

卫星网络和地面网络频谱共存下的鲁棒安全传输设计

季铭仪¹, 王子宁¹, 肖圣杰², 刘笑宇¹, 程铭¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 中兴通讯南京将军山研发中心, 江苏 南京 210012)

摘要: 面向卫星和地面网络有机结合的星地融合网络 (STIN, satellite-terrestrial integrated network), 提出了一种基于窃听者非完美信道状态信息的鲁棒安全波束成形 (BF, beamforming) 算法, 以提升系统的安全性能。首先, 在卫星和基站采用波束成形技术服务地球站 (ES, Earth station) 和地面用户, 且在它们之间共享频谱资源的情况下, 建立以地球站可达安全速率门限最大化为目标函数, 用户服务质量 (QoS, quality of service)、地球站安全中断概率和系统发射功率满足需求为约束的联合优化问题。然后, 为求解该复杂问题, 采用迫零准则降低问题复杂度, 进一步提出一种利用伯恩斯坦不等式和 Dinkelbach 的迭代算法, 以实现星地融合网络的安全可靠传输。最后, 通过计算机仿真验证了本文所提算法能以较快的收敛速度获得较好的性能, 可以在安全性能与复杂度之间获得较好的折中。

关键词: 星地融合网络; 波束成形; 物理层安全; 非完美信道状态信息

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00385

Robust secure transmission design for spectral coexistence in satellite and terrestrial network

Ji Mingyi¹, Wang Zining¹, Xiao Shengjie², Liu Xiaoyu¹, Cheng Ming¹

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing 210003, China

2. ZTE Nanjing Jiangjunshan R&D Center, Nanjing 210012, China

Abstract: A robust secure beamforming (BF) algorithm based on imperfect channel state information of eavesdroppers was proposed to improve the secrecy performance for satellite-terrestrial integrated network (STIN), in which satellite network organically coexisted with the terrestrial network. Firstly, for the scenario in which satellite and terrestrial networks shared the spectral resources and adopted BF to serve Earth stations (ESs) and terrestrial users, respectively, a joint optimization problem was formulated to maximize the achievable secrecy rate threshold of the ES, whereas satisfying the quality of service (QoS) requirements, the secrecy outage probability and the transmit power budgets. To tackle this mathematically intractable problem, the zero-forcing criterion was employed to reduce complexity, and then an iterative algorithm based on the Bernstein inequality and the Dinkelbach method was proposed to obtain satisfactory solutions. Finally, computer simulation results confirm that the proposed algorithm achieves superior performance with a fast convergence rate, and can strike a favorable balance between secrecy performance and computational complexity.

Key words: STIN, beamforming, physical layer security, imperfect channel state information

0 引言

随着移动互联网的迅速崛起, 5G 已经进入商

业化阶段。虽然以地面通信网络为基础的通信系统可以给高密度人口区域的用户提供高品质的传输服务, 但地面通信网络的架构较为固定, 在一定程度

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2024-01-02

通信作者: 王子宁, 2021010201@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62471255)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 62471255)

上限制了覆盖范围和灵活性。例如，在面对自然灾害或人口稀疏地区的通信需求时，地面通信网络无法提供稳定且可靠的通信服务^[1-2]。相对而言，卫星通信网络具有通信质量稳定、传输距离远、安全性高等优点，在下一代移动通信系统中呈现广泛的应用前景^[3-5]。为了充分利用地面无线系统高速率、通信容量大和卫星通信系统远距离传输的优势，星地融合网络（STIN, satellite terrestrial integrated network）得到了广泛的研究^[6-8]。

相比传统的地面蜂窝网络，为了提高频谱利用率，STIN采用全频率复用技术，然而这种技术通常伴随着更为严苛的要求，如更高的信噪比和更大的干扰抑制能力。因此，如何从多维度出发，在STIN中探究实现高效鲁棒的安全传输，成为当前亟待解决的问题^[9-12]。传统的无线通信一般依赖于安全密钥来实现上层加密，通过破解密码的巨大计算量以保证传输的安全性。然而，随着云计算、量子计算等新兴技术的迅速发展和广泛应用，这种以计算复杂度为基础的安全机制已难以满足未来通信系统的安全性需求。近年来，波束成形（BF, beamforming）技术在学术界引起了广泛关注^[13-15]。该技术可以在有效减少对非期望用户干扰功率的同时提高期望用户的信号质量，进而在物理层实现信息传输的安全性。文献[16-17]通过对BF权矢量的优化来抑制网络间干扰，以减轻卫星和地面网络共存对系统的影响。文献[18]探究了STIN中的卫星通信安全问题，在已知单个窃听器完美信道状态信息（CSI, channel state information）的场景下，提出了一种联合优化卫星和基站的BF权矢量的策略来提升卫星用户的安全性。文献[19]研究了在基于软件定义架构的认知卫星地面网络的安全传输问题，在抑制窃听器完美CSI的情况下，最大化卫星网络的安全速率。文献[20]在窃听器CSI未知的情况下，使用人工噪声技术来提高卫星通信的安全性。但在实际情况中，通常难以获得的窃听器完美的CSI，因此，文献[18-19]的条件过于理想，而文献[18]考虑窃听器CSI完全未知的情况，通过利用人工噪声技术来对窃听器进行抑制，这样虽然能够保证信息的安全传输，但需要增加额外的发射功率，从而导致了资源的浪费。

受到上述文献的启发，本文研究了一个更具普适性的多窃听场景，在存在多个窃听器，且仅已知非完美CSI的情况下，提出了一种鲁棒安全BF算

法，以提高系统的安全性能。首先，在卫星和基站均采用BF技术服务地球站和地面用户的条件下，建立以地球站可达安全速率门限最大化为目标，地球站发射功率、用户服务质量和地球站安全中断概率满足需求为约束条件的优化问题。为了求解该复杂问题，使用迫零（ZF, zero forcing）准则设计基站BF权矢量，在保证系统性能的同时，降低问题复杂度。然后，进一步提出利用伯恩斯坦不等式和Dinkelbach的迭代算法，以实现STIN的安全可靠传输。最后，计算机仿真发现所提算法能够以较快的收敛速度实现优秀的性能，并在安全性和复杂性之间获得较好的折中。与文献[18]相比，本文假设仅能获取窃听者的非完美CSI，并进一步考虑无线通信系统允许一定概率中断这一特点，建立了基于概率约束的鲁棒优化问题，更具普适性。

