊松分布的概率计算式, P_{vis} 可以

表示为式 (17)。

$$P_{\text{vis}} = \mathbb{P}[M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0] = 1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) \quad (17)$$

其中, $M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}))$ 表示可视范围内轨道上存在的卫星个数。

2.1.2 服务基站和典型用户间距的概率密度函数

在地面网络中, 认为典型用户由距离最近的地面基站所服务, 地面服务基站记为 $\mathbf{x}_{\text{bs},0}$, 服务距离记为 $\|\mathbf{x}_{\text{bs},0} - \mathbf{u}\| = r_{\text{bs}}$ 。根据泊松分布, r_{bs} 的互补累积分布函数和概率密度函数分别表示为式 (18) 和式 (19)。

$$F_{r_{\text{bs}}}(r) = \mathbb{P}[r_{\text{bs}} > r] = \exp(-\pi\lambda_{\text{bs}}(r^2 - R_0^2)), \quad r > R_0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F_{r_{\text{sat}}}(r) &= \frac{\mathbb{P}[M(L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})) = 0] \mathbb{P}[M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]}{\mathbb{P}[M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]} = \\ &= \frac{\mathbb{P}[M(L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})) = 0] \mathbb{P}[M(L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})/L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]}{\mathbb{P}[M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]} = \\ &= \frac{\exp(-\lambda_{\text{sat}} L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O}))}{1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}))} \times \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} (L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})/L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})))}{1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}))} = \\ &= \frac{\exp(-\lambda_{\text{sat}} L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})) - \exp(-\lambda_{\text{sat}} (L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})))}{1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}))} = \\ &= \frac{\exp\left(-\lambda_{\text{sat}} R \arccos\left(\eta\left(R, \theta, \frac{R^2 + R_{\text{E}}^2 - r^2}{2R_{\text{E}}}\right)\right)\right) - \exp(-\lambda_{\text{sat}} (L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})))}{1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}}))} \end{aligned} \quad (21)$$

对 $1 - F_{r_{\text{sat}}}(r)$ 求导, 可以计算出 r_{sat} 的概率密度函数:

$$f_{r_{\text{sat}}}(r) = \frac{\exp\left(-\lambda_{\text{sat}} R \arccos\left(\eta\left(R, \theta, \frac{R^2 + R_{\text{E}}^2 - r^2}{2R_{\text{E}}}\right)\right)\right) 2\pi\lambda_{\text{sat}} (R^2 + R_{\text{E}}^2 - r^2)}{RR_{\text{E}}(\sin \theta)^2 \left[1 - \exp(-\lambda_{\text{sat}} L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) \sqrt{1 - \left(\eta\left(R, \theta, \frac{R^2 + R_{\text{E}}^2 - r^2}{2R_{\text{E}}}\right)\right)^2}\right]} \quad (22)$$

$$f_{r_{\text{bs}}}(r) = 2\pi\lambda_{\text{bs}} r \exp(-\pi\lambda_{\text{bs}}(r^2 - R_0^2)), \quad r > R_0 \quad (19)$$

同样地, 在卫星网络中认为典型用户由距离最近的卫星服务, 卫星服务基站记为 $\mathbf{x}_{\text{sat},0}$, 服务距离记为 $\|\mathbf{x}_{\text{sat},0} - \mathbf{u}\| = r_{\text{sat}}$ 。在典型用户可视范围内至少有一个卫星的前提下, r_{sat} 的互补累积分布函数为式 (20)。

$$F_{r_{\text{sat}}}(r) = \mathbb{P}[r_{\text{sat}} > r | M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0] = \frac{\mathbb{P}[M(L(\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O})) = 0, M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]}{\mathbb{P}[M(L(R, \theta, R_{\mathcal{A}})) > 0]} \quad (20)$$

如图 2 (a) 所示, 典型用户 $\mathbf{u}$ 和服务卫星的距离为 r 时形成球顶区域 $\mathcal{A}_r$ 。典型用户到 $\mathcal{A}_r$ 范围内点的距离均小于 r 。 $\mathcal{A}_r \cap \mathcal{O}$ 表示卫星轨道经过 $\mathcal{A}_r$ 的部分。根据 PPP 分布性质可以得到 $F_{r_{\text{sat}}}(r)$ 的具体表达式:



2.2 异频STIN的上行覆盖概率推导

覆盖概率定义为信干噪比（signal to interference plus noise ratio, SINR）高于阈值的概率。基于本文提出的异频双连接服务机制，卫星或地面基站之一成功接收典型用户的传输数据则认为上行传输成功。此时，上行覆盖概率可以表示为式（23）。

$$P_{\text{cov}} = 1 - (1 - P_{\text{cov}}^{\text{sat}}) \times (1 - P_{\text{cov}}^{\text{bs}}) \quad (23)$$

其中， $P_{\text{cov}}^{\text{sat}}$ 是卫星网络的上行覆盖概率， $P_{\text{cov}}^{\text{bs}}$ 是地面网络的上行覆盖概率。

2.2.1 卫星网络上行覆盖概率

卫星网络的上行覆盖概率可以表示为式（24）。

$$P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}} = \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P} \left\{ \text{SINR}_{\text{sat}} > T \mid r_{\text{sat}}, M \left(L(R, \theta, R_A) \right) > 0 \right\} \right\} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{sat}} > T) \right\} f_{r_{\text{sat}}}(r) dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P} \left(h_{\text{sat}} > \frac{\sigma^2 T r^{\alpha_{\text{sat}}}}{G(r) P_{\text{t, user}}} \right) \right\} f_{r_{\text{sat}}}(r) dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \mathbb{P} \left(h_{\text{sat}} > \frac{\sigma^2 T r^{\alpha_{\text{sat}}}}{G(r) P_{\text{t, user}}} \right) f_{r_{\text{sat}}}(r) dr \quad (27)$$

将式（10）代入式（27）计算， $P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}}$ 表示为：

$$P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sum_{l=1}^{\xi} \binom{\xi}{l} (-1)^{l+1} \exp(-s_{\text{sat}} T \sigma^2) f_{r_{\text{sat}}}(r) dr \quad (28)$$

其中， $s_{\text{sat}} = \frac{r^{\alpha_{\text{sat}}}}{G(r) P_{\text{t, user}}}$ ，将式（28）代入式（24）可以得到卫星网络的上行覆盖概率。

2.2.2 地面网络上行覆盖概率

地面网络的上行覆盖概率可以表示为式（29）。

$$P_{\text{cov}}^{\text{bs}} = \mathbb{P} \{ \text{SINR}_{\text{bs}} > T \} \quad (29)$$

记地面服务基站接收到的有效信号功率为 S_{bs} ，计算式为：

$$S_{\text{bs}} = P_{\text{t, user}} r_{\text{bs}}^{-\alpha_{\text{bs}}} h_{\text{bs}} \quad (30)$$

其中， h_{bs} 是地面服务基站和典型用户之间的小尺度衰落系数。SINR_{bs} 的计算式为：

$$P_{\text{cov}}^{\text{sat}} = P_{\text{vis}} \times P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}} = P_{\text{vis}} \times \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P} \left\{ \text{SINR}_{\text{sat}} > T \mid M \left(L(R, \theta, R_A) \right) > 0 \right\} \right\} \quad (24)$$

利用式（15）可以求得 P_{vis} ， $P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}}$ 是典型用户可视至少一个卫星的条件下卫星网络的上行覆盖概率。SINR_{sat} > T 表示卫星接收信号的 SINR 高于给定阈值 T。记卫星接收到的有效信号功率为 S_{sat} ，计算式为：

$$S_{\text{sat}} = G(r_{\text{sat}}) P_{\text{t, user}} r_{\text{sat}}^{-\alpha_{\text{sat}}} h_{\text{sat}} \quad (25)$$

其中， $P_{\text{t, user}}$ 是典型用户的发射功率， h_{sat} 是服务卫星和典型用户之间的小尺度衰落系数。SINR_{sat} 的计算式为：

$$\text{SINR}_{\text{sat}} = \text{SNR}_{\text{sat}} = \frac{S_{\text{sat}}}{\sigma^2} \quad (26)$$

