

基于非正交多址接入的星空地多用户认知网络性能研究

刘瑞 郭克锋* 朱诗兵 李长青 李可盈

(航天工程大学航天信息学院 北京 101416)

摘要: 卫星通信(SatCom)因其强大的生存能力和无缝覆盖的独特优势,能够弥补地面通信网络受地形限制、覆盖范围小等短板,在当前和未来的无线通信系统中具有重要的地位。此外,空中辅助通信由于其在星地网中的灵活性和可扩展性,具有很高的研究价值。为克服星空地网络(ISATN)中频谱短缺问题,认知无线电(CR)和非正交多址接入(NOMA)被用于提高频谱利用率和传输性能。因此,该文研究了基于NOMA的星空地认知网络(CISATN)的性能,考虑多用户场景,分别得到了主网络和次级网络的中断概率(OP)的准确表达式和高信噪比下的渐进表达式,并给出了这两个网络的分集增益。最后,通过蒙特卡罗仿真验证了理论推导的正确性,并分析了关键变量对系统指标的影响。

关键词: 星空地网络; 认知无线电; 非正交多址接入; 中断性能

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)00-0001-08

DOI: 10.11999/JEIT230212

Performance Analysis of Satellite-Aerial-Terrestrial Multiple Primary Users Cognitive Networks Based on NOMA

LIU Rui GUO Kefeng ZHU Shibing LI Changqing LI Keying

(School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Due to its unique advantages of strong survivability and seamless coverage, Satellite Communication (SatCom) can make up for the shortcomings of ground communication such as terrain limitations and small coverage, and has become increasingly important in current and future communication systems. In addition, aerial-assisted communication is considered a valuable research direction due to its flexibility and scalability in satellite ground networks. To overcome the problems of spectrum shortage and low spectrum utilization in Integrated Satellite-Aerial-Terrestrial Network (ISATN), Cognitive Radio (CR) and Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) are used in wireless communication networks to improve spectrum utilization and transmission performance. In this regard, the performance of a NOMA-based Cognitive Integrated Satellite-Aerial-Terrestrial Network(CISATN) with multiple primary users is studied, and accurate expressions for Outage Probability (OP) and ergodic capacity of the primary and secondary networks are derived. Asymptotic expressions for the OP and diversity order of these two networks are provided to obtain further insights. Finally, the correctness of the theoretical derivation is verified through numerical simulation, and the impact of key variables on system indicators is analyzed.

Key words: Integrated Satellite-Aerial -Terrestrial Network (ISATN); Cognitive Radio (CR); Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Outage performance

1 引言

随着无线通信需求的增长,下一代无线通信系统必须具备宽覆盖、高速率、低能耗和高频谱利用

率等特性。卫星通信(Satellite Communication, SatCom)被认为是其不可缺少的一部分,它在实现全球通信的无缝连接,处理灾区或偏远地区的突发事件等方面具有重要作用^[1,2]。星地融合网络(Integrated Satellite-Terrestrial Network, ISTN)由于能够实现卫星通信与地面无线通信优势互补,已成为近年来的研究热点^[3]。此外,空基辅助通信也吸引了许多专家的研究兴趣,它可以根据需求快速部署和及时调整^[4]。因此,空基辅助的ISTN,即星空地

收稿日期: 2023-04-03; 改回日期: 2023-07-03; 网络出版: 2023-07-14

*通信作者: 郭克锋 guokefeng.cool@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(6201517)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (6201517)

融合网络(Integrated Satellite-Aerial-Terrestrial Network, ISATN), 在未来的无线通信网络中具有许多实际应用^[5]。然而, 有限的频谱资源将制约ISATN的发展。对此, 可以通过认知无线电(Cognitive Radio, CR)和非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)来提高频谱效率(Spectral Efficiency, SE)以解决上述问题^[6-8]。

1.1 相关工作

星地融合网络作为一种极具前景的未来通信网络架构, 能够克服障碍和地理限制, 具有重要的现实意义^[9-11]。文献[10]利用拍卖机制降低ISTN的系统消耗, 并应用匈牙利算法求解相应优化问题。文献[11]设计了一种混合多波束算法, 最大限度地提高了ISTN的和速率。文献[12]讨论了具有同信道干扰(Co-Channel Interference, CCI)和固有硬件损伤(Hardware Impairments, HIs)的ISTN的中断性能, 并采用部分中继选择方案选择最优中继。文献[13]开发了不同的自适应传输方案, 为ISTN提供实际应用。文献[14]以地面移动卫星(Land Mobile Satellite, LMS)为中继, 研究了一种新的具有HIs的双跳ISTN的性能。文献[15]研究了具有多中继、多用户和多窃听者的ISTN的物理层安全性, 其采用机会用户中继选择方案来提高保密性能。文献[16]利用中继的最优波束形成(BeamForming, BF)权向量, 提出了最佳用户调度方案和用户公平调度方案, 提高了ISTN的中断性能。

无人机通信能够以较低的成本快速建立和调整通信系统, 满足未来通信低能耗、高效率的要求, 在大型或临时性的活动和灾区的通信保障已得到广泛应用^[17]。考虑到上述优点, 许多科学家和工程师都将研究重点放在了ISATN上。文献[18]讨论了ISATN的能量效率(Energy Efficient, EE), 设计了基于总功率约束的BF方案和基于单天线功率约束的BF方案来最大化EE。文献[19]设计了一种基于惩罚函数的优化算法来最大化基于速率分拆多址接入(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)的ISATN的和速率, 以满足大规模传输需求。文献[20]分析了启用缓存方案的ISATN的性能, 它可以减少传输延迟并加速内容的更新。文献[21]讨论了ISATN的上行海量接入问题, 提出一种空分多址接入(Space Division Multiple Access, SDMA)方案来优化遍历和速率。