1 系统模型

STIN下行通信系统模型如图1所示，在该场景中，卫星网络由一颗地球静止轨道卫星和一个地球站组成，地面网络由一个基站和一个地面用户组成。在共享频谱资源的情况下，卫星和基站分别采用BF技术服务各自用户，同时，在卫星通信覆盖范围内存在 K 个非协作窃听器企图窃听卫星的私密信号。假设卫星天线为具有 M 个馈源的单反射面天线，基站采用 N 个阵元的均匀线阵。同时，地球站和窃听器均配备了高增益的抛物面天线，地面用户

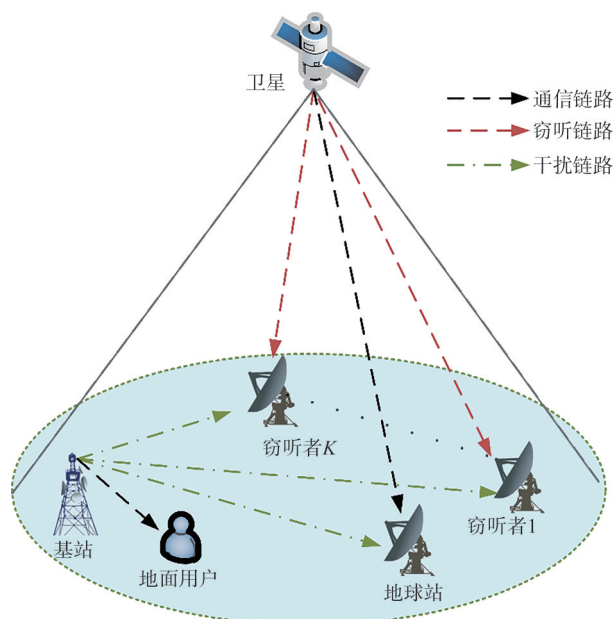


图1 STIN下行通信系统模型

配备单天线。接下来, 将介绍具体的信道和信号模型。

综合考虑雨衰、路径损耗和波束增益影响, 将卫星与用户间的下行信道描述为^[21]

$$\mathbf{h} = \sqrt{G_{s,t}G_{s,r}C_s} \odot \mathbf{b}^{\frac{1}{2}} \odot \mathbf{g}^{\frac{1}{2}} \odot \tilde{\mathbf{h}} \quad (1)$$

其中, $G_{s,t}$ 为卫星发射增益, \odot 为哈达玛积, 参考国际电信联盟 (ITU, International Telecommunication Union) 的建议, 地球站的抛物面天线增益 $G_{s,r}$ 表达式为^[22]

$$G_{s,r}[\text{dB}] = \begin{cases} G_{s,r,\max}, & 0^\circ < \theta_s < 1^\circ \\ 32 - 25 \text{ lb } \theta_s, & 1^\circ < \theta_s < 48^\circ \\ -10, & 48^\circ < \theta_s < 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中, $G_{s,r,\max}$ 为抛物面天线轴向的最大增益, θ_s 为地球站相对于卫星的离轴角。式(1)中, 可以将卫星与用户之间的路损 C_s 定义为^[23-24]

$$C_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi\sqrt{d_s^2 + d_h^2}} \right)^2 \quad (3)$$

其中, λ 为载波波长, d_h 为卫星高度, d_s 为地球站到卫星覆盖区域中心的距离。式(1)中, $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示雨衰系数矢量, μ_g 、 σ_g 与卫星的通信频率、极化方式和卫星用户的位置有关, $\mathbf{b} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为点波束增益, 其元素可以表示为

$$b_m = b_{\max} \left(\frac{J_1(u_m)}{2u_m} + 36 \frac{J_3(u_m)}{u_m^3} \right)^2 \quad (4)$$

其中, $u_m = 2.071\,23 \sin\phi_m / \sin\phi_{3\text{dB}}$, ϕ_m 表示用户相对于波束 m 的偏轴角, $\phi_{3\text{dB}}$ 为单侧半功率波束宽度。此外, 式(1)中, $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_M]^T$ 由地球站到达不同卫星馈源的相位差组成, 其元素为 $\tilde{h}_m = e^{-j2\pi d_m/\lambda}$, d_m 表示地球站到第 m 个卫星馈源的距离。

针对地面网络, 假设基站和用户之间存在视距传输, 基站配置均匀线阵, 考虑大尺度衰落的影响, 基站的下行链路信道矢量可表示为^[25]

$$\mathbf{f} = \sqrt{G_r C_r} \mathbf{a}(\theta) \quad (5)$$

其中, G_r 为用户的接收增益, 可以将式(5)中的基站与用户间的路损 C_r 表示为

$$C_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6)$$

其中, d 表示用户与基站之间的距离。此外, 式(5)中, $\mathbf{a}(\theta) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为信道导向矢量, 表示为

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{j\frac{2\pi d_{BS}}{\lambda} \sin\theta}, \dots, e^{j\frac{2\pi d_{BS}}{\lambda} (N-1) \sin\theta} \right] \quad (7)$$

