



基于星间协作的低轨卫星物联网鲁棒预编码设计

褚建杭, 陈晓明*

浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 310027

* 通信作者. E-mail: chen_xiaoming@zju.edu.cn

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-16; 接受日期: 2022-04-05; 网络出版日期: 2023-02-01

国家自然科学基金 (批准号: U21A20443) 资助项目

摘要 随着物联网的广泛应用, 地面物联网已经难以满足海量广域分布设备的接入需求, 亟需研究低地球轨道 (low-earth orbit, LEO) 卫星物联网 (satellite Internet of Things, SIoT). LEO-SIoT 网络为了实现全球无缝覆盖, 会使用几十颗甚至上千颗低轨卫星组成一个卫星星座, 但这也造成了严重的星间干扰. 本文提出一种结合非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 和多波束预编码技术的 LEO-SIoT 网络, 可以支持海量设备接入并抑制波束间和卫星间干扰. 然而, 卫星获取的信道状态信息 (channel state information, CSI) 具有信道误差, 导致传统的预编码方法无法起到抑制干扰的作用. 因此, 本文首先以低轨卫星物联网的总功耗为目标函数, 并以物联网设备所需速率阈值的中断概率为约束建立星间联合鲁棒预编码优化问题; 其次, 利用二阶泰勒展开、伯恩斯坦不等式 (Bernstein-type inequality, BTI) 和惩罚函数等数学方法将原问题转化为近似等效的二阶锥规划 (second-order cone program, SOCP) 问题; 最后, 本文提出了一种鲁棒预编码算法来解决 SOCP 问题. 大量仿真结果证明了该算法的有效性和鲁棒性.

关键词 低轨卫星物联网, 鲁棒预编码, 非正交多址接入, 星间协作

1 引言

随着物联网 (Internet of Things, IoT) 在工业、农业、交通和医疗等各个领域的广泛应用, IoT 设备数量呈现爆炸式增长^[1,2]. 据预测^[3], 到 2030 年, IoT 设备数量将以千亿计. 其中, 大量的 IoT 设备将部署在偏远地区和极端地形, 例如山川悬崖、江河湖海, 以及森林沙漠等, 而这些地区尚无有效的无线覆盖, 亟需建设覆盖全球的物联网.

对于全球无缝覆盖的愿景, 单纯依靠地面蜂窝 IoT 网络难以实现, 由此卫星物联网 (satellite Internet of Things, SIoT) 网络受到了学术界和工业界的高度重视^[4,5]. LEO (low-earth orbit) 卫星由于其

引用格式: 褚建杭, 陈晓明. 基于星间协作的低轨卫星物联网鲁棒预编码设计. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 387-401, doi: 10.1360/SSI-2022-0069

Chu J H, Chen X M. Robust precoding design for inter-satellite cooperation-based low-earth orbit satellite Internet of Things (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 387-401, doi: 10.1360/SSI-2022-0069

接入时延低、传播损耗小等优点, 通常被作为 SIoT 的接入节点. 众所周知, LEO 卫星通信经历了两次快速发展期: 第 1 次是 20 世纪 90 年代, 代表系统如低轨铱星系统, 当时 LEO 卫星通信主要还是以语音等信号传输为主; 第 2 次则是过去的十多年, 涌现了大量的 LEO 星座系统, 例如 Starling¹⁾, O3b 和 Oneweb 等. 正是这些成功的 LEO 星座系统, 使得工业界相信 LEO 卫星能够组建全球 SIoT 系统. 迄今为止, Starlink 已经发射了数千颗 LEO 卫星组建全球网络并提供服务. 此外, 学术界也涌现了大量针对 LEO 卫星物联网的研究^[6~8]. 文献 [6] 提出了一种低延迟的 LEO-SIoT 网络, 通过设计时隙分配策略来降低网络延迟, 优化卫星资源. 文献 [7] 研究了大规模随机接入在 LEO-SIoT 网络中的应用, 并提出了一种增强的随机接入前导序列和新型的定时估计方案. 文献 [8] 总结了低轨卫星在偏远地区部署物联网服务的当前解决方案和 LEO-SIoT 网络所涉及的关键技术, 并讨论了工业界对于 LEO-SIoT 网络的关注问题和挑战.