其中， σ^2 表示噪声方差。 $P_{\text{cov}|M>0}^{\text{sat}}$ 的计算式为：

$$\text{SINR}_{\text{bs}} = \frac{S_{\text{bs}}}{I_{\text{bs}} + \sigma^2} \quad (31)$$

其中， I_{bs} 是地面用户产生的上行干扰总功率，计算式为：

$$I_{\text{bs}} = \sum_{\mathbf{x}_{\text{user}, i} \in \Phi_{\text{user}}} P_{\text{t, user}} \|\mathbf{x}_{\text{user}, i} - \mathbf{x}_{\text{bs}, 0}\|^{-\alpha_{\text{bs}}} h_{\text{bs}, i} \quad (32)$$

与卫星网络上行覆盖率计算相同， $P_{\text{cov}}^{\text{bs}}$ 的计算表达式为：

$$P_{\text{cov}}^{\text{bs}} = \mathbb{P} \{ \text{SINR}_{\text{bs}} > T \} = \mathbb{P} \left\{ \frac{S_{\text{bs}}}{I_{\text{bs}} + \sigma^2} > T \right\} = \int_{R_0}^{\inf} \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P} \left(\frac{P_{\text{t, user}} r_{\text{bs}}^{-\alpha_{\text{bs}}} h_{\text{bs}}}{I_{\text{bs}} + \sigma^2} > T \right) \mid r \right\} f_{r_{\text{bs}}}(r) dr = \int_{R_0}^{\inf} \mathbb{E} \left\{ \mathbb{P} \left(h_{\text{bs}} > \frac{T (I_{\text{bs}} + \sigma^2) r^{\alpha_{\text{bs}}}}{P_{\text{t, user}}} \right) \right\} f_{r_{\text{bs}}}(r) dr \quad (33)$$

考虑信道衰落 h_{bs} 服从均值为 1 的瑞利分布，可以得到：

$$P_{\text{cov}}^{\text{bs}} = \int_{R_0}^{\text{inf}} \exp(-s_{\text{bs}} \sigma^2) \mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}}) f_{r_{\text{bs}}}(r) dr \quad (34)$$

其中, $s_{\text{bs}} = \frac{Tr^{\alpha_{\text{bs}}}}{P_{\text{t,user}}}$; $\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}})$ 是聚合干扰 I_{bs} 的拉普

$$\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}}) = \mathbb{E}_{I_{\text{bs}}} \{ \exp(-s_{\text{bs}} I_{\text{bs}}) \} = \mathbb{E}_{I_{\text{bs}}} \left\{ \exp \left(-s_{\text{bs}} \sum_{\mathbf{x}_{\text{user},i} \in \Phi_{\text{user}}} P_{\text{t,user}} \|\mathbf{x}_{\text{user},i} - \mathbf{x}_{\text{bs},0}\|^{-\alpha_{\text{bs}}} h_{\text{bs},i} \right) \right\} =$$

$$\exp \left(-2\pi\lambda_{\text{user}} \int_{R_1}^{\text{inf}} \left(1 - \mathbb{E}_{h_{\text{bs}}} (s_{\text{bs}} P_{\text{t,user}} u^{-\alpha_{\text{bs}}} h_{\text{bs}}) \right) u du \right) \quad (35)$$

根据均值为1的瑞利信道的性质, $\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}})$ 表示为式 (36)。

$$\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}}) = \exp \left(-2\pi\lambda_{\text{user}} \int_{R_1}^{\text{inf}} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{s_{\text{bs}} P_{\text{t,user}}}{u^{\alpha_{\text{bs}}}}} \right) u du \right) \quad (36)$$

将式 (33) 和式 (24) 代入式 (23), 异频 STIN 的上行覆盖概率最终可以表示为:

$$P_{\text{cov}} = 1 - \left(1 - P_{\text{vis}} \times \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \sum_{l=1}^{\xi} \left(\frac{\xi}{l} \right) (-1)^{l+1} \exp(-s_{\text{sat}} T \sigma^2) f_{r_{\text{sat}}}(r) dr \right) \times$$

$$\left(1 - \int_{R_0}^{\text{inf}} \exp(-s_{\text{bs}} \sigma^2) \mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}}) f_{r_{\text{bs}}}(r) dr \right) \quad (37)$$