其中, d_{BS} 为相邻阵元间距, θ 表示从基站到用户的发射角。

在本文所研究的 STIN 中, 假设卫星和基站的用户信号分别表示为 $s(t)$ 和 $x(t)$, 且满足 $E[|s(t)|^2] = 1$ 和 $E[|x(t)|^2] = 1$ 。考虑卫星和基站均采用 BF 技术对信号进行处理, 其 BF 权矢量可分别表示为 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, 则卫星和基站的发送信号可分别表示 $\mathbf{w}s(t)$ 和 $\mathbf{v}x(t)$ 。经过无线信道传播后, 地球站的接收信号为

$$y_s(t) = \mathbf{h}_s^H \mathbf{w}s(t) + \mathbf{f}_s^H \mathbf{v}x(t) + n_s(t) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{h}_s^H \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为卫星与地球站之间的信道矢量, $\mathbf{f}_s^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为基站与地球站之间的信道矢量, $n_s(t)$ 为地球站的零均值加性高斯白噪声。与地球站类似, 第 k 个窃听器接收到的信号为

$$y_{e,k}(t) = \mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{w}s(t) + \mathbf{f}_{e,k}^H \mathbf{v}x(t) + n_{e,k}(t) \quad (9)$$

其中, $\mathbf{h}_{e,k}^H$ 为卫星到窃听者的信道矢量, $\mathbf{f}_{e,k}^H$ 为基站到第 k 个窃听者的信道矢量, $n_{e,k}(t)$ 为第 k 个窃听者的零均值加性高斯白噪声。

在实际情况下, 为了减少由长距离传输导致的路径损耗, 卫星到地球站通常会采用高增益天线, 然而对于地面移动终端, 通常会选择增益较小的全向天线。所以, 忽略卫星信号对地面用户的干扰, 此时地面用户的接收信号为

$$y_b(t) = \mathbf{f}_b^H \mathbf{v}x(t) + n_b(t) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{f}_b \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为基站与地面用户之间的信道矢量, $n_b(t)$ 为地面用户的零均值加性高斯白噪声。

地球站、地面用户的可达速率和地球站的可达安全速率可以分别表示为^[26]

$$R_s = \text{lb}(1 + \gamma_s) = \text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_s^H \mathbf{w}|^2}{\sigma_s^2 + |\mathbf{f}_s^H \mathbf{v}|^2} \right) \quad (11)$$

$$R_b = \text{lb}(1 + \gamma_b) = \text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{f}_b^H \mathbf{v}|^2}{\sigma_b^2} \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_s &= \left[\text{lb}(1 + \gamma_s) - \max_{i \in \{1, \dots, k\}} \text{lb}(1 + \gamma_{e,i}) \right]^+ = \\ &= \left[\text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_s^H \mathbf{w}|^2}{\sigma_s^2 + |\mathbf{f}_s^H \mathbf{v}|^2} \right) - \right. \\ &\quad \left. \max_{i \in \{1, \dots, k\}} \text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{w}|^2}{\sigma_{e,k}^2 + |\mathbf{f}_{e,k}^H \mathbf{v}|^2} \right) \right]^+ \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$, γ_s , $\gamma_{e,k}$ 和 γ_b 为地球站、第 k 个窃听者和地面用户的输出信干噪比, σ_s^2 、 $\sigma_{e,k}^2$ 和 σ_b^2 为式中相应的噪声功率。

考虑到窃听者是系统内的非授权用户, 因此融合网络无法获得完美的 CSI, 所以本文假设 $\mathbf{h}_{e,k}$ 和 $\mathbf{f}_{e,k}$ 信道矢量由估计信道和估计误差这两部分组成, 可建模为^[27]

$$\mathbf{h}_{e,k} = \hat{\mathbf{h}}_{e,k} + \Delta\mathbf{h}_{e,k}, k = 1, \dots, K \quad (14)$$

$$\mathbf{f}_{e,k} = \hat{\mathbf{f}}_{e,k} + \Delta\mathbf{f}_{e,k}, k = 1, \dots, K \quad (15)$$

其中, $\hat{\mathbf{h}}_{e,k}$ 、 $\hat{\mathbf{f}}_{e,k}$ 和 $\Delta\mathbf{h}_{e,k}$ 、 $\Delta\mathbf{f}_{e,k}$ 分别表示估计信道和信道估计误差部分, 且 $\Delta\mathbf{h}_{e,k} \sim \text{CN}(0, \mathbf{E}_{h,k})$, $\Delta\mathbf{f}_{e,k} \sim \text{CN}(0, \mathbf{E}_{f,k})$, 误差矩阵 $\mathbf{E}_i = \varepsilon_i \mathbf{I}$, $i \in \{(h,k), (f,k)\}$, 其中, ε_i 表示信道估计误差因子。

以上内容对本文探讨的 STIN 系统模型及其相关信道模型进行了详细阐述, 并给出了相应的数学表达式。正如前文所提及, 卫星通信具有被窃听的潜在风险。为了确保系统的安全性, 本文提出了一种以最大化卫星网络可达安全速率门限为准则的鲁棒安全传输方案。

2 基于可达安全速率门限最大化准则的鲁棒安全波束成形算法

本节以地球站可达安全速率门限最大化为优化目标, 考虑卫星通信安全中断概率, 用户服务质量 (QoS, quality of service) 和发射功率满足需求为约束条件, 通过联合优化卫星和基站 BF 权矢量, 实现 STIN 中信息的安全传输。上述优化问题, 在数学上可以表示为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\mathbf{w}, \mathbf{v}, R} R \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \Pr\left\{\text{lb}(1 + \gamma_s) - \text{lb}(1 + \gamma_{e,k}) \geq R\right\} \geq 1 - p_{k,\text{out}}, \forall k \\ & \text{C2: } \text{lb}(1 + \gamma_s) \geq R_{s,\text{th}} \\ & \text{C3: } \text{lb}(1 + \gamma_b) \geq R_{b,\text{th}} \\ & \text{C4: } \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{s,\text{th}} \\ & \text{C5: } \|\mathbf{v}\|^2 \leq P_{b,\text{th}} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, R 表示地球站的可达安全速率门限, $p_{k,\text{out}}$ 表示系统安全性要求无法满足的概率, $R_{s,\text{th}}$ 和 $R_{b,\text{th}}$ 分别表示地球站和地面用户所需求的信息可达速率门限, $P_{s,\text{th}}$ 和 $P_{b,\text{th}}$ 分别表示卫星和基站的最大发