对于 SIoT 网络而言, 星间合作是实现全球无缝覆盖的技术基础. 目前有两种被广泛研究的多卫星结构, 即同轨道多卫星组网^[9] 和多轨道多卫星^[10] 组网. 在后一种结构中, 整个系统将由不同轨道的卫星网络组成, 例如, 地球同步轨道卫星 (geosynchronous earth orbit, GEO) 网络、中轨道卫星 (medium earth orbit, MEO) 网络, 以及 LEO 卫星网络. 该结构进一步扩大了卫星通信系统的覆盖范围, 但却导致网络时延的骤增, 这是 IoT 网络无法容忍的缺陷. 因此, 本文考虑纯 LEO 卫星网络来构建 SIoT 网络.

实际上, 对于一个高效的 LEO-SIoT 网络, 星间链路 (inter-satellite link, ISL) 的设计是极为关键的一环, 且直接影响了 LEO-SIoT 网络的性能. 文献 [11, 12] 研究了光学 ISL 在 LEO 卫星星座中的应用, 验证了光学 ISL 具有高速传输能力以及强鲁棒性. 而在文献 [13] 中, 作者提出了一种基于 ISL 的交互数据的卫星协作方案, 并且证明利用 ISL 后的系统吞吐量远高于不使用 ISL 的系统. 因此, ISL 的设计是 LEO-SIoT 网络中必不可少的一部分且具有挑战性. 本文考虑 LEO-SIoT 网络采用基于激光通信的 ISL, 并且假设 ISL 不存在干扰.

此外, 为了进一步提高 LEO-SIoT 网络的接入能力, 本文将采用 NOMA (non-orthogonal multiple access)^[14] 来替代卫星系统中的传统接入方式, 例如时分多址接入 (time division multiple access, TDMA) 和频分多址接入 (frequency division multiple access, FDMA). 文献 [15] 中, 作者介绍了基于 NOMA 场景下卫星通信的各种应用场景且展示了 NOMA 在卫星通信中的优势. 特别是采用多波束技术的 LEO 卫星, 在每个波束中应用 NOMA 可以有效提高系统接入能力. 但是 NOMA 的引入不可避免地会导致干扰的产生, 这些干扰将会极大地影响 LEO-SIoT 网络的吞吐量. 通常, 预编码技术用来对抗 NOMA 带来的波束间干扰和网间干扰. 然而, 预编码技术的应用前提是发射端已知完美的 CSI (channel state information), 这在反馈链路容量受限以及存在一定时延的 LEO-SIoT 网络系统中并不实际. 因此需要考虑鲁棒预编码技术来对抗不完美 CSI 的影响. 在文献 [16] 中, 作者以用户信干噪比 (signal-to-interference plus noise ratio, SINR) 期望为约束研究了单卫星鲁棒多组多播问题, 但期望约束不足以严格保证系统性能. 因而有学者提出, 以 SINR 中断概率为约束进行鲁棒预编码设计^[17, 18]. 文献 [17] 中, 作者利用中心极限定理 (central limit theorem, CIT) 近似中断概率约束. CIT 是一种极端保守的方法, 通过消耗更多的功率来保证较低的中断概率且对于随机变量具有较高的要求. 因此, 另一种基于大偏差不等式 (large deviation inequality, LDI) 的保守近似方法被用来解决中断概率问题^[18], 且被证明消耗的功率少于 CIT. 上述文献的研究均是基于单卫星系统设计, 这些方法都无法直接应用于基于星间合作的 LEO-SIoT 网络中. 因此, 本文致力于具有星间合作的 LEO-SIoT 网络的鲁棒预编码设计. 具体而言, 本文的创新性主要包括以下 3 个方面:

1) <https://www.starlink.com>.