此外, CR在地面无线通信中得到了充分的讨论, 并逐渐成为ISTN中的热门使能技术。其通过允许次级网络(Secondary Network, SN)共享主网络(Primary Network, PN)的频谱来提高频谱利用

率, 对建立高效网络具有重要意义^[22]。文献[23]设计了一种EE-SE权衡指数, 来衡量卫星-车辆认知网络的性能, 并在此基础上提出了一种功率分配方案。文献[24]研究了基于解码转发(Decode-and-Forward, DF)协议的认知ISTN的性能, 并推导了中断概率(Outage Probability, OP)的准确和渐近表达式。文献[25]建立了一个具有多个SN的覆盖认知ISTN, 并提出了部分和机会SN选择方案, 以最小化PN的OP。文献[26]为提高存在多个未知窃听者的认知ISTN的安全性能, 提出了一种BF方案。

此外, 还可以采用NOMA方案克服频谱不足的问题, 特别是在大规模终端场景下, 可以大幅节约接入资源。在ISTN中, NOMA通过牺牲接收机的复杂性来节省宝贵的时间/频率/码资源^[27]。文献[28]在基于NOMA的ISTN中应用了带宽压缩(Bandwidth Compression, BC)来提高频谱利用率。文献[29]在考虑卫星和地面节点传输质量的基础上, 提出了一种基于NOMA的ISTN和速率最大化BF方案。文献[30]推导了基于NOMA的上行ISTN的遍历容量(Ergodic Capacity, EC), 但没有给出准确表达式。文献[31]考虑了一个基于NOMA的ISTN, 其中考虑了多中继和HIs, 并推导了保密中断概率(Secrecy Outage Probability, SOP), 来分析两种窃听情况下的保密性能, 即串通情况和非串通情况。文献[32]研究了基于NOMA的下垫式认知ISTN的性能, 并推导了OP和EC。文献[33]考虑了一个具有多个SN的基于NOMA的认知ISTN, 并利用部分SN选择方案以提高系统性能。

1.2 主要贡献

受上述工作的启发, 本文考虑了一种基于NOMA的星空地认知网络(Cognitive Integrated Satellite-Aerial-Terrestrial Network, CISATN), 考虑多用户场景, 且所有用户都配备多根天线。本文的主要贡献如下:

首先, 构建一种基于NOMA方案的覆盖式多用户CISATN结构, 其中ISTN的通信由次级无人机辅助。此外, 卫星和无人机使用相同的频率来增强SE。

其次, 考虑到雨衰、自由传播损耗等对信号传播的实际影响, 给出了信道的统计特性。在此基础上, 得到了PN和SN的OP的精确表达式。

然后, 推导了两种网络在高信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)条件下OP的渐近表达式, 得到了更深入的见解, 并在此基础上给出了两种网络的分集增益(Diversity Orders, DOs)。

最后, 为了进一步理解所考虑系统的性能, 给

出了数值结果, 并还对一些观测结果进行了重点分析。

2 系统模型和问题建模

2.1 系统模型

如图1所示, 本文建立了基于NOMA的覆盖式CISATN框架, 其中包含PN和SN。在PN中, 包含1个卫星源节点(A)和 K 个主要用户($\{C_i\}_{i=1}^K$), 而SN包括1个无人机发射机(B)和1个地面次要用户(D)。假设星地网络间存在严重的阴影衰落, A不能与 C_i 直接通信。因此, 在系统中采用了覆盖式CR, 由B转发PN的信号, 并利用DF协议同时发送D的预期信号。此外, 每个节点都工作在半双工模式下, 卫星和地面节点都配备了多个天线, 并且所有地面节点都位于同一卫星波束中。然而由于功率限制, B配备全向天线。假设完美的CSI可以通过反馈和训练来实现¹。此外, K 个主要用户被划分为 $K/2$ 个两用户对²。假设 C_1 和 C_2 被分配给同一用户对。卫星空中链路由阴影-莱斯(Shadowed-Rician, SR)衰落建模, 而空中-地面链路经历瑞利衰落。

2.2 信道模型

为了更接近实际传输场景, 该系统考虑了雨衰、自由空间损耗和卫星天线增益的影响, A和B之间的信道系数由式(1)给出

$$h_{ab} = V_{ab}g_{ab} \quad (1)$$

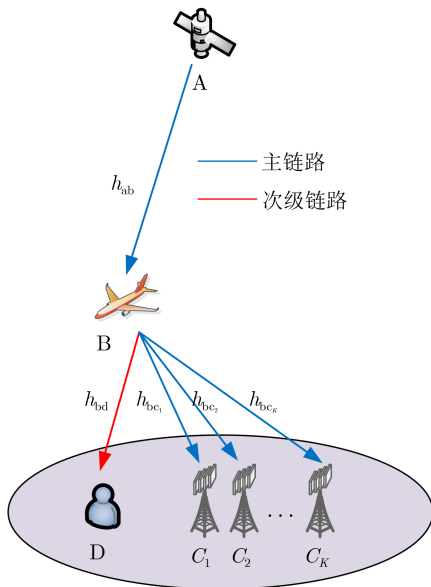


图1 系统模型

¹ 通过反馈和培训可以达到完美的CSI, 这一方法已在DVB-S2中应用。

² 用户太多会导致干扰大或接收机复杂度高, 因此本文采用两用户对方案, 以平衡性能增益和通信成本。

其中, g_{ab} 是SR衰落的随机信道系数, $V_{ab} = \sqrt{\omega_{ab} \ell_{ab} \varepsilon_{ab} / \zeta_{ab}}$, ζ_{ab} 为雨衰系数, $\zeta_{dB} = 10 \lg(\zeta_{ab})$ 经历对数正态随机分布, 表示为 $\ln(\zeta_{ab}) \sim \mathcal{CN}(\vartheta_{\zeta}, \sigma_{\zeta}^2)$ 。 ω_{ab} 表示自由空间损失, 表达式为

$$\omega_{ab} = \left(\frac{v_{ab}}{f_{ab}} \right)^2 \frac{1}{d_{ab}^2 + d_c^2} \quad (2)$$