射功率。

显然, 问题 P1 为非凸优化问题, 且由于变量耦合, 该问题难以直接求解。针对此问题, 本文假设基站仅考虑其信号对地球站的影响, 基站采用 ZF 准则获得归一化 BF 权矢量, 同时从优化问题 P1 的结构可以发现, 基站采用满功率发射时, 问题得到最优解。故基站的发射 BF 权矢量可表示为^[28]

$$\mathbf{v}_{\text{ZF}} = \frac{P_{b,\text{th}} \left(\mathbf{I}_N - \mathbf{f}_s (\mathbf{f}_s^H \mathbf{f}_s)^{-1} \mathbf{f}_s^H \right) \mathbf{f}_b}{\left\| \left(\mathbf{I}_N - \mathbf{f}_s (\mathbf{f}_s^H \mathbf{f}_s)^{-1} \mathbf{f}_s^H \right) \mathbf{f}_b \right\|} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{I}_N \in \mathbf{Z}^{N \times N}$ 为单位矩阵。由于基站针对地球站的信道矢量 \mathbf{f}_s 采用 ZF 准则, 获得了发送 BF 权矢量 \mathbf{v}_{ZF} 。根据 ZF 原理, 可以消除 γ_s 中的干扰项 $|\mathbf{f}_s^H \mathbf{v}|^2$ 。与此同时, 基于给定的基站发送 BF 权矢量 \mathbf{v}_{ZF} , 将优化问题 P1 中的仅与其有关的约束去除, 并引入辅助变量 a 和 b , 则问题 P1 可以重构为

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\mathbf{w}, a, b} \text{lb}(1 + a) - \text{lb}(1 + b) \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \Pr\left\{\frac{\|\mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{w}\|^2}{\sigma_{e,k}^2 + \|\mathbf{f}_{e,k}^H \mathbf{v}_{\text{ZF}}\|^2} \leq b\right\} \geq 1 - p_{k,\text{out}}, \forall k \\ & \text{C2: } \frac{\|\mathbf{h}_s^H \mathbf{w}\|^2}{\sigma_s^2} \geq a \\ & \text{C3: } a \geq 2^{R_{s,\text{th}}} - 1 \\ & \text{C4: } \frac{\|\mathbf{f}_s^H \mathbf{v}\|^2}{\sigma_b^2} \geq 2^{R_{b,\text{th}}} - 1 \\ & \text{C5: } \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_{s,\text{th}} \end{aligned} \quad (18)$$

上述优化问题 P2 仍存在变量耦合问题, 采用半正定规划方法进行问题转换, 获得优化问题 P3。

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \max_{\mathbf{w}, a, b} \frac{1 + a}{1 + b} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \Pr\left\{\mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{e,k} \leq b \left(\sigma_{e,k}^2 + \mathbf{f}_{e,k}^H \mathbf{V}_{\text{ZF}} \mathbf{f}_{e,k} \right)\right\} \geq 1 - p_{k,\text{out}}, \forall k \\ & \text{C2: } \mathbf{h}_s^H \mathbf{W} \mathbf{h}_s \geq a \cdot \sigma_s^2 \\ & \text{C3: } a \geq 2^{R_{s,\text{th}}} - 1 \\ & \text{C4: } \mathbf{f}_s^H \mathbf{V} \mathbf{f}_s \geq \left(2^{R_{b,\text{th}}} - 1 \right) \sigma_b^2 \\ & \text{C5: } \text{Tr}(\mathbf{W}) \leq P_{s,\text{th}} \\ & \text{C6: } \text{rank}(\mathbf{W}) = 1 \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{W} = \mathbf{w}\mathbf{w}^H$, $\mathbf{V}_{ZF} = \mathbf{v}_{ZF}\mathbf{v}_{ZF}^H$ 。此外, 由于窃听者相关信道矢量存在估计误差的原因, C1 的概率约束形式难以求解, 下面采用伯恩斯坦不等式 I 型将其转换为确定形式。

引理 1 伯恩斯坦不等式 I 型: 规定 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{N \times N}$ 为复数 Hermitian 矩阵, $\mathbf{a} \in \mathbf{C}^{N \times 1}$, $\mathbf{x} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I})$, 则对于任意 $\sigma \geq 0$, 存在^[29]

$$\Pr \left[\mathbf{x}^H \mathbf{A} \mathbf{x} + 2\text{Re}(\mathbf{x}^H \mathbf{a}) \geq \text{Tr}(\mathbf{A}) + \sqrt{2\sigma} \cdot \sqrt{\left\| \text{vec}(\mathbf{A}) \right\| + 2\left\| \mathbf{a} \right\|^2 + \sigma s^+(\mathbf{A})} \right] \leq e^{-\sigma} \quad (20)$$

其中, $s^+(\mathbf{A}) = \max\{\lambda_{\max}(\mathbf{A}), 0\}$ 。对于概率约束 C1, 首先将 $\mathbf{h}_{e,k} = \hat{\mathbf{h}}_{e,k} + \Delta\mathbf{h}_{e,k}$ 和 $\mathbf{f}_{e,k} = \hat{\mathbf{f}}_{e,k} + \Delta\mathbf{f}_{e,k}$ 代入 C1 内部并进行整理, 可获得

$$\begin{aligned} & \left(\hat{\mathbf{h}}_{e,k}^H + \Delta\mathbf{h}_{e,k}^H \right) \mathbf{W} \left(\hat{\mathbf{h}}_{e,k} + \Delta\mathbf{h}_{e,k} \right) - \\ & \left(\hat{\mathbf{f}}_{e,k}^H + \Delta\mathbf{f}_{e,k}^H \right) \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \left(\hat{\mathbf{f}}_{e,k} + \Delta\mathbf{f}_{e,k} \right) \leq b \cdot \sigma_{e,k}^2 \Rightarrow \\ & \Delta\mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{W} \Delta\mathbf{h}_{e,k} + 2\text{Re} \left(\Delta\mathbf{h}_{e,k}^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_{e,k} \right) - \\ & \Delta\mathbf{f}_{e,k}^H \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \Delta\mathbf{f}_{e,k} - 2\text{Re} \left(\Delta\mathbf{f}_{e,k} \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \hat{\mathbf{f}}_{e,k} \right) \leq \\ & b \cdot \sigma_{e,k}^2 - \hat{\mathbf{h}}_{e,k}^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_{e,k} + \hat{\mathbf{f}}_{e,k}^H \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \hat{\mathbf{f}}_{e,k} \end{aligned} \quad (21)$$