(1) 建立一个基于星间合作的 LEO-SIoT 网络框架. 通过结合 NOMA 和多波束技术, 该网络能支持海量广域分布 IoT 设备接入.

(2) 信道模型考虑 LEO 卫星实际通信环境, 本文将所获得的信道状态信息构建为具有相位误差的形式, 并且建立了一个结合 IoT 设备速率的中断概率约束和单天线功率约束的基于星间合作的预编码设计优化问题.

(3) 采用二阶泰勒 (Taylor) 展开和 BTI (Bernstein-type inequality) 不等式将非凸优化问题转换为一个松弛的可解 SOCP (second-order cone program) 问题. 此外, 用罚函数替代秩一约束, 避免了高斯 (Gauss) 随机化带来的不确定性. 最后, 提出了一种鲁棒预编码算法来解决近似转化后的凸问题.

本文其余部分组织如下: 第 2 节介绍了基于星间协作的 LEO-SIoT 网络模型. 第 3 节分析了 LEO-SIoT 网络的鲁棒预编码算法设计过程. 第 4 节提供了仿真结果证明所提算法的有效性和鲁棒性. 最后第 5 节总结全文的工作.

符号说明. 粗体小写字母和粗体大写字母表示列向量和矩阵, $\mathbb{R}^{m \times n}$, $\mathbb{C}^{m \times n}$, $\mathbb{H}^{m \times n}$, \mathbb{C}^m 和 \mathbb{R}^m 分别表示 $m \times n$ 维实矩阵, $m \times n$ 维复矩阵, m 维厄米特矩阵 (Hermitian matrix), m 维复向量和 m 维实向量. \mathcal{S}^N 和 \mathcal{K}^N 表示对称和反对称矩阵. $(\cdot)^H$ 和 $(\cdot)^T$ 表示共轭转置和普通转置, $\|\cdot\|$ 和 $|\cdot|$ 表示欧几里得范数和绝对值, $\text{tr}(\cdot)$ 和 $\text{Rank}(\cdot)$ 表示一个矩阵的迹和秩, \odot 表示哈达玛乘积 (Hadamard product). $\lambda^+(\mathbf{X}) = \sup\{\sup_{k=1, \dots, N}\{x_k\}, 0\}$, 式中 $x_k, k = 1, \dots, N$ 是矩阵 \mathbf{X} 的特征值. 此外用 $\text{diag}(\mathbf{x})$ 表示向量 \mathbf{x} 的对角化, $[\mathbf{X}]_{m,n}$ 表示矩阵的第 $[m, n]$ 个元素, $\text{real}(\mathbf{X})$ 和 $\text{imag}(\mathbf{X})$ 表示矩阵 \mathbf{X} 的实数部分和虚数部分. 最后, $\langle \mathbf{X}, \mathbf{Y} \rangle = \text{tr}(\mathbf{X}^H \mathbf{Y})$ 且 $\sum_{i,j} \mathbf{X}$ 表示矩阵 \mathbf{X} 所有元素的和.

