

低轨卫星网络上行链路的隐蔽通信性能研究

曾舒磊^{1,2}, 曹 宾^{1,2}

(1.北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;

2.北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘 要: 大规模低轨卫星星座的部署提供了无缝的全球覆盖, 与此同时, 随着低轨卫星数量的增加, 网络安全面临潜在的挑战, 例如窃听和非法通信行为的检测等问题。为增强低轨卫星网络的安全性, 研究低轨卫星网络上行链路的隐蔽无线通信至关重要。利用来自大量地面设备信号所产生的散粒噪声, 隐蔽通信信号能够被有效地隐藏在上行链路的干扰和背景噪声中。基于随机几何方法, 分析低轨卫星的距离分布, 推导上行链路的性能与干扰表达式, 并给出平均错误检测概率和传输中断概率的近似表达式。蒙特卡罗仿真验证了所提隐蔽通信性能分析方法的准确性。

关键词: 低轨卫星网络; 隐蔽通信; 随机几何; 物理层安全; 上行链路

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024036

Research on Performance of Covert Wireless Communication over Uplink LEO Satellite-Terrestrial Network

ZENG Shulei^{1,2}, CAO Bin^{1,2}

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The deployment of large-scale LEO satellite constellations is rapidly advancing, enabling seamless global coverage and supporting a wide range of applications. However, this proliferation of satellites also brings significant security concerns, including risk of eavesdropping and the detection of illegal communication activities. In response to these challenges, this paper investigates covert wireless communication over uplink satellite-terrestrial network. Specifically, by leveraging shot noise caused by ambient signals from terrestrial interferers, a terrestrial transmitter (Alice) can effectively obscure her signal from warden satellites. With the aid of stochastic geometry, the distributions of distances between the transmitter and satellites were analyzed, providing key insights into the uplink performance and interference experienced within a satellite's coverage area. Approximate expressions for the detection error probability and transmission outage probability were provided. Monte Carlo simulations validated the accuracy of the analytical methods used to assess covert communication performance.

Keywords: LEO satellite communication network, covert communication, stochastic geometry, physical layer security, uplink

0 引言

与地面无线通信网络相比, 卫星网络提供了更广泛的互联网接入场景^[1], 近年来已被广泛用于在全球范围

内提供无缝互联网服务^[2]。为了对卫星网络用户提供高质量的互联网接入服务, 太空探索技术公司 (SpaceX) ^[3] 等计划发射大量低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星星座。然而, 卫星数量的迅速增加可能会导

收稿日期: 2024-09-01; 修回日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U22B2006)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. U22B2006)

致安全问题^[4]，例如在未经许可的情况下被卫星窃听^[5]。此外，由于卫星地面信道的开放性和宽广的广播覆盖范围，系统面临更多潜在的安全威胁^[6]。面对数量庞大、类型多样的卫星所带来的潜在安全隐患，保护卫星通信系统免受窃听等安全威胁至关重要。为了对抗窃听威胁，物理层安全技术^[5]和密码学^[7]已经得到了广泛的研究。然而，当前广泛使用的加密方案仍然存在被超级计算机和大规模并行计算破解的威胁^[8]。此外，在某些应用场景中，隐匿传输信号的存在同样十分必要，例如涉及个人健康信息^[9]和行为轨迹信息^[10]等场景。

为克服上述问题，隐蔽通信作为一种能够同时保护传输行为和数据的无线安全新范式^[11-12]，近年来引起了业界和学术界的广泛关注。利用物理层中固有的随机性，隐蔽通信可防止监测者发现合法用户的传输行为，从而避免发现信号后遭受恶意攻击^[13]。20 世纪初，扩频通信技术在军事上被用来掩盖通信行为的存在^[14]，但是诸如信息论的局限性和优化方法等基础性问题仍未得到充分解决。

为研究隐蔽通信的理论极限，参考文献[11]首次从信息论的角度在加性高斯白噪声（Additive White Gaussian Noise, AWGN）信道中建立了平方根定律。随后，参考文献[15-17]将平方根定律推广到多种无线信道模型中。为了实现正的通信速率，参考文献[18]引入了噪声的固有不确定性。参考文献[19]评估了不完全信道状态信息（Channel State Information, CSI）对隐蔽通信的影响。此外，进一步的研究工作表明，考虑来自泊松场干扰的干扰信号^[20]或者友好节点^[21-22]、中继^[23]和人工干扰^[13]可以帮助满足覆盖要求并提高隐蔽系统的吞吐量。

大部分研究仍集中在地面信道，卫星通信和地面通信在隐蔽通信中的固有区别尚未得到明确的研究。将隐蔽通信应用于卫星通信中，不仅能提供无缝连接，还能进一步提升无线网络的安全性。参考文献[5]分析了具有卫星窃听器的卫星地面网络的遍历性和中断保密能力。参考文献[24]对卫星网络中的隐蔽通信进行了调查，研究了混合星地中继网络中的隐蔽通信。参考文献[25]考虑了一种可重新配置的智能表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）多用户下行链路隐蔽卫星通信系统，以最大限度提高隐蔽传输的速率。然而，大多数现有工作并没有考虑到当卫星作为监测者时的隐蔽通信系统。

上述关于隐蔽通信的研究主要假设存在地面监测者。

随着卫星和无人机等非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）设备数量的迅速增加，空中窃听的威胁日益加剧。关于卫星作为监测者的影响的研究仍然相对缺乏，因此，本文首先研究了在低轨卫星网络上行链路中存在多颗监测卫星的情况下的隐蔽通信。在该网络中，设定了一个地面用户（Alice），多颗低轨服务卫星（Bob），以及多颗低轨监测卫星（Willie），并且假设所有低轨卫星服从齐次泊松点过程（Poisson Point Process, PPP）。从理论上分析了卫星网络上行链路的隐蔽性能，并给出了平均错误检测概率和传输中断概率的近似表达式，数值仿真结果验证了理论分析的准确性。