为使表达式更简洁, 令 $c_k = b \cdot \sigma_{e,k}^2 - \hat{\mathbf{h}}_{e,k}^H \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_{e,k} + \hat{\mathbf{f}}_{e,k}^H \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \hat{\mathbf{f}}_{e,k}$, $\Delta\mathbf{h}_{e,k} = \mathbf{E}_{h,k}^{1/2} \mathbf{x}_{h,k}$, 其中, $\mathbf{x}_{h,k} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_M)$, $\Delta\mathbf{f}_{e,k} = \mathbf{E}_{f,k}^{1/2} \mathbf{x}_{f,k}$, $\mathbf{x}_{f,k} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_N)$, $\mathbf{A}_k = \mathbf{E}_{h,k}^{1/2} \mathbf{W} \mathbf{E}_{h,k}^{1/2}$, $\mathbf{a}_k = \mathbf{E}_{h,k}^{1/2} \mathbf{W} \hat{\mathbf{h}}_{e,k}$, $\mathbf{B}_k = \mathbf{E}_{f,k}^{1/2} \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \mathbf{E}_{f,k}^{1/2}$, $\mathbf{b}_k = \mathbf{E}_{f,k}^{1/2} \left(b \cdot \mathbf{V}_{ZF} \right) \hat{\mathbf{f}}_{e,k}$, C1 约束可等价表示为

$$\Pr \left\{ \mathbf{x}_{h,k}^H \mathbf{A}_k \mathbf{x}_{h,k} - \mathbf{x}_{f,k}^H \mathbf{B}_k \mathbf{x}_{f,k} + 2\text{Re} \left(\mathbf{x}_{h,k}^H \mathbf{a}_k \right) - 2\text{Re} \left(\mathbf{x}_{f,k}^H \mathbf{b}_k \right) \leq c_k \right\} \geq 1 - p_{k,\text{out}} \quad (22)$$

为了将式(20)转换为伯恩斯坦不等式可处理的形式, 令 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_{h,k}; \mathbf{x}_{f,k}]$, $\mathbf{m}_k = [\mathbf{a}_k; -\mathbf{b}_k]$, $\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & -\mathbf{B}_k \end{bmatrix}$, 则可等价表示为

$$\Pr \left\{ \mathbf{x}_k^H \mathbf{M}_k \mathbf{x}_k + 2\text{Re}(\mathbf{x}_k^H \mathbf{m}_k) \geq c_k \right\} \leq p_{k,\text{out}} \quad (23)$$

利用引理 1 转换式(21)可得

$$\text{Tr}(\mathbf{M}_k) + \sqrt{-2\ln(p_{k,\text{out}})} \cdot \sqrt{\left\| \text{vec}(\mathbf{M}_k) \right\| + 2\left\| \mathbf{m}_k \right\|^2} - \ln(p_{k,\text{out}}) s^+(\mathbf{M}_k) \leq c_k, \forall k \quad (24)$$

显然, 当式(22)成立时, 式(21)也成立。为方便求解, 引入辅助变量 λ_k 和 μ_k , 同时基于半正定松弛方法的思路^[30], 忽略约束 C5, 则优化问题 P3 可

转换为优化问题 P4。

$$\begin{aligned} \text{P4: } & \max_{\mathbf{w}, a, b, \lambda_k, \mu_k} \frac{1+a}{1+b} \\ \text{s.t. } & \text{C1.1: } \text{Tr}(\mathbf{M}_k) + \sqrt{-2\ln(p_{k,\text{out}})} \lambda_k - \\ & \ln(p_{k,\text{out}}) \mu_k \leq c_k, \forall k \\ & \text{C1.2: } \left\| \frac{\text{vec}(\mathbf{M}_k)}{\sqrt{2} \mathbf{m}_k} \right\| \leq \lambda_k \\ & \text{C1.3: } \mu_k \mathbf{I} - \mathbf{M}_k \geq 0 \\ & \text{C1.4: } \mu_k \geq 0 \\ & \text{C2, C3, C4, C5} \end{aligned} \quad (25)$$

由于优化问题 P4 的目标函数为分式形式, 难以直接求解。对于这一难点, 本文采用 Dinkelbach 算法对目标函数进行转换, 构造新的目标函数^[31]为

$$F(t) = \max_{\mathbf{w}, a, b, \lambda_k, \mu_k} \{1 + a - t(1 + b)\} \quad (26)$$

由式(24)可知, 函数为关于变量 t 的连续单调递减凸函数, 所以存在唯一的根。假设 t 为原优化目标函数的最优解, 则必然存在

$$\max_{\mathbf{w}, a, b, \lambda_k, \mu_k} \frac{1+a}{1+b} = t \Leftrightarrow F(t) = 0 \quad (27)$$