2 系统模型

不失一般性, 本文考虑具有星间链路的两个 LEO 卫星组成一个 SIoT 网络, 该网络能扩展为覆盖全球的大型 SIoT 系统. 如图 1 所示, 两颗卫星的多个波束覆盖网络内所有 IoT 设备. 由于卫星波束覆盖范围较广, 两颗卫星的波束存在重叠区域, 重叠区域中的设备会收到来自另一颗卫星的干扰信号. 卫星通过信关站 (gateway, GW) 来管理网络中的各种信息, 比如 IoT 设备的 CSI 和服务质量 (quality of service, QoS) 等. 此外, 两颗低轨卫星可以通过 ISL 交换各自设备的信息. 由于频谱资源的稀缺性, LEO-SIoT 网络采用 NOMA 技术来提升接入能力. 具体而言, 卫星利用叠加编码使一个波束可服务多个设备. 假设配备 N_{sat} 根天线的两颗 LEO 卫星分别与 K_1 和 K_2 个单天线物联网用户设备 (user equipment, UE) 通信. 为了便于区分, 后文以 LEO_1 和 LEO_2 表示第 1 颗和第 2 颗卫星, $\text{UE}_{1,m,n}$ 表示 LEO_1 的第 m 个波束中的第 n 个 UE, $\text{UE}_{2,l,s}$ 表示 LEO_2 的第 l 个波束中的第 s 个 UE. LEO_1 卫星的覆盖区域被划分为 M 个区域, 第 m 个区域包含 N_m 个 UE; LEO_2 卫星的覆盖区域被划分为 L 个区域, 第 l 个区域包含 S_l 个 UE. 假设存在 $A = A_1 + A_2$ 个重叠波束, 其中 A_1 个重叠波束中的 UE 属于 LEO_1 , A_2 个重叠波束中的 UEs 属于 LEO_2 . 本节剩余部分将介绍基于 NOMA 的 LEO-SIoT 网络系统模型.

2.1 卫星信道

根据 Ka/Ku 频段低轨卫星信号在空间中的传播特性, 从 LEO 卫星到 UE 的卫星信道可以建模为 [19]

$$\mathbf{g} = \sqrt{C} \mathbf{r} \odot \mathbf{b}^{1/2}, \quad (1)$$

其中, C 是大尺度衰落系数, \mathbf{b} 是 N_{sat} 维的波束增益向量, \mathbf{r} 是 N_{sat} 维的雨衰系数向量. 大尺度衰落

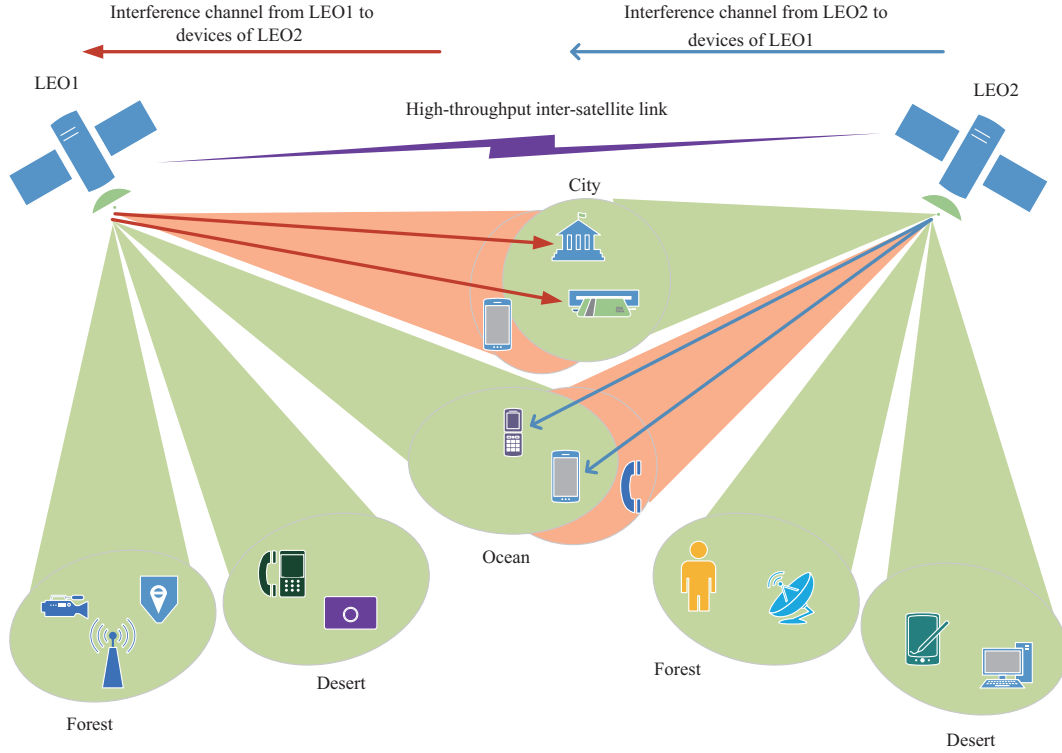


图 1 (网络版彩图) 基于双星协作的 LEO-SIoT 系统模型

Figure 1 (Color online) A model of LEO-SIoT network with two cooperative satellites