其中, $v_{ab} = c/4$, c 表示光速, f_{ab} 表示载波频率, $d_{ab} \approx 35786$ km, d_c 表示卫星波束中心与无人机之间的距离。无人机的天线增益表示为

$$\ell_{ab} \simeq \begin{cases} \ell_{\max} - 2.5 \times 10^{-3} \left(\frac{d_b \theta}{\eta} \right)^2, & 0^\circ < \theta < \theta_1 \\ 2 + 15 \log_2 \frac{d_b}{\eta}, & \theta_1 < \theta < \theta_2 \\ 32 - 25 \log_2 \theta, & \theta_2 < \theta < 48^\circ \\ -10 & 48^\circ < \theta < 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

其中, ℓ_{\max} 是 ℓ_{ab} 的最大值, d_b 表示天线直径, η 表示信号波长, θ 表示离轴角, $\theta_1 = \frac{20\eta}{d_b}$, $\theta_2 = 15.85 \left(\frac{d_b}{\eta} \right)^{-0.6}$ 。卫星的天线增益表示为

$$\varepsilon_{ab} = \varepsilon_{\max} \left[\frac{J_1(t)}{2t} + 36 \frac{J_3(t)}{t^3} \right]^2 \quad (4)$$

其中, ε_{\max} 是 ε_{ab} 的最大值, $t = 2.70123 \sin \varpi / \sin \varpi_{3dB}$, ϖ 是无人机和卫星波束中心之间的角度, ϖ_{3dB} 表示 ϖ 的3-dB角度。

此外, 无人机和地面节点之间的 $N_e \times 1$ 信道向量由式(5)给出

$$\mathbf{h}_{be} = \mathcal{T}_{be} \mathbf{g}_{be} \quad (5)$$

其中, 下标 $e = \{c_1, c_2, d\}$ 表示目的地 C_1, C_2 和 D , N_e 是用户 e 的天线数量, \mathbf{g}_{be} 表示瑞利衰落的信道复向量。 \mathcal{T}_{be} 可以表示为

$$\mathcal{T}_{be} = \frac{1}{2} (20 \lg \lambda - 10L \lg d_{be} - 20 \lg 4\pi) \quad (6)$$

2.3 信号模型

由于该系统借助无人机实现通信, 因此整个传输过程包括两个时隙。在第1个时隙中, A通过利用叠加编码技术(Superposition Coding Technique, SCT)将混合信号发送到B, 混合信号表示为

$$x_a = \sqrt{\alpha P_a} x_1 + \sqrt{(1-\alpha) P_a} x_2 \quad (7)$$

其中, α 是主信号的功率分配系数, P_a 表示卫星的发射功率, x_1 和 x_2 分别表示 C_1 和 C_2 的目标信号, 它们的期望值等于1。因此, 在B处接收的信号可以表示为

$$y_b = h_{ab} x_a + n_b \quad (8)$$

其中, n_b 是服从 $\mathcal{CN}(0, \sigma_b^2)$ 的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

在第2个时隙中, B同时向所有地面用户发送D的期望信号和来自A的信号, 组合信号由式(9)给出

$$s_b = \sqrt{\beta P_b} (\sqrt{\alpha} x_1 + \sqrt{1 - \alpha} x_2) + \sqrt{(1 - \beta) P_b} x_b \quad (9)$$

其中, β 是B的功率分配系数, P_b 是无人机的发射功率, x_b 是D的期望信号, $E(|x_b|^2) = 1$ 。因此, 可以得到地面节点处的接收信号

$$y_{be} = \mathbf{w}_{be}^H \mathbf{h}_{bc} s_b + \mathbf{w}_{be}^H \mathbf{n}_e \quad (10)$$

其中, $\mathbf{w}_{be} = \mathbf{h}_{be} / \|\mathbf{h}_{be}\|_F$ 是 $N_e \times 1$ 的BF权重向量, $\mathbf{n}_e \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_e \mathbf{I}_{N_e \times 1})$ 代表 $N_e \times 1$ 的AWGN向量。在本文中, 假设 $\|\mathbf{h}_{bc_1}\|_F < \|\mathbf{h}_{bc_2}\|_F$, 因此 $\alpha \in (0.5, 1)$ 。

2.4 问题建模

根据上述说明, 可以获得端到端信号干噪比 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)。

首先, B对 x_1 进行解码, 并将 x_2 视为干扰, 然后可以得到B处 x_1 的SINR的表达式为

$$\gamma_{ab_1}^R = \frac{\alpha \gamma_{ab}}{(1 - \alpha) \gamma_{ab} + 1} \quad (11)$$

其中, $\gamma_{ab} = \bar{\gamma}_{ab} |h_{ab}|^2$, $\bar{\gamma}_{ab} = P_a / \sigma_b^2$ 是A到B链路的平均信噪比。

之后, x_1 被B消除, x_2 被解码, 因此 x_2 在B处的SINR由式(12)给出

$$\gamma_{ab_2}^R = (1 - \alpha) \gamma_{ab} \quad (12)$$

在用户端, C_1 解码其期望信号, 同时将其他信号视为频带内干扰, 然后可以得到 C_1 处 x_1 的SINR的表达式为

$$\gamma_{bc_1}^R = \frac{\alpha \beta \gamma_{bc_1}}{\mu_1 \gamma_{bc_1} + 1} \quad (13)$$