本文的主要研究工作和贡献如下。

(1) 提出一个低轨卫星网络上行链路隐蔽通信模型。基于齐次 PPP 的数学性质，研究了低轨卫星的可能分布，并推导了地面用户与低轨卫星之间的距离分布。考虑到上行链路干扰带来的不确定性，从理论上分析了低轨卫星网络上行链路隐蔽通信系统的隐蔽性能。

(2) 为获得所提出系统的准确隐蔽性能，首先使用伽马分布来近似上行链路干扰分布。基于近似结果，推导了最有害的监测卫星的平均检测误差概率和最近服务卫星的传输中断概率。

(3) 设计蒙特卡罗仿真实验验证理论表达式。仿真展示了卫星数量、卫星高度、地面用户数量和用户发射功率等因素对隐蔽性能的影响。仿真结果表明，伽马分布近似提供了良好的拟合效果。

1 系统模型与问题定义

下面首先介绍低轨卫星网络上行链路系统模型，随后描述所提出的隐蔽通信方案。

1.1 系统模型

考虑上行低轨卫星通信系统，其中分别存在多颗低轨卫星作为监测卫星和服务卫星，Alice 试图隐蔽地与其距离最近的 Bob 通信而不被 Willie 发现。假设监测卫星和服务卫星分别随机、均匀地分布在高度为 A_w 和 A_s 的球面上。为简化数学建模并提高数学可处理性^[26-30]，将 Willie 建模为齐次 PPP Ψ_w ，其平均概率密度为

$$\lambda_w = \frac{N_w}{4\pi(r + A_w)^2} \quad (1)$$

其中， r 表示地球平均半径， N_w 表示半径为 $r + A_w$ 的球面上 Willie 的总数量。类似的，将 Bob 建模为齐次 PPP Ψ_s ，其平均概率密度为

$$\lambda_s = \frac{N_s}{4\pi(r + A_s)^2} \quad (2)$$

其中, N_s 表示半径为 $r + A_s$ 的球面上 Willie 的总数量。

低轨卫星网络上行链路的卫星示意图如图1所示。

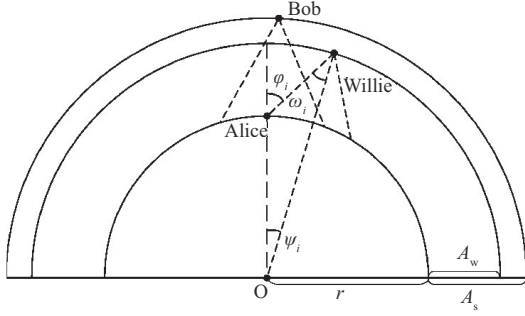


图1 低轨卫星网络上行链路的卫星示意

假设 Bob 和 Willie 都采用定向波束成形来补偿路径损耗, 并且其波束的主瓣都将指向地球中心。假设多颗 Bob 之间是不串通的, 即它们不会相互合作。当且仅当 Alice 至少在一颗 Bob 的主瓣中时, Alice 才会试图发起隐蔽通信。假设所有卫星都具有扇形波束, 并且主瓣的天线增益可表示为 G_m 。如图1所示, ω_i 表示 Alice 和卫星 i 的天线方向的夹角。若 $|\omega_i| \leq \omega_{th}$, 则卫星的接收天线增益为 G_m , 其中 ω_{th} 表示卫星波束主瓣和旁瓣之间的阈值。为实现隐蔽通信, Alice 往往具备较低的发射功率, 因此本文忽略卫星旁瓣的接收天线增益。

对于卫星网络信道, 考虑空气衰减、自由空间路径增益和雨衰^[4], 其信道增益可表示为

$$h_i^2 = G_i l_{air} l |\zeta e^{-j\theta}| \quad (3)$$

其中, l_{air} 表示低轨卫星与地面之间的空气衰减增益, 基于 ITU 模型可以忽略^[31]。 θ 为均匀分布在 $[0, 2\pi)$ 范围内的随机相位偏转, l 表示自由空间路径增益, 可表示为

$$l = \frac{c^2}{(4\pi f)^2 d_i^a} \quad (4)$$

其中, c 表示光速, f 表示载波频率, a 表示路径增益参数, 其在卫星通信自由空间路径中通常取值为2。 ζ 表示雨衰所引起的信道增益, 其建模为对数正态分布, 即 $\ln(\zeta_{dB}) \sim \mathcal{N}(\mu_{ra}, \sigma_{ra}^2)$ 。 d_i 表示 Alice 和卫星 i 之间的距离, 其可由下式计算

$$d_i = r^2 + (r + A_i)^2 - 2r(r + A_i) \cos \psi_i \quad (5)$$

其中, ψ_i 表示卫星 i 的地球中心天顶角。

系统模型如图2所示。

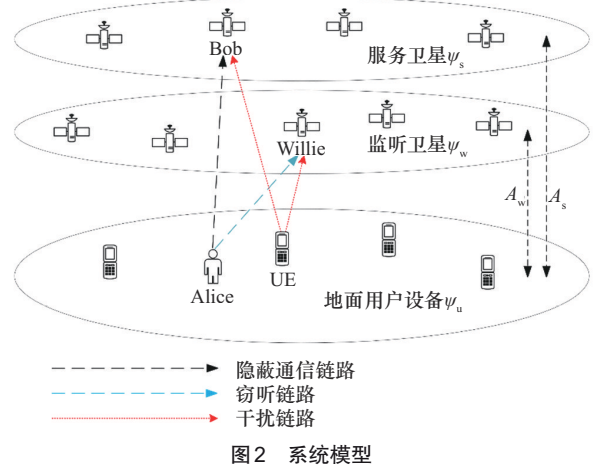


图2 系统模型

如图2所示, 假设 Willie 服务范围内存在多个地面用户设备, 所有地面用户建模为齐次 PPP Ψ_u , 其平均概率密度为

$$\lambda_u = \frac{N_u}{4\pi r^2} \quad (6)$$

其中, N_u 表示地面上用户设备的总数量。

考虑 Willie 视角, 其所接收的干扰总功率可表示为

$$I_w = \sum_{i \in \Psi_{u,i}} \kappa P_u G_m l_{air} l \zeta e^{-j\theta} \quad (7)$$