因此, 原优化问题被转换为求解 $F(t)$ 的根的问题, 该问题可通过迭代搜索的方式寻找到满足指定精度的解。综上所述, 优化问题 P5 可表示为

$$\begin{aligned} \text{P5: } & \max_{\mathbf{w}, a, b, \lambda_k, \mu_k} 1 + a - t^{(k)}(1 + b) \\ \text{s.t. } & \text{C1.1, C1.2, C1.3, C1.4} \\ & \text{C2, C3, C4} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $t^{(k)}$ 为第 k 次迭代时 t 的取值。优化问题 P5 为一个标准的线性规划问题, 可直接使用凸优化软件工具进行求解。但由于忽略了约束 C5, 其结果存在两种情况: 情况 1, 求解结果满足 $\text{rank}(\mathbf{W}) = 1$, 则可分解 \mathbf{W} 获得原问题的最优解; 情况 2, 求解结果满足 $\text{rank}(\mathbf{W}) \neq 1$, 则可以取 \mathbf{W} 的最大特征值对应的特征向量作为最终结果, 该方法获得的是原问题次优解。为了进一步提高系统性能, 本文采用随机化方法对情况 2 的解进行处理, 使其能够逼近原问题的最优解。鲁棒安全波束成形算法如算法 1 所示。

算法 1 鲁棒安全波束成形算法

步骤 1 初始化计算精度 $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-5}$ 、迭代次数 $k = 1$ 、迭代变量 $t^{(k-1)} = 1$;

步骤 2 将 $t^{(k-1)}$ 代入优化问题 P5 后进行求解获

得 $a^{(k)}$, $b^{(k)}$, W ;

步骤3 更新迭代变量 $t^{(k)} = (1 + a^{(k)}) / (1 + b^{(k)})$;

步骤4 若满足收敛条件 $|t^{(k)} - t^{(k-1)}| \leq \varepsilon$, 迭代结束, 输出 W ; 否则, 更新迭代次数 $k = k + 1$ 并返回步骤2;

步骤5 若 $\text{rank}(W) = 1$, 直接进行特征值分解获得卫星BF权矢量 w^* 并输出, 流程结束; 否则, 进入随机化算法流程;

步骤5.1 对 W 进行特征值分解 $W = U\Sigma U^H$, 得到 $w_n = U\Sigma^{1/2}e_n$, 其中 e_n 为独立随机变量组成的向量;

步骤5.2 随机生成大量 w_n , 将所有满足条件的放入候选集 X ;

步骤5.3 从候选集 X 中选择性能最佳的权矢量 w^* 作为结果输出。

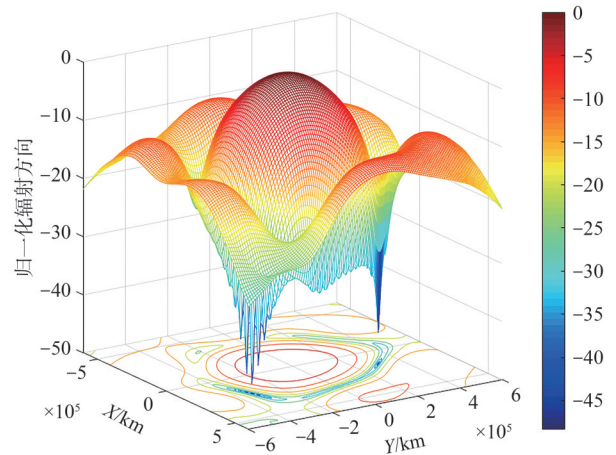
3 计算机仿真和验证

本文采用计算机仿真并通过相应的数据分析验证所提算法的性能。系统参数设置见表1。仿真中假设存在4个窃听器, 以卫星在地面的投影为原点, 建立平面直角坐标系。基站的坐标为 $[0, 0]$ km, 地球站的坐标为 $[10, 30]$ km, 卫星窃听者的坐标为 $[20, 440]$ km, $[240, 250]$ km, $[-290, -370]$ km 和 $[180, -380]$ km。

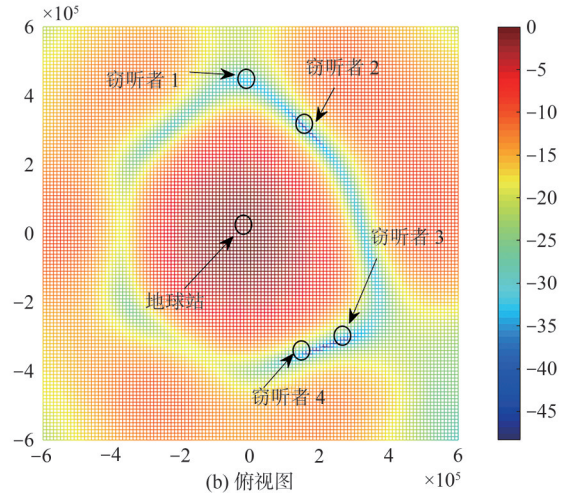
表1 系统参数设置

参数	数值
卫星轨道	GEO
卫星馈源数 M	7
基站馈源数 N	16
载频 f/GHz	20
噪声带宽 B/MHz	50
噪声温度 T/K	300
3 dB 角度 $^\circ$	0.4
卫星天线增益 b_{max}/dB	52
雨衰系数	$\mu_g = -3.125, \sigma_g = 1.591$

卫星归一化辐射方向三维图和俯视图如图2所示, 其中, $\rho_{k,\text{out}} = 0.1$, $R_{s,\text{th}} = 2 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$, $P_{b,\text{th}} = P_{s,\text{th}} = 4 \text{ W}$ 。根据波束辐射图, 可以观察到辐射波峰指向地球站并且在各个窃听器位置产生大约 -40 dB 的零陷, 这表明本文所提算法能在确保地球站信号强度的前提下, 有效地抑制泄露到窃听者的信号功率, 从而提高卫星通信的安全性。



(a) 三维图



(b) 俯视图

图2 卫星归一化辐射方向三维图和俯视图

卫星发射功率门限与平均可达速率关系如图3所示。从图3可以看出, 平均可达安全速率 \bar{R} 随着输出信噪比门限的提高而增加, 这是因为 \bar{R} 同时受地球站和窃听器可达速率两部分的影响, 当窃听器可达速率被较好地抑制时, 输出信噪比与 \bar{R} 就呈现正相关性。此外, 本文所提的算法始终优于其他对