3 仿真分析

本节通过蒙特卡罗仿真验证理论推导结果的准确性, 并分析网络参数对上行覆盖概率的影响。若无特殊说明, 默认仿真参数设置见表1。

在 $R_0=100 \text{ m}$ 和 $R_0=1000 \text{ m}$ 条件下, 异频 STIN、单地面网络和单卫星网络的上行覆盖概率如图3所示。首先, 图3证实了式 (33) 的准确性。当 $R_0=100 \text{ m}$ 时, 异频 STIN 的上行覆盖概率明显优于单卫星网络和单地面网络的上行覆盖概率, 相较于卫星网络, 上行覆盖概率约提高 52.5%; 相较于地面网络, 上行覆盖概率约提高 65.6%。当 $R_0=1000 \text{ m}$ 时, 异频 STIN 的上行覆

拉斯变换, 利用随机几何方法中的泊松点过程的概率生成泛函 (probability generating functional, PGFL), 可以得到 $\mathcal{L}_{I_{\text{bs}}}(s_{\text{bs}})$ 的计算表达式:

表1 仿真参数设置

参量	数值
地球半径 (R_E) /km	6 371
卫星轨道高度 (R_H) /km	500
最小仰角 (ω_{min}) / ($^\circ$)	10
地面上行链路载频 ($f_{\text{c,bs}}$) /GHz	2
星地上行链路载频 ($f_{\text{c,sat}}$) /GHz	17
用户发射功率 ($P_{\text{t,user}}$) /dBm	23
SINR 门限 (T) /dB	-10~20
低轨卫星密度 (λ_{sat}) / (个·千米 $^{-1}$)	0.001
地面基站密度 (λ_{bs}) / (个·千米 $^{-2}$)	1
用户密度 (λ_{user}) / (个·千米 $^{-2}$)	1
SR 信道散射分量的平均功率 (b)	0.063
SR 信道 Nakagami 衰落系数 (m)	0.739
SR 信道表示直射分量的平均功率 (Ω)	8.97×10^{-4}
星地/地面频带带宽 (B) /MHz	5
噪声频谱密度 (N) / (dBm·Hz $^{-1}$)	-174
3 dB 波束宽度的半值 (ψ_b) / ($^\circ$)	1.6
天线主瓣接收最大增益 (G_{max}) /dBi	35
近主瓣的旁瓣电平 (L_S) /dBi	-6.75
最远旁瓣电平 (L_F) /dBi	5
地面基站空洞范围 (R_1) /m	100

盖概率明显优于地面网络, 但与卫星网络上行覆盖概率相差不大。这是因为当 $R_0=1000 \text{ m}$ 时, 地面网络上行覆盖概率很低, 星地融合网络的上行覆盖概率主要由卫星网络决定。同时, 对比图3 (a) 和图3 (b) 可知, 异频 STIN 的上行覆盖概率随着 R_0 的增大而减小, 随着 SINR 门限增大而减小。上述结果表明, 在地面网络基础上引入卫星网络可有效解决覆盖空洞问题。