其中, P_u 表示地面用户设备的发射功率, $\Psi_{u,i}$ 表示位于卫星 w 服务范围内的地面用户设备, $\kappa \in [0, 1]$, 表示卫星系统在降低干扰上的效果因子。

1.2 隐蔽通信方案

假设 Alice 随机地向 Bob 发送隐蔽信息, 经过信道传输后, Bob 和 Willie 所接收到的信号可以分别表示为

$$y_s[j] = h_s m[j] + z_s[j] + I_s[j] \quad (8)$$

$$y_w[j] = h_w m[j] + z_w[j] + I_w[j] \quad (9)$$

其中, $\{z_s[j]\}_{j=1}^n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_s^2)$ 和 $\{z_w[j]\}_{j=1}^n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w^2)$ 分别表示 Bob 和 Willie 处的 AWGN, $I_s[j]$ 和 $I_w[j]$ 表示干扰分量。

Willie 试图检测 Alice 和 Bob 之间的通信行为。为了简单起见, 假设信道增益在每一个时隙上是静态的。因此, Willie 的二元假设检验问题包含 $\mathcal{H}_0$ (Alice 不发送信号) 和 $\mathcal{H}_1$ (Alice 发送信号)。在 Willie 处接收到的信号可以表示为

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 = z_w[j] + I_w[j] \\ \mathcal{H}_1 = h_w m[j] + z_w[j] + I_w[j] \end{cases} \quad (10)$$

本文遵循关于隐蔽通信的一个常见假设, 即 Willie 采用功率计来监测隐蔽通信^[13]。值得注意的是, 它也很容易在卫星上实现。具体地, 采用 n 信道的平均接收功率

T_w 作为测试统计量, 其可以表示为

$$T_w = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_w[j])^2 \quad (11)$$

为了便于检测, 本文采用了一个常见的假设, 即 Willie 能够使用无限数量的信号检测, 这使得式(11)可转为

$$T_w = \begin{cases} I_w + \sigma_w^2 & , \mathcal{H}_0 \\ P_w + I_w + \sigma_w^2 & , \mathcal{H}_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, I_w 和 P_w 分别表示 $I_w[j]$ 和 $h_w m[j]$ 的平均功率。

$\mathcal{P}_{FA} = \mathcal{P}(\mathcal{D}_1|\mathcal{H}_0)$ 和 $\mathcal{P}_{MD} = \mathcal{P}(\mathcal{D}_0|\mathcal{H}_1)$ 分别表示 Willie 的虚警概率和漏检概率, 即 Alice 没有进行隐蔽信号传输但 Willie 检测到有通信行为, 和 Alice 进行了隐蔽信号传输但 Willie 没有检测到有通信行为。令 P_0 和 P_1 分别表示 $\mathcal{H}_0$ 和 $\mathcal{H}_1$ 的先验概率, 且满足 $P_0 + P_1 = 1$, 则 Willie 的总错误检测概率可表示为

$$\xi = 2 \times (P_0 \mathcal{P}_{FA} + P_1 \mathcal{P}_{MD}) \quad (13)$$

对于低轨卫星网络上行链路隐蔽通信, 本文重点考虑通信系统的隐蔽性能, 在兼顾隐蔽性和可靠性的情况下, 通过有效隐蔽速率来评估隐蔽通信系统的性能^[13, 20], 有效隐蔽速率表示为

$$\Delta = (1 - \delta)\xi R \quad (14)$$

其中, R 表示系统的目标传输速率, δ 表示 Bob 的传输中断概率。

符号说明: $\mathcal{P}$ 和 $\mathcal{E}$ 分别表示概率和数学期望, $\bar{a} \triangleq \mathcal{E}(a)$ 和 $\bar{a}^2 \triangleq \mathcal{E}(a^2)$ 分别表示随机变量 a 的一阶和二阶累计量, $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 表示均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布,

$$\Gamma(k) \triangleq \int_0^\infty e^{-t} t^{k-1} dt, \quad \Gamma(k, x) \triangleq \int_x^\infty e^{-t} t^{k-1} dt \quad \text{和}$$

$$\gamma(k, x) \triangleq \int_0^x e^{-t} t^{k-1} dt \text{ 分别表示伽马函数、上不完全伽马函数和下不完全伽马函数, } f_a(x), F_a(x) \text{ 和 } \mathcal{F}_a(x) \text{ 分别表示随机变量 } a \text{ 的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF), 累计分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 和互补累计分布函数 (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF), } \text{erf}(x) \triangleq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \text{ 表示误差函数。}$$

2 隐蔽性能分析

下面首先推导低轨卫星网络中的概率分布, 随后通过上行链路干扰分析, 推导出 Willie 错误检测概率和 Bob 的传输中断概率。

2.1 低轨卫星网络中的概率分布

考虑到隐蔽通信通常要求 Alice 具有较低的传输功率, 可以假设当且仅当 Alice 在卫星的主瓣内时, 其检测或者隐蔽通信是有效的。因此, 可将 Ψ_j 划分为两个集合 $\Psi_{j,m}$ 和 $\Psi_{j,i}$, 分别由主瓣指向 Alice 和主瓣未指向 Alice 的卫星组成。地球中心天顶角阈值^[4]定义为

$$\psi_{j,\text{th}} = \arcsin\left(\frac{r + A_j}{r} \sin \omega_{j,\text{th}}\right) - \omega_{j,\text{th}} \quad (15)$$

$$\text{且 } \psi_{j,\text{th}} \leq \left(\frac{r + A_j}{r} \sin \omega_{j,\text{th}}\right), \text{ 其中 } A_j \in \{A_w, A_s\}。 \text{ 由于}$$