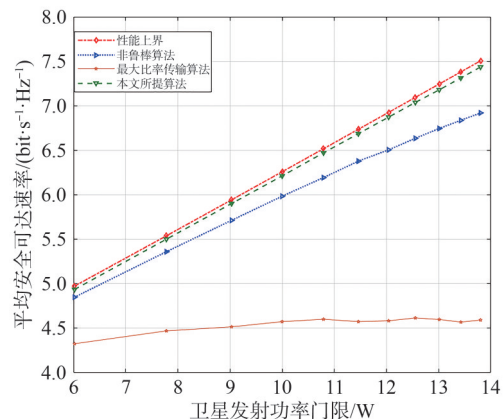


图3 卫星发射功率门限与平均可达速率关系

比算法，这是因为非鲁棒算法在优化过程中忽略了窃听者信道存在的估计误差，导致其对窃听者接收信号的抑制效果时好时坏，从而导致系统的安全性能降低。最大比率传输（MRT, maximum ratio transmission）算法旨在最大化目标用户的接收信号质量，无法抑制旁瓣的信号泄露，或者将零陷对准窃听者，缺少对安全性的考量，从而导致其安全性能在3种算法中最差。

实际可达安全速率概率统计如图4所示，描述了本文所提的鲁棒算法与非鲁棒算法的实际概率统计直方图。图4中纵坐标的数值是将所提方案和非鲁棒方案所得权矢量带入相同的非完美信道中随机10 000次得到的。从图4可以发现，在窃听者信道估计存在误差的情况下，本文所提算法所得的性能总体分布在 $[2, 4.4] \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ ，而非鲁棒算法主要分布在 $[1.5, 3.9] \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。这是因为本文所提算法在权矢量设计过程中考虑了信道误差的影响，建立了概率约束，具有较好的鲁棒性，相较于非鲁棒算法，能在很大程度上降低信道估计误差带来的影响，从而显著提高卫星通信的可达安全速率。

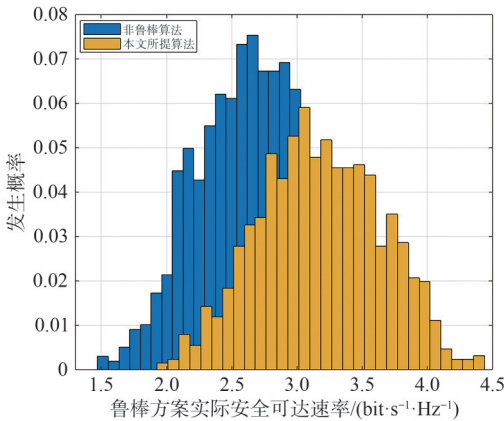


图4 实际可达安全速率概率统计

信道估计误差因子与输出信噪比门限对平均可达安全速率的影响如图5所示，描绘了本文所提算法中，输出信噪比和信道估计误差因子 ϵ 对 \bar{R} 的影响。图5表明， \bar{R} 与输出信噪比成正相关，而与信道估计误差因子成负相关。除了前文所提到的由于输出信噪比增长引发的问题， ϵ 的增长也会使窃听者信道不确定性提高，在进行BF设计时难以很好地抑制窃听者的信息可达速率，从而导致系统安全性能下降。

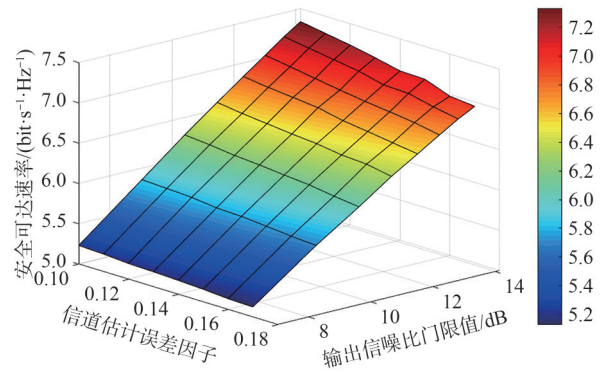


图5 信道估计误差因子与输出信噪比门限对平均可达安全速率的影响

算法迭代收敛曲线如图6所示，描述了不同发射功率门限情况下本文所提算法的迭代收敛性情况。从图6可看出，本文方案采用ZF设计基站权矢量，基本能在3次迭代内稳定到某一数值，有效地降低了问题的计算复杂度。

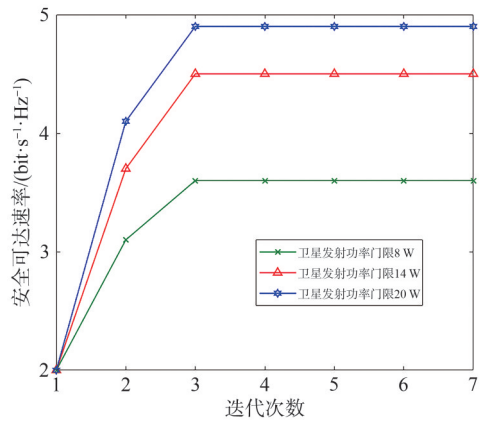


图6 算法迭代收敛曲线

4 结束语

本文面向由卫星网络和地面网络有机结合的STIN，在已知窃听者非完美CSI的情况下提出了一种鲁棒安全BF算法，以提升系统的安全性能。首先，卫星和基站采用BF技术服务地球站和地面用户，且在它们之间共享频谱资源的情况下，建立以地球站可达安全速率门限最大化为目标函数，用户服务质量、地球站安全中断概率和系统发射功率满足需求为约束的联合优化问题，为简化问题，基站采用ZF准则获得BF权矢量。然后，采用伯恩斯坦不等式对概率约束进行处理，并通过引入辅助变量和采用矩阵等价转换降低优化问题的复杂度，求解得到令人满意的解。最后，通过计算机仿真