系数 C 可以表示为

$$C = \left(\frac{v}{4\pi f d} \right)^2 \frac{G}{\kappa B T}, \quad (2)$$

其中, $\left(\frac{v}{4\pi f d} \right)^2$ 是自由空间损耗, v 是光速, f 是载波频率, d 是 LEO 卫星与 UE 之间的距离, G 是 UE 的接收天线增益, κ 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数, B 是载波带宽, T 是接收噪声温度. 根据文献 [17], 对于波束增益向量 \mathbf{b} , 其第 n 个元素可以写成

$$\mathbf{b}(n) = b_{\max} \left(\frac{J_1(u_n)}{2u_n} + 36 \frac{J_3(u_n)}{u_n^3} \right)^2, \quad (3)$$

其中, $u_n = 2.07123 \frac{\sin(\varphi_n)}{\sin(\varphi_{3\text{dB}})}$, φ_n 是第 n 根卫星天线所在波束到 UE 之间的角度, $\varphi_{3\text{dB}}$ 是波束的 3dB 角度, b_{\max} 表示最大天线增益, $J_1()$ 和 $J_3()$ 分别是一阶和三阶贝塞尔 (Bessel) 函数. 由于采用 Ka 频段进行信号传输, 卫星信道容易受到环境因素的影响, 比如大气吸收系数、雨衰和雾衰因子等. 在这些因素中, 雨衰系数对于信道影响最大. 雨衰系数向量 [20] 可以写成

$$\mathbf{r} = \xi^{\frac{1}{2}} \mathbf{e}^{-j\boldsymbol{\theta}}, \quad (4)$$

其中, $\xi^{\frac{1}{2}}$ 是 dB 形式的雨衰值, 通常服从对数高斯分布, 即 $\ln(\xi^{\frac{1}{2}}) \sim \mathcal{CN}(\mu_r, \sigma_r^2)$, $\boldsymbol{\theta}$ 是 N_{sat} 维的相位向量, 其中的元素服从 0 到 2π 的均匀分布. 通常卫星和 UE 之间的环境在一段时间内保持不变, 即卫星的信道幅度在一段时间内可以设为定值, 但卫星信道的相位由于卫星的快速移动而迅速变化 [21]. 通过地面信关站的辅助, 卫星网络通常能获取较为准确的信道幅度信息, 而信道相位则存在误差. 实际信

表 1 系统模型变量表
Table 1 Variables in system model

Variable	Definition
$\mathbf{x}_1/\mathbf{x}_2$	Transmit signal of LEO ₁ /transmit signal of LEO ₂
$x_{1,m,n}$	Transmit signal of UE _{1,m,n}
$x_{2,l,s}$	Transmit signal of UE _{2,l,s}
$\alpha_{1,m,n}$	Power allocation factor of UE _{1,m,n}
$\alpha_{2,l,s}$	Power allocation factor of UE _{2,l,s}
\mathbf{w}_m	Precoder of the m -th beam of LEO ₁
\mathbf{v}_l	Precoder of the l -th beam of LEO ₂
$\mathbf{g}_{1,m,n}$	The real channel from LEO ₁ to UE _{1,m,n}
$\mathbf{g}_{2,l,s}$	The real channel from LEO ₂ to UE _{2,l,s}
$\mathbf{h}_{1,l,s}$	The interference channel from LEO ₁ to UE _{2,l,s}
$\mathbf{h}_{2,m,n}$	The interference channel from LEO ₂ to UE _{1,m,n}
$n_{1,m,n}/n_{2,l,s}$	Additive white Gaussian noise at UE _{1,m,n} /UE _{2,l,s}
$\delta(m,n)/\delta(l,s)$	Auxiliary control variable with 0 or 1
$\beta_{1,m,n}/\beta_{2,l,s}$	Auxiliary variable in [0, 1]
$\eta_{1,m,n}/\eta_{2,l,s}$	Imperfect SIC coefficient at UE _{1,m,n} /UE _{2,l,s}