卫星随机分布在一个球面上, 因此 $\Psi_{j,m}$ 或者 $\Psi_{j,i}$ 中的卫星数量可以是 0。

基于有限维齐次 PPP 的概率分布, 即 $\mathcal{P}\{N(\Psi_m) = p\} \triangleq \frac{(\Lambda_m)^p}{p!} e^{-\Lambda_m}$, 其中 $\Lambda_m = \mathcal{S}_m \lambda_w$, $\mathcal{S}_m$ 表示区域 Ψ_m 的面积, $N(\Psi_m)$ 表示区域 Ψ_m 内点的数量, 可以推导出 $\Psi_{j,m}$ 的概率分布为^[29]

$$P\{N(\Psi_{j,m}) = p\} = \frac{e^{-\frac{N_j(1 - \cos \psi_{j,\text{th}})}{2}}}{p!} \left(\frac{N_j(1 - \cos \psi_{j,\text{th}})}{2}\right)^p \quad (16)$$

其中, $\Psi_{j,m} \in \{\Psi_{w,m}, \Psi_{s,m}\}$, $N_j \in \{N_w, N_s\}$ 。同理可得卫星覆盖范围内地面用户数量的概率分布为

$$P\{N(\Psi_{u,j,m}) = p\} = \frac{e^{-\frac{N_u(1 - \cos \psi_{j,\text{th}})}{2}}}{p!} \left(\frac{N_u(1 - \cos \psi_{j,\text{th}})}{2}\right)^p \quad (17)$$

其中, $\Psi_{u,j,m}$ 表示卫星 j 覆盖范围内地面用户的集合。

考虑到 Alice 将试图与距离最近的 Bob 进行通信, 并且当且仅当 $N(\Psi_{s,m}) \neq 0$ 时 Alice 才会试图传输隐蔽信号。

因此, Alice 与 Bob 的距离 d_s 的 CCDF 可表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{d_s}(x) &= P\{d_s \geq x\} \\ &= \frac{\mathcal{P}\{N(\Psi_{s,x}) = 0\} \left(1 - \mathcal{P}\{N(\Psi_{s,m-x}) = 0\}\right)}{1 - \mathcal{P}\{N(\Psi_{s,m}) = 0\}} \\ &= \frac{e^{-\frac{\mathcal{S}_s N_s}{\mathcal{S}_A}} (1 - e^{-\frac{(\mathcal{S}_m - \mathcal{S}_s) N_s}{\mathcal{S}_A}})}{1 - e^{-\frac{\mathcal{S}_m N_s}{\mathcal{S}_A}}} \\ &= \frac{e^{-A_1(x^2 - A_s^2)} - B_1}{1 - B_1} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\mathcal{S}_A = 4\pi(r + A_s)^2$, $\mathcal{S}_x = \frac{\pi(r + A_s)(x^2 - A_s^2)}{r}$, $\mathcal{S}_m =$

$$2\pi(r + A_s)^2(1 - \cos \omega_{s,th}), A_1 = -\frac{N_s}{[4r(r + A_s)]},$$

$$B_1 = \exp[-N_s(1 - \cos \omega_{s,th})/2],$$

$$d_{s,th} = \sqrt{r^2 + (r + A_s)^2 - 2r(r + A_s)\cos \omega_{s,th}}.$$

对式(16)求导, d_s 的PDF可表示为

$$f_{d_s}(x) = \begin{cases} \frac{2A_1 x e^{-A_1(x^2 - A_s^2)}}{1 - B_1}, & x \in (A_s, d_{s,th}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

同理可得, Alice与Willie的距离PDF可表示为

$$f_{d_w}(x) = \begin{cases} \frac{2A_2 x e^{-A_2(x^2 - A_w^2)}}{1 - B_2}, & x \in (A_w, d_{w,th}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{其中, } A_2 = -\frac{N_w}{[4r(r + A_w)]}, B_2 = \exp[-N_w(1 - \cos \omega_{w,th})/2],$$

$$d_{w,th} = \sqrt{r^2 + (r + A_w)^2 - 2r(r + A_w)\cos \omega_{w,th}}.$$

2.2 上行链路干扰分析

为求解最优检测问题, 需推导Willie的虚警概率 P_{FA} 和漏检概率 P_{MD} 。然而, 计算 P_{FA} 和 P_{MD} 的主要问题是式(12)中的上行链路干扰功率和 I_w 。由于其各项为非独立同分布, I_w 的准确概率分布难以求出。在进一步推导系统的隐蔽性能之前, 首先求导上行链路干扰功率的一阶矩和二阶矩。基于Campbell定理^[32], Willie处上行链路干扰的一阶矩可表示为

$$\begin{aligned} E(I_w) &= \mathbb{E}_\zeta \mathbb{E}_{\psi_{w,m}} \left(\sum_{i \in \Psi_{u,i}} \kappa P_u |G_i l_{air} l_{\zeta} e^{-j\theta}| \right) \\ &= 2\pi r^2 D \lambda_u \kappa P_u G_m l_{air} \zeta \int_0^{\varphi_{w,th}} l(\varphi) \sin \varphi d\varphi \\ &= \frac{r D \lambda_u \kappa P_u G_m l_{air} \zeta^2 (\ln d_{w,th} - \ln A_w)}{8\pi f^2 (r + A_w)} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, D 表示信号占空比, ζ 的一阶累积量可表示为

$$\bar{\zeta} = e^{\mu_{\zeta} + \frac{\sigma_{\zeta}^2}{2}} \quad (22)$$

Willie处上行链路干扰的二阶矩可表示为^[32]

$$\begin{aligned} \sigma_{I_w}^2 &= \mathbb{E}_\zeta \mathbb{E}_{\psi_{w,m}} \left[\sum_{i \in \Psi_{u,i}} (\kappa P_u |G_i l_{air} l_{\zeta} e^{-j\theta}|)^2 \right] \\ &= 2\pi r^2 D^2 \lambda_u \kappa^2 P_u^2 G_m^2 l_{air}^2 \zeta^2 \int_0^{\varphi_{w,th}} l(\varphi)^2 \sin \varphi d\varphi \\ &= \frac{r^2 D^2 \lambda_u \kappa^2 P_u^2 G_m^2 l_{air}^2 \zeta^4 (1 - \cos \psi_{w,th})}{128\pi^3 f^4 A_w^2 d_{w,th}^2} \end{aligned} \quad (23)$$