其中, $\mu_1 = (1 - \alpha) \beta + 1 - \beta$, $\gamma_{bc_1} = \bar{\gamma}_{bc_1} \|\mathbf{h}_{bc_1}\|_F^2$, $\bar{\gamma}_{bc_1} = P_b / \sigma_{c_1}^2$ 。

根据NOMA的原理, 在 C_2 处使用连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC), C_2 首先解码 x_1 , 同时 x_2 被视为CCI。因此, x_1 在 C_2 处的SINR可以表示为

$$\gamma_{bc_{1 \rightarrow 2}}^R = \frac{\alpha \beta \gamma_{bc_2}}{\mu_1 \gamma_{bc_2} + 1} \quad (14)$$

其中, $\gamma_{bc_2} = \bar{\gamma}_{bc_2} \|\mathbf{h}_{bc_2}\|_F^2$, $\bar{\gamma}_{bc_2} = P_b / \sigma_{c_2}^2$ 。

然后, C_2 将 x_1 从 y_{bc_2} 中消除, 同时 x_2 被解码, 然后可以得到 C_2 处 x_2 的SINR的表达式为

$$\gamma_{bc_2}^R = \frac{(1 - \alpha) \beta \gamma_{bc_2}}{\mu_2 \gamma_{bc_2} + 1} \quad (15)$$

其中, $\mu_2 = 1 - \beta$ 。

此外, x_b 在D处的SINR由式(16)给出

$$\gamma_{bd}^R = \frac{(1 - \beta) \gamma_{bd}}{\beta \gamma_{bd} + 1} \quad (16)$$

其中, $\gamma_{bd} = \bar{\gamma}_{bd} \|\mathbf{h}_{bd}\|_F^2$, $\bar{\gamma}_{bd} = P_b / \sigma_d^2$ 。

3 性能分析

本节首先介绍了SR衰落和瑞利衰落的统计特性。在此基础上, 推导了主网络和次级网络OP的准确表达式。此外, 还推导了两个网络在高信噪比情况下的渐近OP和DOs, 以更好地分析系统性能。

3.1 信道统计特性

首先, 推导SR衰落和瑞利衰落的概率分布函数 (Probability Distribution Function, PDF) 和累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF)。 g_{ab} 的PDF由式(17)给出^[34]

$$f_{|g_{ab}|^2}(x) = \alpha_{ab} e^{-\beta_{ab} x} {}_1F_1(m_{ab}; 1; \delta_{ab} x) \quad (17)$$

其中, $\alpha_{ab} \triangleq \frac{1}{2b_{ab}} \left(\frac{2b_{ab} m_{ab}}{2b_{ab} m_{ab} + \Omega_{ab}} \right)^{m_{ab}}$, $\beta_{ab} \triangleq \frac{1}{2b_{ab}}$, $\delta_{ab} \triangleq \frac{\Omega_{ab}}{2b_{ab} (2b_{ab} m_{ab} + \Omega_{ab})}$ 。 m_{ab} 表示Nakagami-m参数, 该参数恒大于0, $2b_{ab}$ 是多径分量的平均功率, Ω_{ab} 是视线 (Line-Of-Sight, LOS) 分量的平均功率。

当 m_{ab} 为整数时, 利用[35, Eq.07.20.03.009.01] 和[35, Eq.07.02.03.0014.01], ${}_1F_1(m_{ab}; 1; \delta_{ab} x)$ 表示为

$${}_1F_1(m_{ab}; 1; \delta_{ab} x) = e^{-\delta_{ab} x} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \frac{(-\delta_{ab})^n (1 - m_{ab})_n x^n}{(n!)^2} \quad (18)$$

根据式(17)和式(18), g_{ab} 的PDF可以改写为

$$f_{|g_{ab}|^2}(x) = \alpha_{ab} e^{-(\beta_{ab} + \delta_{ab})x} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \frac{(-\delta_{ab})^n (1 - m_{ab})_n x^n}{(n!)^2} \quad (19)$$

由式(1)和 $\gamma_{ab} = \bar{\gamma}_{ab} |h_{ab}|^2$ 可得 γ_{ab} 的PDF的表达式为

$$f_{\gamma_{ab}}(x) = \alpha_{ab} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \xi(n) x^n e^{-\Delta_{ab} x} \quad (20)$$

其中, $\Delta_{ab} = \frac{\beta_{ab} + \delta_{ab}}{\bar{\gamma}_{ab}}$ 且

$$\xi(n) = \frac{(-\delta_{ab})^n (1 - m_{ab})_n}{(n!)^2 (V_{ab}^2 \bar{\gamma}_{ab})^{n+1}} \quad (21)$$

利用[36, Eq. 3.351.2], 可得 γ_{ab} 的CDF的表达式为

$$F_{\gamma_{ab}}(x) = 1 - \alpha_{ab} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \sum_{t=0}^n \frac{n! \xi(n)}{t! \Delta_{ab}^{n-t+1}} x^t e^{-\Delta_{ab} x} \quad (22)$$

根据文献[32], γ_{be} 的PDF和CDF可分别表示为

$$f_{\gamma_{be}}(x) = \sum_{i=1}^{\rho(A_{be})} \sum_{j=1}^{\delta_i(A_{be})} \Xi_{i,j}(A_{be}) \frac{\lambda_{(i)}^{-j}}{(j-1)!} x^{j-1} e^{-\frac{x}{\lambda_{(i)}}} \quad (23)$$

$$F_{\gamma_{be}}(x) = 1 - \sum_{i=1}^{\rho(A_{be})} \sum_{j=1}^{\delta_i(A_{be})} \sum_{t=0}^{j-1} \frac{\Xi_{i,j}(A_{be})}{t!} \left(\frac{x}{\lambda_{(i)}}\right)^t e^{-\frac{x}{\lambda_{(i)}}} \quad (24)$$