在 $R_0=100 \text{ m}$ 和 $R_0=1000 \text{ m}$ 条件下, 卫星密

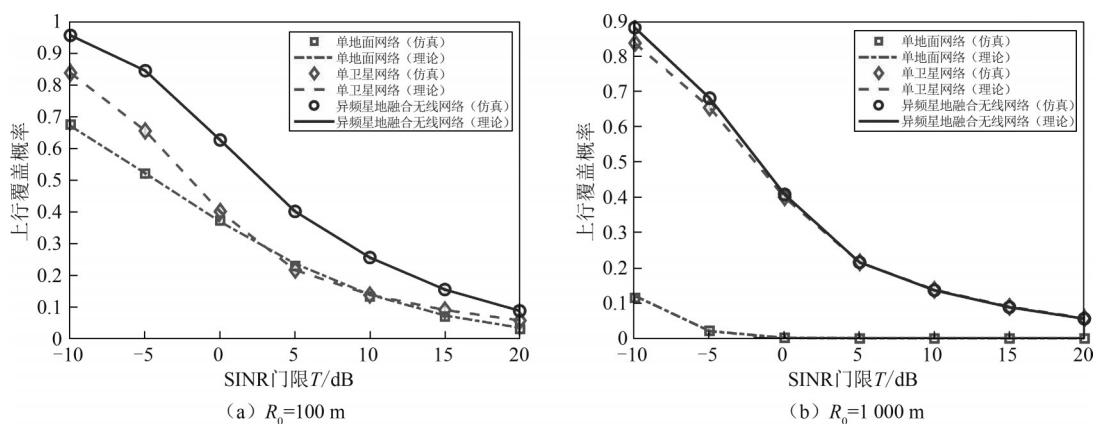


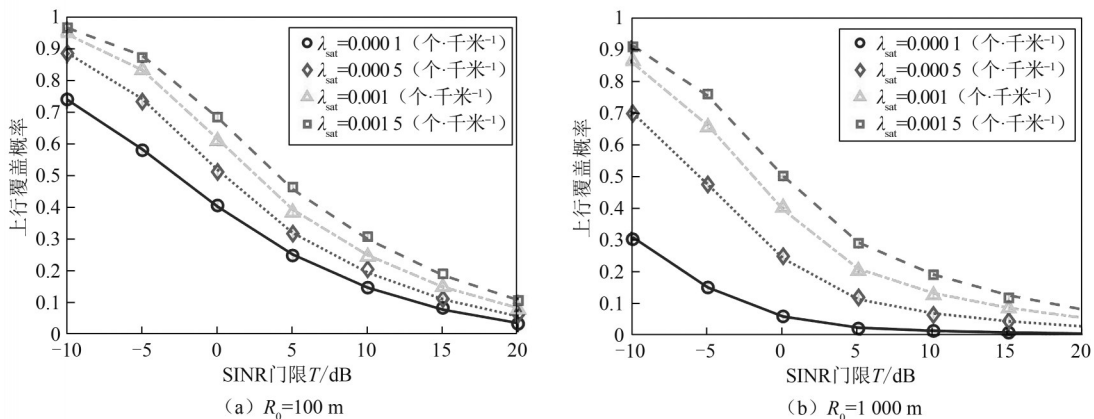
图3 异频STIN、单地面网络和单卫星网络的上行覆盖概率

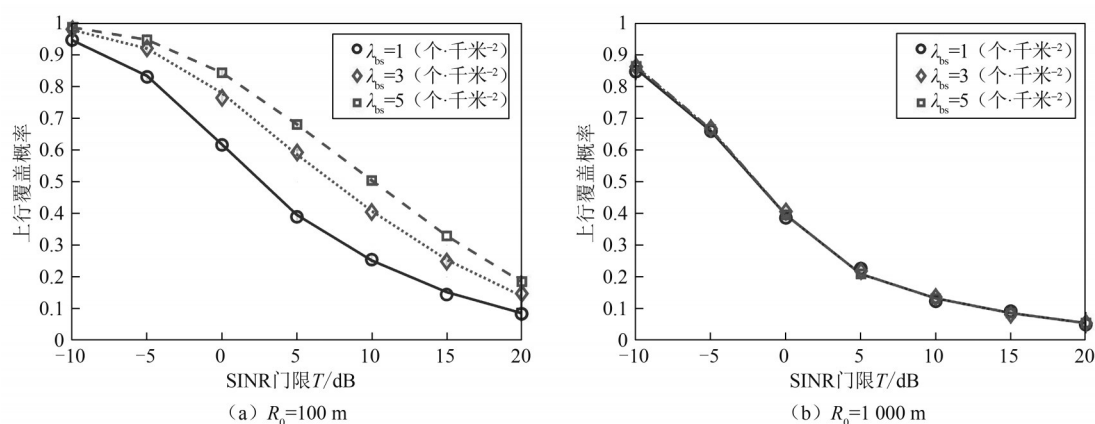
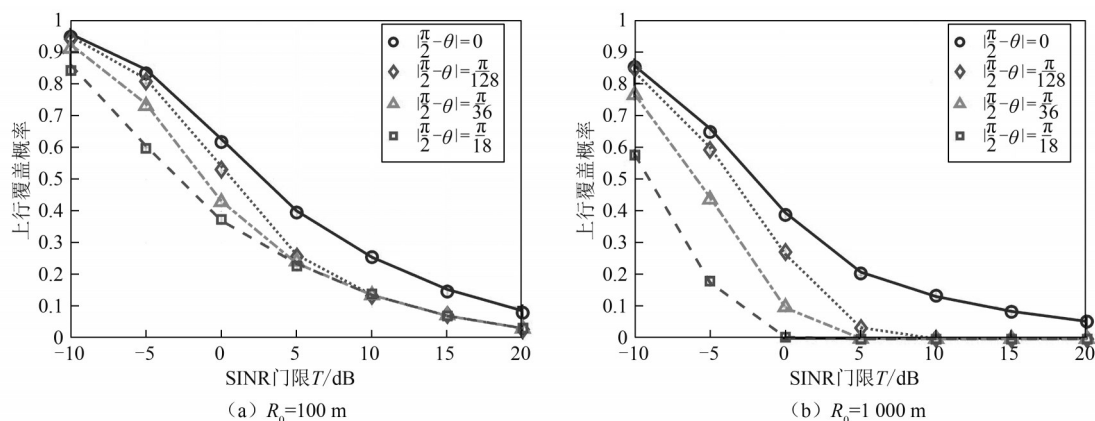
度 λ_{sat} 对异频STIN上行覆盖概率的影响如图4所示。由图4可知, 在 $R_0 = 100 \text{ m}$ 和 $R_0 = 1 000 \text{ m}$ 时, 异频STIN的上行覆盖概率均随着SINR门限增大而减小, 随着卫星密度的增大而增大。这是因为随着卫星密度增大, 服务卫星到典型用户的平均距离减小, 有效信号功率增大, 从而使网络的上行覆盖概率增大。对比图4(a)和图4(b)可知, 当 $R_0 = 1 000 \text{ m}$ 时, 异频STIN的上行覆盖概率受卫星密度变化的影响更为明显。这是因为地面覆盖空洞半径大的情况下, 异频STIN的上行覆盖概率主要由卫星网络决定。

在 $R_0 = 100 \text{ m}$ 和 $R_0 = 1 000 \text{ m}$ 条件下, 地面基站密度 λ_{bs} 对异频STIN上行覆盖概率的影响如图5所示。由图5(a)可知, $R_0 = 100 \text{ m}$ 时异频STIN的上行覆盖概率随着地面基站密度的增大