其中, ζ 的二阶累积量可表示为

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}^2 &= \sigma_{\zeta}^2 + \bar{\zeta}^2 \\ &= e^{2\mu_{\zeta} + 2\sigma_{\zeta}^2} \end{aligned} \quad (24)$$

首先将上行链路干扰定义为随机变量 $X_{I_w} \triangleq \sum_{i \in \Psi_{u,i}} \kappa P_u G_m l_{air} l_{\zeta} e^{-j\theta}$, 随后通过引入伽马近似方法^[33], 可求得 X_{I_w} 的近似CDF表示为

$$F_{X_{I_w}}(x) \approx \frac{\gamma \left(k_{X_{I_w}}, \frac{x}{\theta_{X_{I_w}}} \right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} \quad (25)$$

其中, $k_{X_{I_w}}$ 和 $\theta_{X_{I_w}}$ 可分别由式(26)和式(27)求得

$$\begin{aligned} k_{X_{I_w}} &= \frac{[\mathbb{E}(I_w)]^2}{\sigma_{I_w}^2} \\ &= \frac{2\pi \lambda_u A_w^2 d_{w,th}^2 (\ln d_{w,th} - \ln A_w)}{e^{\sigma_{\zeta}^2} (r + A_w)^2 (1 - \cos \psi_{w,th})} \\ \theta_{X_{I_w}} &= \frac{\sigma_{I_w}^2}{\mathbb{E}(I_w)} \\ &= \frac{r D \kappa P_u G_m l_{air} e^{\mu_{\zeta} + \frac{3}{2}\sigma_{\zeta}^2} c^2 (r + A_w) (1 - \cos \psi_{w,th})}{16\pi^2 f^2 A_w^2 d_{w,th}^2 (\ln d_{w,th} - \ln A_w)} \end{aligned} \quad (26)$$

2.3 错误检测概率

Willie的虚警概率 P_{FA} 和漏检概率 P_{MD} 可由式(12)分别推导如下

$$\begin{aligned} P_{FA} &= P[X_{I_w} + \sigma_w^2 > \eta] \\ &= P[X_{I_w} > \eta - \sigma_w^2] \\ &= \begin{cases} 1, & \eta \leq \sigma_w^2 \\ \frac{\Gamma \left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2}{\theta_{X_{I_w}}} \right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})}, & \eta > \sigma_w^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} P_{MD} &= P[X_{I_w} + P_w + \sigma_w^2 \leq \eta] \\ &= \begin{cases} 0, & \eta \leq P_w + \sigma_w^2 \\ \frac{\gamma \left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2 - P_w}{\theta_{X_{I_w}}} \right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})}, & \eta > P_w + \sigma_w^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

其中, η 表示Willie的检测阈值, σ_w^2 表示Willie处的噪声功率, $P_w = (P_a G_m l_{air} c^2 \zeta) / (4\pi f d_w)^2$ 表示Willie所接收的Alice信号分量。

在推导出虚警概率 P_{FA} 和漏检概率 P_{MD} 后, Willie 的错误检测概率可表示为

$$\xi = \begin{cases} 2P_0 P_{FA} + 2P_1 P_{MD} \\ 1, & \eta \leq \sigma_w^2 \\ \frac{2P_0 \Gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})}, & \sigma_w^2 < \eta \leq \sigma_w^2 + P_w \\ \frac{2P_0 \Gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} + \frac{2P_1 \gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2 - P_w}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})}, & \eta > \sigma_w^2 + P_w \end{cases} \quad (30)$$

式(30)表明, 当 $\eta \leq \sigma_w^2$ 时, $\xi = 1$, 这表明 Willie 的检测完全无效。当 $P_a \rightarrow 0$, 很容易推导出 $\lim_{P_a \rightarrow 0} P_w = 0$, 此时

$$\lim_{P_a \rightarrow 0} \frac{2P_0 \Gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} + \frac{2P_1 \gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2 - P_w}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} = 1。$$

这意味着如果 $P_a \rightarrow 0$ 时, 对于任意检测阈值 $\eta \in [0, +\infty)$, Willie 的检测完全无效。

2.4 平均错误检测概率

一个常见的假设是, Willie 无法获取 Alice 的准确位置和准确的瞬时 CSI。在这种情况下, 为获取最小平均错误检测概率, Willie 仅能根据其 CSI h_w^2 和距离 d_w 的统计数据来设计其最佳检测阈值 η^* 。此时 Willie 处平均错误检测概率可表示为

$$\bar{\xi} = \mathbb{E}_{d_w} \mathbb{E}_{\zeta}(\xi) = \begin{cases} 1, & \eta \leq \sigma_w^2 \\ \frac{2P_0 \Gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} + \frac{2P_1 \gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2 - P_w(x,t)}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} \\ \int_{A_w}^{d_{w,th}} \int_0^{g_1(x)} \frac{2P_1 \gamma\left(k_{X_{I_w}}, \frac{\eta - \sigma_w^2 - P_w(x,t)}{\theta_{X_{I_w}}}\right)}{\Gamma(k_{X_{I_w}})} f_{\zeta}(t) f_{d_w}(x) dt dx, & \eta > \sigma_w^2 \end{cases} \quad (31)$$

其中, $g_1(x) = (4\pi f d_w)^2 (\eta - \sigma_w^2) / (P_a G_m l_{air} c^2)$, $P_w(x,t) = (P_a G_m l_{air} c^2 t) / (4\pi f x)^2$, $f_{\zeta}(t) = \frac{1}{t \sqrt{2\pi} \sigma_{ra}} \exp[-\frac{1}{2\sigma_{ra}^2} (\ln t -$