其中, $\{A_i\}_{i=1}^{N_e}$ 为空地链路的平均信噪比, $A_{be} = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_{N_e})$, $\rho(A_{be})$ 表示 A_{be} 上不同对角线元素的数量, $A_{(\rho(A_{be}))} < \dots < A_{(2)} < A_{(1)}$ 为不同对角线元素升序排列, $\delta_i(A_{be})$ 为 $A_{(i)}$ 的多样性, $\Xi_{i,j}(A_{be})$ 为 A_{be} 的第 (i, j) 个特征系数。

3.2 中断概率

OP可以很好地评价系统的性能, 本文将OP定义为任意节点的瞬时容量低于其期望容量的概率。

根据OP的定义, PN的OP可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^p &= 1 - \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{ab1}^R) \geq R_1, \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{ab2}^R) \geq R_2 \right] \\ &\quad \cdot \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{bc1}^R) \geq R_1, \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{bc1 \rightarrow 2}^R) \geq R_1 \right] \\ &\quad \cdot \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{bc2}^R) \geq R_2 \right] \quad (25) \end{aligned}$$

令 $\gamma_1 = 2^{2R_1} - 1$, $\gamma_2 = 2^{2R_2} - 1$, 式(25)可改写为

$$P_{\text{out}}^p = 1 - \Pr (\gamma_{ab1}^R \geq \gamma_1, \gamma_{ab2}^R \geq \gamma_2) \quad (26)$$

$$\Pr (\gamma_{bc1}^R \geq \gamma_1, \gamma_{bc1 \rightarrow 2}^R \geq \gamma_1, \gamma_{bc2}^R \geq \gamma_2) \quad (26)$$

将式(11)—式(15)代入式(26), 可得

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^p &= 1 - [1 - F_{\gamma_{ab}}(\tau_{\max})] [1 - F_{\gamma_{bc1}}(\varphi_1)] \\ &\quad \cdot [1 - F_{\gamma_{bc2}}(\varphi_{\max})] \quad (27) \end{aligned}$$

其中, $\tau_{\max} = \max(\tau_1, \tau_2)$, $\tau_1 = \frac{\gamma_1}{\alpha - \gamma_1(1 - \alpha)}$, $\tau_2 = \frac{\gamma_2}{1 - \alpha}$, $\varphi_{\max} = \max(\varphi_1, \varphi_2)$, $\varphi_1 = \frac{\gamma_1}{\alpha\beta - \mu_1\gamma_1}$, $\varphi_2 = \frac{\gamma_2}{(1 - \alpha)\beta - \mu_2\gamma_2}$ 。

$$P_{\text{out}}^{p \rightarrow \infty} = \begin{cases} \frac{\alpha_{ab}\tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a}, & N_{c1} > 1, N_{c2} > 1 \\ \frac{\alpha_{ab}\tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a} + \frac{1}{N_{c1}!} \left(\frac{\varphi_1}{\bar{\gamma}_b}\right)^{N_{c1}}, & N_{c1} = 1, N_{c2} > 1 \\ \frac{\alpha_{ab}\tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a} + \frac{1}{N_{c2}!} \left(\frac{\varphi_{\max}}{\bar{\gamma}_b}\right)^{N_{c2}}, & N_{c1} > 1, N_{c2} = 1 \\ \frac{\alpha_{ab}\tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a} + \frac{1}{N_{c1}!} \left(\frac{\varphi_1}{\bar{\gamma}_b}\right)^{N_{c1}} + \frac{1}{N_{c2}!} \left(\frac{\varphi_{\max}}{\bar{\gamma}_b}\right)^{N_{c2}}, & N_{c1} = 1, N_{c2} > 1 \end{cases} \quad (33)$$

最后, 将式(22)和式(24)代入式(27), 得到PN的OP的最终表达式为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^p &= 1 - \alpha_{ab} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \sum_{t=0}^n \frac{n! \Xi(n)}{t! \Delta_{ab}^{n-t+1}} \tau_{\max}^t e^{-\Delta_{ab} \tau_{\max}} \\ &\quad \cdot \sum_{i_1=1}^{\rho(A_{bc1})} \sum_{j_1=1}^{\delta_{i_1}(A_{bc1})} \sum_{t_1=0}^{j_1-1} \frac{\Xi_{i_1, j_1}(A_{bc1})}{t_1!} \left(\frac{\varphi_1}{\lambda_{(i_1)}}\right)^{t_1} \\ &\quad \cdot e^{-\frac{\varphi_1}{\lambda_{(i_1)}}} \times \sum_{i_2=1}^{\rho(A_{bc2})} \sum_{j_2=1}^{\delta_{i_2}(A_{bc1})} \sum_{t_2=0}^{j_2-1} \frac{\Xi_{i_2, j_2}(A_{bc1})}{t_2!} \\ &\quad \cdot \left(\frac{\varphi_{\max}}{\lambda_{(i_2)}}\right)^{t_2} e^{-\frac{\varphi_{\max}}{\lambda_{(i_2)}}} \quad (28) \end{aligned}$$

与PN的OP的推导类似, SN的OP可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^s &= 1 - \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{ab1}^R) \geq R_1, \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{ab2}^R) \geq R_2 \right] \\ &\quad \cdot \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_{bd}^R) \geq R_d \right] \\ &= 1 - [1 - F_{\gamma_{ab}}(\tau_{\max})] [1 - F_{\gamma_{bd}}(\varphi_d)] \quad (29) \end{aligned}$$

其中, $\varphi_d = \frac{\gamma_d}{1 - \beta - \beta\gamma_d}$, $\gamma_d = 2^{2R_d} - 1$ 。将式(22)