而增大。这是因为随着地面基站密度增大, 地面服务基站到典型用户的平均距离减小, 有效信号功率增大, 从而使网络的上行覆盖概率增大。而在 $R_0 = 1 000 \text{ m}$ 时, 异频STIN上行覆盖概率主要由卫星网络决定, 因此地面基站密度改变对上行覆盖概率影响不大。对比图5(a)和图5(b)可知, 当 $R_0 = 100 \text{ m}$ 时, 异频STIN的上行覆盖概率受地面基站密度变化的影响更为明显。

在 $R_0 = 100 \text{ m}$ 和 $R_0 = 1 000 \text{ m}$ 条件下, 卫星轨道极角 θ 对异频STIN上行覆盖概率的影响如图6所示, 网络的上行覆盖概率随着 $\left| \frac{\pi}{2} - \theta \right|$ 的增大而减小, 这是因为随着 $\left| \frac{\pi}{2} - \theta \right|$ 的增大, 典型用户和服务卫星的平均距离增大, 使得卫星接

图4 卫星密度 λ_{sat} 对异频STIN上行覆盖概率的影响

图5 地面基站密度 λ_{bs} 对异频STIN上行覆盖概率的影响图6 卫星轨道极角 θ 对异频STIN上行覆盖概率的影响

收到的有用信号功率减小, 因此网络的上行覆盖概率减小。当 $\left|\frac{\pi}{2} - \theta\right| = 0$ 时卫星轨道经过典型用户正上方, 此时网络的覆盖概率最大。对比图6(a)和图6(b)可知, 当 $R_0 = 1000$ m时, 异频STIN的上行覆盖概率受 θ 的影响更为明显。