$\mu_{ra})^2]$, Alice 与 Willie 的距离 PDF $f_{d_w}(x)$ 服从式(18)。

Willie 的最佳检测阈值 η^* 为使平均错误检测概率 $\bar{\xi}$ 最小的 η , 可表示为

$$\eta^* = \underset{\eta \in (\sigma_w^2, +\infty)}{\operatorname{argmin}} \mathbb{E}_{d_w} \mathbb{E}_{\zeta}(\xi) \quad (32)$$

本文考虑隐蔽通信的最坏情况, 即 Willie 具备足够的计算能力以获取最佳检测阈值 η^* 。考虑到式(31)中, $\eta > \sigma_w^2$ 时, $\bar{\xi}$ 并非凸函数, Willie 采用二分法计算出其最佳检测阈值 η^* 。

2.5 传输中断概率

由于信道和干扰的不确定性, Alice 和 Bob 之间的隐蔽通信可能发生中断。为求解 Bob 的传输中断概率, 首先需获取信干噪比 SINR_s , 可表示为

$$\text{SINR}_s = \frac{P_s}{I_s + \sigma_s^2} \quad (33)$$

其中, $P_s = (P_a G_m l_{air} c^2 \zeta) / (4\pi f d_s)^2$ 表示 Bob 所接收到的 Alice 发送的信号。

当信道容量低于传输速率时, 通信发生中断事件。因此, Bob 的传输中断概率可表示为

$$\begin{aligned} \delta &= P[\log_2(1 + \text{SINR}_s) < R] \\ &= P\left[\zeta < \frac{(4\pi f d_s)^2 (2^R - 1)(I_s + \sigma_s^2)}{P_a G_m l_{air} c^2}\right] \\ &= EF_{\zeta}\left[\zeta < \frac{(4\pi f d_s)^2 (2^R - 1)(I_s + \sigma_s^2)}{P_a G_m l_{air} c^2}\right] \\ &= \int_0^{+\infty} \int_0^{g_2(x)} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{ra} t} e^{-\frac{(\ln t - \mu_{ra})^2}{2\sigma_{ra}^2}} dt f_{X_{I_s}}(x) dx \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $g_2(x) = [(4\pi f d_s)^2 (2^R - 1)(x + \sigma_s^2)] / (P_a G_m l_{air} c^2)$,

$f_{X_{I_s}}(x) = (x^{k_{X_{I_s}} - 1} e^{-\frac{x}{\theta_{X_{I_s}}}}) / [\theta_{X_{I_s}}^{k_{X_{I_s}}} \Gamma(k_{X_{I_s}})]$, $k_{X_{I_s}} = [2\pi \lambda_u A_s^2 d_{s,th}^2 (\ln d_{s,th} - \ln A_s)] / [e^{\sigma_m^2} (r + A_s)^2 (1 - \cos \psi_{s,th})]$, $\theta_{X_{I_s}} = \left[r D k P_u G_m l_{air} e^{\mu_{ra} + \frac{3}{2} \sigma_m^2} c^2 (r + A_s) (1 - \cos \psi_{s,th}) \right] / [16\pi^2 f^2 A_s^2 d_{s,th}^2 (\ln d_{s,th} - \ln A_s)]$ 。

3 仿真结果与分析

本文通过设计蒙特卡罗仿真验证所提理论分析的正确性, 并研究分析考虑地面干扰下的低轨卫星网络隐蔽通信性能。所设计的蒙特卡罗仿真实验包含 3 个相互独立

的齐次 PPP：表示在半径为 $r + A_s$ 的球面上随机生成的服务卫星 Bob 的 PPP Ψ_s ；表示在半径为 $r + A_w$ 的球面上随机生成的监测卫星 Willie 的 PPP Ψ_w ；表示在半径为 r 的球面上随机生成的地面用户设备的 PPP Ψ_u 。在仿真实验中，除非有特殊说明，系统仿真参数值设置如下^[34]：地球平均半径 $r = 6371$ km，服务卫星 Bob 轨道高度 $A_s = 500$ km，监测卫星 Willie 轨道高度 $A_w = 500$ km，服务卫星 Bob 数量 $N_s = 2000$ 颗，监测卫星 Willie 数量 $N_w = 2000$ 颗，地面用户设备数量 $N_u = 1 \times 10^5$ 台，卫星波束主瓣和旁瓣之间的角度阈值 $\omega_{th} = 20^\circ$ ，先验概率 $P_0 = P_1 = 0.5$ ，自由空间路径损耗因子 $\alpha = 2$ ，光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s，载波频率 $f = 2$ GHz，空气衰落增益 $l_{air} = 0$ dBm，雨衰均值 $\mu_{ra} = 0$ ，雨衰方差 $\sigma_{ra}^2 = 2.56$ ，地面用户设备发射功率 $P_u = 33$ dBm，Alice 发射功率 $P_a = 23$ dBm，噪声功率 $\sigma_w^2 = \sigma_s^2 = -114$ dBm，卫星主瓣天线增益 $G_m = 30$ dBm，卫星干扰因子 $\kappa = -20$ dBm，信号占空比 $D = 2.25\%$ ，目标传输速率 $R = 1$ bit/(s·Hz)。

图3给出了不同 Willie 高度 A_w 下 Willie 的平均错误检测概率 ξ 和 Alice 发射功率 P_a 之间的变化关系。首先可以观测到 ξ 随着 P_a 的增加而减小。原因是 Alice 的发射功率较小时意味着干扰功率相对较高，这更有效地将 Alice 的隐蔽通信信号隐藏在背景干扰和噪声中，使其不被 Bob 检测到。另外，可以观测到 ξ 随着 A_w 的增加而增加，这是因为 Alice 和 Willie 之间的路径损耗增益 l 随着 A_w 的增加而降低，导致 Willie 检测能力下降。最后，可以观测到蒙特卡罗模拟结果与式(31)的理论结果相匹配，验证了式(25)中给出的理论分析和伽马近似方法的正确性。