验证本文所提算法能够以较快的收敛速度实现优秀的性能, 并在安全性和复杂度之间获得了较好的折中。

参考文献:

- [1] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [2] 杨力, 潘成胜, 孔相广, 等. 5G融合卫星网络研究综述[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 202-215.
YANG L, PAN C S, KONG X G, et al. Review on 5G-satellite integrated network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 202-215.
- [3] HAN C, LIU A J, HUO L Y, et al. A prediction-based resource matching scheme for rentable LEO satellite communication network[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 414-417.
- [4] AKHLAGHPASAND H, SHAH-MANSOURI V. Traffic offloading probability for integrated LEO satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(9): 2413-2416.
- [5] HUANG Q Q, LIN M, ZHU W P, et al. Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2413-2426.
- [6] 徐常志, 靳一, 李立, 等. 面向6G的星地融合无线传输技术[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 28-36.
XU C Z, JIN Y, LI L, et al. Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(1): 28-36.
- [7] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [8] 刘杨, 彭木根. 星地融合智能组网: 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 1-12.
LIU Y, PENG M G. Satellite-ground fusion intelligent networking: vision and key technologies[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(6): 1-12.
- [9] 张美楠, 张鸣琪, 丁飞, 等. 星地融合中继网络时延与能耗边缘优化卸载策略[J]. 物联网学报, 2022, 6(3): 124-132.
ZHANG M N, ZHANG M Q, DING F, et al. Offloading strategy with edge optimization of time delay and energy consumption in integrated satellite-terrestrial relay network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(3): 124-132.
- [10] 肖圣杰, 林敏, 赵柏, 等. 智能反射面辅助的星地融合网络鲁棒安全波束成形算法[J]. 物理学报, 2022, 71(7): 338-346.
XIAO S J, LIN M, ZHAO B, et al. Robust secure beamforming algorithm for intelligent reflecting surface-assisted satellite-terrestrial integrated networks[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(7): 338-346.
- [11] LIU C X, FENG W, CHEN Y F, et al. Optimal beamforming for hybrid satellite terrestrial networks with nonlinear PA and imperfect CSIT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(3): 276-280.
- [12] ZHANG W, CHEN J, KUO Y H, et al. Transmit beamforming for layered physical layer security[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9747-9760.
- [13] HUANG J S, CAO G D. Joint transmitting subarray partition and beamforming for active jamming suppression in phased-MIMO radar[J]. Radio Science, 2022, 57(1): e2021RS007325.
- [14] WANG D, BAI B, ZHAO W B, et al. A survey of optimization approaches for wireless physical layer security[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1878-1911.
- [15] DONG H, HUA C Q, LIU L Y, et al. Joint beamformer design and user scheduling for integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(10): 6398-6414.
- [16] HUANG Y, LI S N, YAN Y. Research on security transmission technologies for integrated satellite and terrestrial networks[C]// Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 437-440.
- [17] YUAN C, LIN M, OUYANG J, et al. Joint security beamforming in cognitive hybrid satellite-terrestrial networks[C]// Proceedings of the 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [18] LIN Z, LIN M, CHAMPAGNE B, et al. Secure beamforming for cognitive satellite terrestrial networks with unknown eavesdroppers[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2186-2189.
- [19] LIN M, LIN Z, ZHU W P, 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.
- [20] LU W X, AN K, ZHANG Y, et al. Robust secure beamforming for integrated satellite terrestrial relay networks coexisting with cognitive terrestrial user[C]// Proceedings of the 2019 IEEE 14th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). Piscataway: IEEE Press, 2019: 302-306.
- [21] ITU-R F.699-7. Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to about 70-86 GHz[S]. 2010.
- [22] JIANG B, YAN Y C, YOU L, et al. Robust secure transmission for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 1598-1612.
- [23] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.

- [24] 郭焱, 孔槐聪, 廖向荣, 等. 采用混合多址技术的卫星系统反向链路遍历容量分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 16-25.
GUO Y, KONG H C, LIAO X R, et al. Ergodic capacity for return link of satellite systems with hybrid multiple access[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023, 43(4): 16-25.
- [25] LIN Z, LIN M, CHAMPAGNE B, et al. Secrecy-energy efficient hybrid beamforming for satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(9): 6345-6360.
- [26] WANG Z N, KONG H C, HUANG S, et al. Beamforming and power allocation in NOMA-based multibeam satellite systems with outage constraint[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [27] LIN Z, LIN M, DE COLA T, et al. ZF-based beamforming for wireless powered cognitive satellite-terrestrial networks[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [28] 吴翠先, 董焱恒, 徐勇军, 等. 基于不完美 CSI 的低轨卫星通信系统鲁棒资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(2): 671-679.
WU C X, DONG Y H, XU Y J, et al. Robust resource allocation algorithm for low orbit satellite communication system based on imperfect CSI[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(2): 671-679.
- [29] 王勇, 周牧, 田增山, 等. 基于 C-RAN 前向压缩的物联网安全通信方法[J]. 物联网学报, 2018, 2(3): 51-60.
WANG Y, ZHOU M, TIAN Z S, et al. Secure communication approach for Internet of things based on C-RAN fronthaul compression[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(3): 51-60.
- [30] XU Y J, XIE H, LI D, et al. Energy-efficient beamforming for heterogeneous industrial IoT networks with phase and distortion noises[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7423-7434.
- [31] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.

[作者简介]



季铭仪(2002-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院博士生, 主要研究方向为智能信号处理技术、卫星通信等。



王子宁(1997-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院博士生, 主要研究方向为智能信号处理技术、卫星通信等。



肖圣杰(1998-), 男, 现就职于中兴通讯南京将军山研发中心, 主要研究方向为卫星通信、物理层安全等。



刘笑宇(1996-), 男, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为鲁棒波束成形、性能分析等。



程铭(1991-), 男, 博士, 南京邮电大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为电信技术、星地融合等。