和式(24)代入式(29), 可以得到

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^s &= 1 - \alpha_{ab} \sum_{n=0}^{m_{ab}-1} \sum_{t=0}^n \frac{n! \xi(n)}{t! \Delta_{ab}^{n-t+1}} \tau_{\max}^t e^{-\Delta_{ab} \tau_{\max}} \\ &\quad \cdot \sum_{i=1}^{\rho(A_{bd})} \sum_{j=1}^{\delta_i(A_{bd})} \sum_{t_1=0}^{j-1} \frac{\Xi_{i,j}(A_{bd})}{t_1!} \left(\frac{\varphi_d}{\lambda_{(i)}}\right)^{t_1} e^{-\frac{\varphi_d}{\lambda_{(i)}}} \quad (30) \end{aligned}$$

3.3 渐进中断概率

为更好地分析系统性能, 本节讨论了高信噪比情况下的渐近OP和DOS。

首先, 在高信噪比条件下, γ_{ab} 和 γ_{be} 的CDF近似表示为

$$F_{\gamma_{ab}}(x) \triangleq \frac{\alpha_{ab}x}{\bar{\gamma}_a} \quad (31)$$

$$F_{\gamma_{be}}(x) \triangleq \frac{1}{N_e!} \left(\frac{x}{\bar{\gamma}_b}\right)^{N_e} \quad (32)$$

将式(31)和式(32)代入式(27), 得到PN的OP的渐近表达式为

由式(33)可知, PN的DO为 $DO_p = \min(1, N_{c_1}, N_{c_2})$.

利用类似于推导PN的渐近OP的方法, 可以得到SN的OP的渐近表达式为

$$P_{\text{out}}^{s \rightarrow \infty} = \begin{cases} \frac{\alpha_{ab} \tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a}, & N_d > 1 \\ \frac{\alpha_{ab} \tau_{\max}}{\bar{\gamma}_a} + \frac{1}{N_{c_1}!} \left(\frac{\varphi_1}{\bar{\gamma}_b} \right)^{N_{c_1}}, & N_d = 1 \end{cases} \quad (34)$$

此外, SN的DO为 $DO_s = \min(1, N_d)$.

4 数值结果

为了证明本文推导的有效性, 本节给出了仿真结果。假设 $\bar{\gamma}_{ab} = \bar{\gamma}_{bc_1} = \bar{\gamma}_{bc_2} = \bar{\gamma}_{bd} = \bar{\gamma}$, $\sigma_{ab}^2 = \sigma_{bc_1}^2 = \sigma_{bc_2}^2 = \sigma_{bd}^2 = \sigma^2$, $N_{c_1} = N_{c_2} = N_d = N$ 。此外, 系统和SR衰落参数($m_{ab}, b_{ab}, \Omega_{ab}$)如表1所示^[29]。

首先, 从仿真结果中, 可以发现蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)模拟结果与理论结果一致, 从而证明了第3节理论分析的有效性。此外, 在高信噪比情况下, 准确OP与渐近OP重合, 这表明本文的渐近分析对的准确性。

图2给出了当 $R_1 = R_2 = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $\alpha = 0.67$,

表1 仿真参数

参数	数值
卫星	GEO
f_{ab}	2 GHz
$(\vartheta_\zeta, \sigma_\zeta^2)$	(-3.125, 1.591)
B	15 MHz
$\theta_{3\text{dB}}$	0.4°
ε_{\max}	48 dB
ℓ_{\max}	4 dB
T	300K
σ^2	1
Frequent Heavy Shadowing (FHS)	(1, 0.063, 0.0007)
Average Shadowing (AS)	(5, 0.251, 0.279)
Infrequent Light Shadowing (ILS)	(10, 0.158, 1.29)

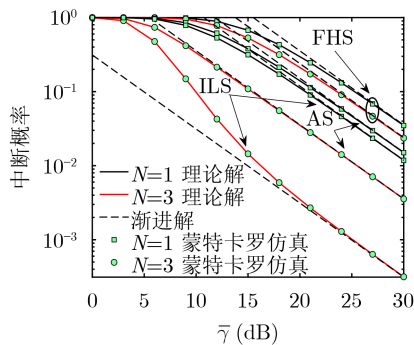


图2 PN的OP与不同天线个数 N 的关系

$\beta = 0.9$ 时, PN的OP随天线个数 N 的变化情况。可以看出, 信道条件越差, 中断性能越差。此外, OP随着天线数量的增加而降低, 这是因为天线越多, 用户的接收能力就越强。此外, 平均信噪比的提高也会导致系统中断性能的提高。

图3反映了当 $\bar{\gamma} = 20 \text{ dB}$, $R_1 = R_2 = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $N = 3$, $\beta = 0.9$ 时, PN的OP随不同功率分配系数 α 的变化情况。值得注意的是, 中断性能随着 α 的增长先增强后降低。这是因为通过调整功率分配系数, OP可以达到最小。

图4显示了当 $\alpha = 0.67$, $N = 3$, $\beta = 0.9$ 时, PN的OP与不同目标速率 R_1 和 R_2 的关系。可以观察到OP随目标速率而明显降低。这是因为系统需求的降低会提供系统的中断性能。

图5描绘了 $R_d = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$, $\beta = 0.9$ 时, 不同天线个数 N 下, SN的OP值。可以发现, 中断性能随着 N 的增加而提高, 这与PN的结果相似。