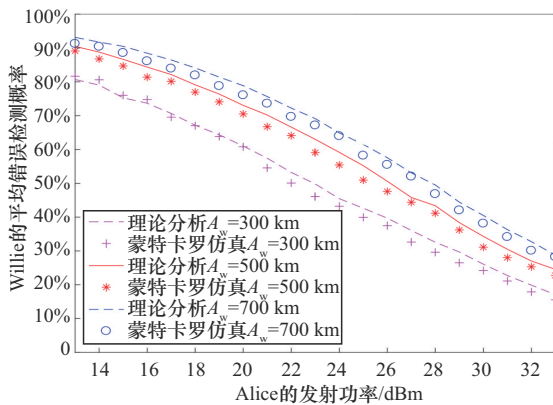


图3 不同 Willie 高度 A_w 下 Willie 的平均错误检测概率 ξ 和 Alice 发射功率 P_a 之间的变化关系

图4给出了不同 Willie 数量 N_w 下 Willie 的平均错误检测概率 ξ 和地面用户设备数量 N_u 之间的变化关系，

仿真实验结果与理论分析结果匹配良好。首先可以观测到 ξ 随着 N_u 的增加而增加，这是由于地面用户设备数量越大，则干扰功率越大，使得 Willie 的检测更加困难。此外，还可以观测到 Willie 的数量对隐蔽通信的性能几乎没有影响，原因是低轨卫星的高度相对较低，存在有效 Willie 区域具备较小的面积，这使得无论 Willie 的总数量是多少，只要存在有效的 Willie，最近的有效 Willie 与 Alice 的距离总是相似的。

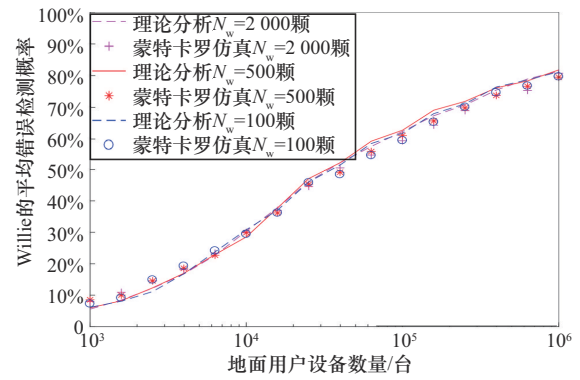


图4 不同 Willie 数量 N_w 下 Willie 的平均错误检测概率 ξ 和地面用户设备数量 N_u 之间的变化关系

图5给出了不同 Bob 高度 A_s 下 Bob 的传输中断概率 δ 和 Alice 发射功率 P_a 之间的变化关系，仿真实验结果与理论分析结果匹配良好。首先可以观测到 δ 与 P_a 呈现单调递减函数关系，这是因为较大的 Alice 发射功率将带来 Bob 的较高的 SINR，从而降低 Bob 的传输中断概率。此外，还可以观测到 δ 随着 A_s 的增加而显著提高，这是因为随着 A_s 的增加，Alice 和 Bob 之间的路径损耗增益 l 降低，这使得 Bob 拥有更低的 SINR。

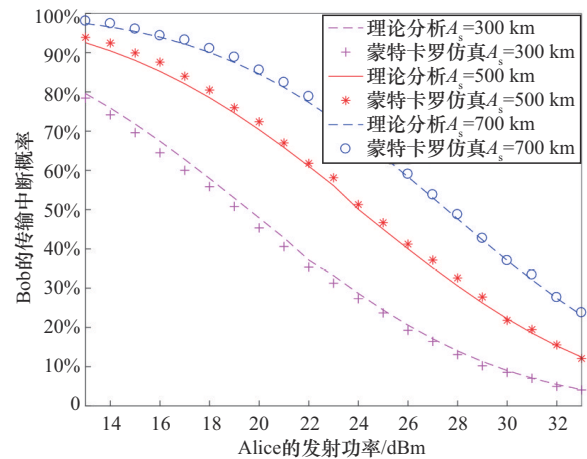


图5 不同 Bob 高度 A_s 下 Bob 的传输中断概率 δ 和 Alice 发射功率 P_a 之间的变化关系

图 6 给出了不同目标传输速率 R 下 Bob 的传输中断概率 δ 和地面用户设备数量 N_u 之间的变化关系, 仿真实验结果与理论分析结果匹配良好, 验证了式(34)中理论分析的正确性。首先可以观测到 δ 随着 N_u 的增加而增加, 这是由于更大数量地面用户设备将带来更高的干扰功率, 从而降低 Bob 的 SINR。此外, 还可以观测到 δ 随着 R 的增加而显著提高, 与理论分析结果式(34)相符合。

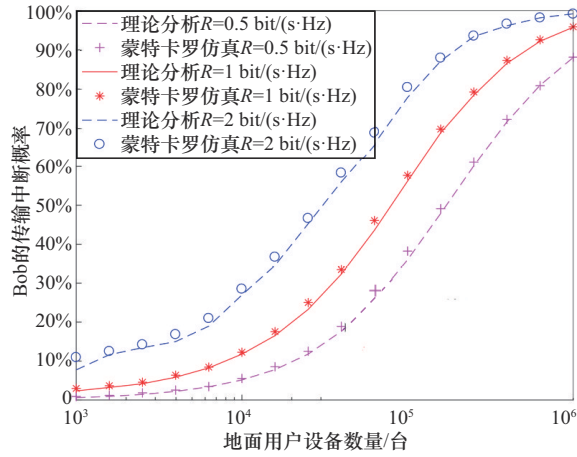


图 6 不同目标传输速率 R 下 Bob 的传输中断概率 δ 和地面用户设备数量 N_u 之间的变化关系

图 7 给出了不同 Alice 发射功率 P_a 下有效隐蔽速率 Δ 随目标传输速率 R 的变化关系。可以观测到 Δ 随着 R 的增加首先迅速增加, 到了顶点后再缓慢下降。此外, 还可以观测到 Δ 随着 P_a 的增加而增加, 原因在于较高的 P_a 将降低 Bob 的传输中断概率, 从而提升系统的有效隐蔽速率。然而, 较高的 Alice 传输功率将带来较低的平均错误检测概率, 这可能导致较低的隐蔽能力。