4 结束语

本文基于随机几何方法分析了异频STIN的上行覆盖概率。为分析卫星轨道几何参数对性能的影响, 利用基于轨道的一维PPP对卫星位置分布进行了建模。此外, 考虑了地面覆盖空洞场景, 构造了地面基站和干扰用户分布模型。通过

推导异频STIN的总体上行覆盖概率理论表达式, 对网络设计参数与覆盖性能的关系进行了分析。数值结果验证了推导的精确性。仿真结果表明, 星地融合网络可以有效解决地面网络的覆盖空洞问题, 同时提高卫星密度 λ_{sat} 、减小轨道倾角 θ 均可以提高上行覆盖概率。

参考文献:

- [1] 彭木根, 孙耀华, 王文博. 智简6G无线接入网: 架构、技术和展望[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10.
PENG M G, SUN Y H, WANG W B. Intelligent-concise radio access networks in 6G: architecture, techniques and insight[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(3): 1-10.
- [2] 袁硕, 任奕璟, 王则予, 等. 软件定义的星地融合智能无线网络[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 66-77.



- YUAN S, REN Y J, WANG Z Y, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 66-77.
- [3] FENG Y Z, SUN Y H, PENG M G. Performance analysis in satellite communication with beam hopping using discrete-Time queueing theory[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(7): 11679-11692.
- [4] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
- SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [5] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
- SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [6] PORTILLO I D, 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.
- [7] 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 (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [8] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTO 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] DI RENZO M, GUIDOTTI A, CORAZZA G E. Average rate of downlink heterogeneous cellular networks over generalized fading channels: a stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(7): 3050-3071.
- [11] NOVLAN T D, DHILLON H S, ANDREWS J G. Analytical modeling of uplink cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2669-2679.
- [12] ELSAWY H, HOSSAIN E. On stochastic geometry modeling of cellular uplink transmission with truncated channel inversion power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4454-4469.
- [13] HERATH P, TELLAMBURA C, KRZYMIEN W A. Stochastic geometry modeling of cellular uplink power control under composite Rayleigh-lognormal fading[C]//Proceedings of the 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] KIM G, LEE S, LIM H, et al. Coverage probability analysis of LEO satellite communication systems with directional beamforming[C]//Proceedings of the 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 243-247.
- [19] CHAE S H, LIM H, LEE H, et al. Performance analysis of dense low earth orbit satellite communication networks with stochastic geometry[J]. Journal of Communications and Networks, 2023, 25(2): 208-221.
- [20] PARK J, CHOI J, LEE N. A tractable approach to coverage analysis in downlink satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(2): 793-807.
- [21] LEE N. Coverage analysis for satellite downlink networks[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2387-2392.
- [22] OKATI N, RIIHONEN T. Modeling and analysis of LEO mega-constellations as nonhomogeneous Poisson point processes[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [23] OKATI N, RIIHONEN T. Nonhomogeneous stochastic geometry analysis of massive LEO communication constellations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(3): 1848-1860.
- [24] YASTREBOVA A, ANGERVUORI I, OKATI N, et al. Theoretical and simulation-based analysis of terrestrial interference to LEO satellite uplinks[C]//Proceedings of the GLOBECOM

- 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [25] 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.
- [26] LEE J S, NOH S, JEONG S, et al. Coverage analysis of LEO satellite downlink networks: orbit geometry dependent approach[J]. arXiv preprint, 2022, arXiv: 2206.09382.
- [27] 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.
- [28] AL HOMSSI B, AL-HOURANI A. Modeling uplink coverage performance in hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(10): 3239-3243.
- [29] 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.
- [30] ITU-R. Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz: ITU-R.1528[S]. 2001.

[作者简介]



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。



孙耀华 (1992-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室副教授, 主要研究方向为低轨卫星通信和无线接入网络智能化。



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、雾无线电接入网络等。