5 结论

本文考虑了实际传输损耗和多个用户, 建立了一个基于NOMA方案的CISATN, 由一架次级无人机以覆盖式协助卫星与地面用户的通信。为了揭示

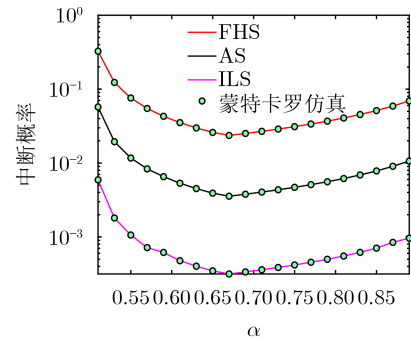


图3 PN的OP与不同功率分配系数 α 的关系

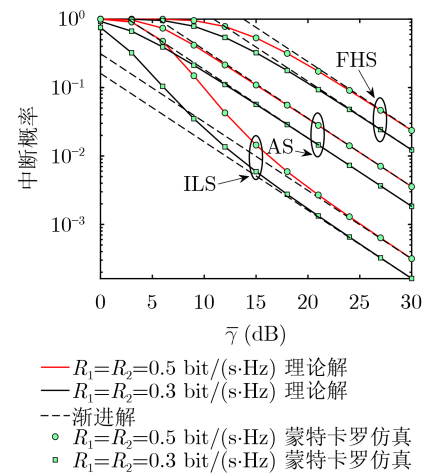
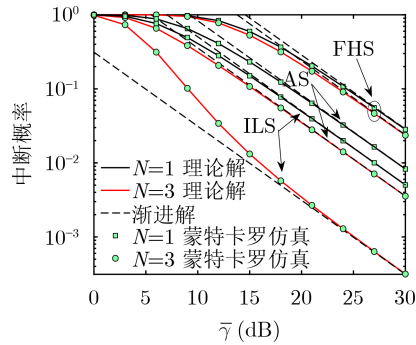


图4 PN的OP与不同的目标速率 R_1 和 R_2 的关系

图 5 SN的OP与不同天线个数 N 的关系

NOMA和CR技术对星空地网络的影响，推导了主网络和次级网络的中断概率的闭式表达式。此外，还推导了渐近中断概率和分集增益，以更好地讨论系统的性能。仿真结果表明，信道条件越好，天线数量越多，系统性能越好。同时，可以通过优化功率分配系数和功率分割系数，使PN的性能更优，并使两个网络的性能达到平衡。这启发研究者可以根据实际需求进行资源分配的优化，从而使网络达到更优的性能，为工程实践提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] GUO Kefeng, LIU Rui, DONG Chao, *et al.* Ergodic capacity of NOMA-based overlay cognitive integrated satellite-UAV-terrestrial networks[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2023, 32(2): 273–282. doi: [10.23919/cje.2021.00.316](https://doi.org/10.23919/cje.2021.00.316).
- [2] LIU Rui, GUO Kefeng, AN Kang, *et al.* Resource allocation for NOMA-enabled cognitive satellite-UAV-terrestrial networks with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*. doi: [10.1109/TCCN.2023.3261311](https://doi.org/10.1109/TCCN.2023.3261311).
- [3] GUO Kefeng, AN Kang, ZHANG Bangning, *et al.* Physical layer security for multiuser satellite communication systems with threshold-based scheduling scheme[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5): 5129–5141. doi: [10.1109/TVT.2020.2979496](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2979496).
- [4] DONG Chao, SHEN Yun, QU Yuben, *et al.* UAVs as an intelligent service: Boosting edge intelligence for air-ground integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(4): 167–175. doi: [10.1109/MNET.011.2000651](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000651).
- [5] CHEN Jiaxin, WU Qihui, XU Yuhua, *et al.* Spectrum allocation for task-driven UAV communication networks exploiting game theory[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(4): 174–181. doi: [10.1109/MWC.001.2000444](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000444).
- [6] LI Xingwang, WANG Qunshu, LIU Yuanwei, *et al.* UAV-aided multi-way NOMA networks with residual hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(9): 1538–1542. doi: [10.1109/LWC.2020.2996782](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2996782).
- [7] WU Qihui, DING Guoru, XU Yuhua, *et al.* Cognitive internet of things: A new paradigm beyond connection[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(2): 129–143. doi: [10.1109/JIOT.2014.2311513](https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2311513).
- [8] CHEN Jiaxin, CHEN Ping, WU Qihui, *et al.* A game-theoretic perspective on resource management for large-scale UAV communication networks[J]. *China Communications*, 2021, 18(1): 70–87. doi: [10.23919/JCC.2021.01.007](https://doi.org/10.23919/JCC.2021.01.007).
- [9] ZHOU Feng, LI Xingwang, ALAZAB Mamoun, *et al.* Secrecy performance for RIS-based integrated satellite vehicle networks with a UAV relay and MRC eavesdropping[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(2): 1676–1685. doi: [10.1109/TIV.2022.3225466](https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3225466).
- [10] LIN Zhi, LIN Min, CHAMPAGNE B, *et al.* Secrecy-energy efficient hybrid beamforming for satellite-terrestrial integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6345–6360. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3088898](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3088898).
- [11] LIN Zhi, LIN Min, ZHU Weiping, *et al.* Robust secure beamforming for wireless powered cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 567–580. doi: [10.1109/TCCN.2020.3016096](https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.3016096).
- [12] GUO Kefeng, AN Kang, ZHANG Bangning, *et al.* On the performance of the uplink satellite multiterrestrial relay networks with hardware impairments and interference[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(3): 2297–2308. doi: [10.1109/JSYST.2019.2901800](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2901800).
- [13] 林志, 林敏, 黄清泉, 等. 能效最大化准则下的星地融合网络的安全波束成形算法[J]. *电子学报*, 2022, 50(1): 124–134. doi: [10.12263/DZXB.20200944](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200944).
LIN Zhi, LIN Min, HUANG Qingquan, *et al.* Secure beamforming algorithm in satellite-terrestrial integrated networks with energy efficiency maximization criterion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 124–134. doi: [10.12263/DZXB.20200944](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200944).
- [14] BANKEY V and UPADHYAY P K. Physical layer security of multiuser multirelay hybrid satellite-terrestrial relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2488–2501. doi: [10.1109/TVT.2019.2893366](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2893366).
- [15] GUO Kefeng, LIN Min, ZHANG Bangning, *et al.* On the performance of LMS communication with hardware impairments and interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(2): 1490–1505. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2878848](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2878848).
- [16] HUANG Qingquan, LIN Min, ZHU Weiping, *et al.* Performance analysis of integrated satellite-terrestrial multiantenna relay networks with multiuser scheduling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(4): 2718–2731. doi: [10.1109/TAES.2019.2952698](https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2952698).
- [17] XIAO Zhenyu, ZHU Lipeng, and XIA Xianggen. UAV