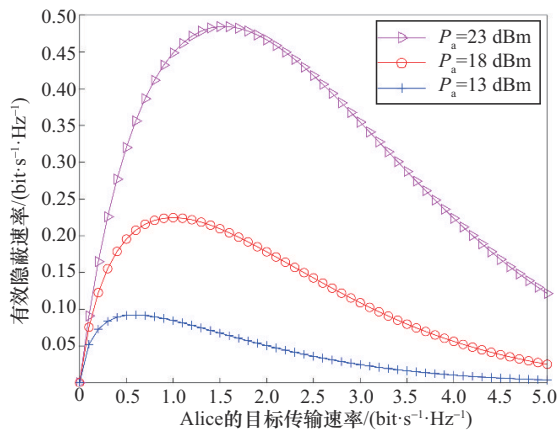


图 7 不同 Alice 发射功率 P_a 下有效隐蔽速率 Δ 随目标传输速率 R 的变化关系

4 结束语

本文研究了低轨卫星网络上行链路的隐蔽通信性能, 提出了低轨卫星网络上行链路隐蔽通信模型, 并基于随机几何分析了地面用户 Alice 与卫星之间的距离分布。通过伽马近似方法, 推导出监测卫星 Willie 的平均错误检测概率和服务卫星 Bob 的传输中断概率的近似表达式。蒙特卡罗仿真结果验证了理论分析的准确性, 并讨论了卫星高度、卫星数量、地面用户数量、发射机发射功率和传输速率对低轨卫星网络上行链路隐蔽通信性能的影响。此外, 该方案可以扩展到包含人工干扰源的卫星网络隐蔽通信, 以及其他 NTN 中的隐蔽通信, 如下行链路卫星地面网络等, 这些课题将作为未来研究工作的重点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [4] YIN Z S, CHENG N, LUAN T H, et al. Green interference based symbiotic security in integrated satellite-terrestrial communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(11): 9962-9973.
- [5] JUNG D H, RYU J G, CHOI J. When satellites work as eavesdroppers[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2022, 17: 2784-2799.
- [6] YUAN S, SUN Y H, PENG M G, et al. Joint beam direction control and radio resource allocation in dynamic multi-beam LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8222-8237.
- [7] ZENG S L, CAO B, SUN Y, et al. Blockchain-assisted cross-domain data sharing in industrial IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(16): 26778-26792.
- [8] CHEN Z, ZHU L H, JIANG P, et al. Blockchain meets covert communication: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutori-

- als, 2022, 24(4): 2163-2192.
- [9] YAN S H, ZHOU X Y, HU J S, et al. Low probability of detection communication: opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 19-25.
- [10] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Hiding information in noise: fundamental limits of covert wireless communication [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(12): 26-31.
- [11] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Limits of reliable communication with low probability of detection on AWGN channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 1921-1930.
- [12] CHEN X Y, AN J P, XIONG Z H, et al. Covert communications: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 1173-1198.
- [13] ZHENG T X, YANG Z T, WANG C, et al. Wireless covert communications aided by distributed cooperative jamming over slow fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7026-7039.
- [14] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON F T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [15] CHE P H, BAKSHI M, JAGGI S. Reliable deniable communication: Hiding messages in noise[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2013: 2945-2949.
- [16] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. On covert communication with noise uncertainty[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 941-944.
- [17] BENDARY A, ABDELAZIZ A, KOKSAL C E. Achieving positive covert capacity over MIMO AWGN channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory, 2021, 2(1): 149-162.
- [18] CHO K H, LEE H. Covert communication over Gaussian multiple-access channels with feedback[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(9): 1985-1989.
- [19] SHAHZAD K, ZHOU X Y. Covert wireless communications under quasi-static fading with channel uncertainty[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 16: 1104-1116.
- [20] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. Covert wireless communication with a Poisson field of interferers[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6005-6017.
- [21] SOBERS T V, BASH B A, GUHA S, et al. Covert communication in the presence of an uninformed jammer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 6193-6206.
- [22] SOLTANI R, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Covert wireless communication with artificial noise generation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11): 7252-7267.
- [23] HU J S, YAN S H, ZHOU X Y, et al. Covert communication achieved by a greedy relay in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4766-4779.
- [24] WU Z K, LIU R, SHUAI H F, et al. Covert performance for integrated satellite multiple terrestrial relay networks with partial relay selection[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5524.
- [25] SONG D, YANG Z Y, PAN G F, et al. RIS-assisted covert transmission in satellite terrestrial communication systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(22): 19415-19426.
- [26] KANG B C, YE N, QI B. Comparisons on covert performances of NOMA in satellite Internet of Things[C]//Proceedings of the 2021 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp). Piscataway: IEEE Press, 2021: 318-322.
- [27] WU J Y, CHEN C F, BU X Y. Polar code-aided frequency offset estimation algorithm in satellite covert communication carrier synchronization[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1340-1344.
- [28] CHEN C F, WANG S, LI L, et al. Intelligent covert satellite communication for military robot swarm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 5363-5382.
- [29] 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.
- [30] 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行覆盖性能分析[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.
- [31] Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems: ITU-R P.681 SPANISH[S]. ITU-R, 2009.
- [32] HAENGGI M. Stochastic geometry for wireless network[M]. New York: Cambridge University Press, 2012.
- [33] HEATH R W, KOUNTOURIS M, BAI T Y. Modeling heterogeneous network interference using Poisson point processes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 4114-4126.
- [34] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) [S]. 2021.

[作者简介]



曾舒磊 (1992-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星通信、无线网络安全、区块链技术等。



曹宾 (1983-), 男, 博士, 北京邮电大学教授, 博士生导师, 主要从事区块链原理与技术、移动通信和无线网络方面的研究工作。