- communications with millimeter-wave beamforming: Potentials, scenarios, and challenges[J]. *China Communications*, 2020, 17(9): 147–166. doi: [10.23919/JCC.2020.09.012](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.09.012).
- [18] HUANG Qingquan, LIN Min, WANG Junbo, *et al.* Energy efficient beamforming schemes for satellite-aerial-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3863–3875. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2978044](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2978044).
- [19] LIN Zhi, LIN Min, DE COLA T, *et al.* Supporting IoT with rate-splitting multiple access in satellite and aerial-integrated networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(14): 11123–11134. doi: [10.1109/JIOT.2021.3051603](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051603).
- [20] ZHANG Xiaokai, ZHANG Bangning, AN Kang, *et al.* Stochastic geometry-based analysis of cache-enabled hybrid satellite-aerial-terrestrial networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1272–1287. doi: [10.1109/TWC.2021.3103499](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3103499).
- [21] HUANG Qingquan, LIN Min, ZHU Weiping, *et al.* Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2413–2426. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3049364](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3049364).
- [22] RUAN Yuhan, LI Yongzhao, WANG Chen-Xiang, *et al.* Energy efficient adaptive transmissions in integrated satellite-terrestrial networks with SER constraints[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(1): 210–222. doi: [10.1109/TWC.2017.2764472](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2764472).
- [23] RUAN Yuhan, LI Yongzhao, WANG Chengxiang, *et al.* Power allocation in cognitive satellite-vehicular networks from energy-spectral efficiency tradeoff perspective[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(2): 318–329. doi: [10.1109/TCCN.2019.2905199](https://doi.org/10.1109/TCCN.2019.2905199).
- [24] AN Kang, OUYANG Jian, LIN Min, *et al.* Outage analysis of multi-antenna cognitive hybrid satellite-terrestrial relay networks with beamforming[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(7): 1157–1160. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2428256](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2428256).
- [25] SHARMA P K, UPADHYAY P K, DA COSTA D B, *et al.* Performance analysis of overlay spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial systems with secondary network selection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(10): 6586–6601. doi: [10.1109/TWC.2017.2725950](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2725950).
- [26] LIN Min, LIN Zhi, ZHU Weiping, *et al.* Joint beamforming for secure communication in cognitive satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(5): 1017–1029. doi: [10.1109/JSAC.2018.2832819](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2832819).
- [27] SHUAI Haifeng, GUO Kefeng, AN Kang, *et al.* Joint impacts of non-ideal system limitations on the performance of NOMA-based SatCom networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 4091–4096. doi: [10.1109/TVT.2022.3221071](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3221071).
- [28] JIA Min, GAO Qiling, GUO Qing, *et al.* Power multiplexing NOMA and bandwidth compression for satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 11107–11117. doi: [10.1109/TVT.2019.2944077](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2944077).
- [29] LIN Zhi, LIN Min, WANG Junbo, *et al.* Joint beamforming and power allocation for satellite-terrestrial integrated networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(3): 657–670. doi: [10.1109/JSTSP.2019.2899731](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2899731).
- [30] YAN Xiaojuan, XIAO Hailin, AN Kang, *et al.* Ergodic capacity of NOMA-based uplink satellite networks with randomly deployed users[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 3343–3350. doi: [10.1109/JSYST.2019.2934358](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2934358).
- [31] GUO Kefeng, AN Kang, ZHOU Feng, *et al.* On the secrecy performance of NOMA-based integrated satellite multiple-terrestrial relay networks with hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(4): 3661–3676. doi: [10.1109/TVT.2021.3068062](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3068062).
- [32] LIU Rui, GUO Kefeng, AN Kang, *et al.* NOMA-based integrated satellite-terrestrial relay networks under spectrum sharing environment[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(6): 1266–1270. doi: [10.1109/LWC.2021.3063759](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3063759).
- [33] LIU Rui, GUO Kefeng, AN Kang, *et al.* NOMA-based overlay cognitive integrated satellite-terrestrial relay networks with secondary network selection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(2): 2187–2192. doi: [10.1109/TVT.2021.3122029](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3122029).
- [34] MIRIDAKIS N I, VERGADOS D D, and MICHALAS A. Dual-hop communication over a satellite relay and Shadowed Rician channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(9): 4031–4040. doi: [10.1109/TVT.2014.2361832](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2361832).
- [35] The mathematical functions site[EB/OL]. <http://functions.wolfram.com>, 2023.
- [36] JEFFREY A and ZWILLINGER D. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. doi: [10.1016/C2009-0-22516-5](https://doi.org/10.1016/C2009-0-22516-5).
- 刘 瑞: 男, 博士生, 研究方向为航天通信及非正交多址接入技术等。
郭克锋: 男, 讲师, 研究方向为卫星通信、非正交多址接入技术和物理层安全等。
朱诗兵: 男, 教授, 研究方向为航天通信、自组网及网络安全等。
李长青: 男, 副教授, 研究方向为航天通信及无线通信优化等。
李可盈: 女, 博士生, 研究方向为航天通信及物理层安全等。