道相位向量 $\boldsymbol{\theta}$ 和估计信道相位向量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 之间的关系可表示为^[17]

$$\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{e}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{e} 是信道相位误差向量, 其元素为独立同分布的高斯随机变量, 即 $\mathbf{e} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{C})$, $\mathbf{C} = \epsilon^2 \mathbf{I}$ 是相位误差的协方差矩阵. 因此实际 CSI 和估计 CSI 的关系可以表示为

$$\mathbf{g} = \hat{\mathbf{g}} \odot \mathbf{q} = \text{diag}(\hat{\mathbf{g}})\mathbf{q}, \quad (6)$$

其中, \mathbf{q} 是信道误差向量, 其满足 $\mathbf{q} \triangleq \exp\{\mathbf{j}\mathbf{e}\}$. 值得注意的是, 由于星间激光链路的存在, 卫星可以获得对相邻卫星用户设备的干扰信道状态. 本文涉及到的变量含义可以参考表 1.

2.2 信号模型

LEO-SIoT 网络采用 NOMA 和空分复用技术来支撑海量设备接入. 空分复用就是卫星中的多波束技术, 在每个波束中应用 NOMA 来提升整个网络的接入能力. NOMA 通常由叠加编码和串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 两部分组成. 首先, 通过叠加编码, LEO₁ 和 LEO₂ 的发射信号可以表示为

$$\mathbf{x}_1 = \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \sum_{n=1}^{N_M} \sqrt{\alpha_{1,m,n}} x_{1,m,n}, \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_2 = \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_l \sum_{s=1}^{S_l} \sqrt{\alpha_{2,l,s}} x_{2,l,s}, \quad (8)$$

其中, $x_{1,m,n}$ 和 $x_{2,l,s}$ 是 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的发射信号, 服从高斯分布且具有单位能量, $\alpha_{1,m,n}$ 和 $\alpha_{2,l,s}$ 是波束内功率分配因子用于协调同一波束内用户间干扰, 并且分别满足 $\sum_{n=1}^{N_M} \alpha_{1,m,n} = 1$ 和 $\sum_{s=1}^{S_l} \alpha_{2,l,s} = 1$, \mathbf{w}_m 是 LEO₁ 第 m 个波束的预编码向量, \mathbf{v}_l 是 LEO₂ 第 l 个波束的预编码向量.

然后, 两颗卫星将各自的叠加编码信号广播至各自的 UE. 为了提升接收信号质量, 所有 UE 均采用 SIC 来抑制波束内干扰. 本文假设 LEO₁ 和 LEO₂ 的每个波束内所有 UE 的等效信道增益满足下列条件:

$$\begin{aligned} |\mathbf{g}_{1,m,1}^H \mathbf{w}_m|^2 &\geq |\mathbf{g}_{1,m,2}^H \mathbf{w}_m|^2 \geq \cdots \geq |\mathbf{g}_{1,m,N_m}^H \mathbf{w}_m|^2, \\ |\mathbf{g}_{2,l,1}^H \mathbf{v}_l|^2 &\geq |\mathbf{g}_{2,l,2}^H \mathbf{v}_l|^2 \geq \cdots \geq |\mathbf{g}_{2,l,S_l}^H \mathbf{v}_l|^2. \end{aligned} \quad (9)$$

因此, UE_{1,m,n} 可以消除第 m 个波束里信道排序在 UE_{1,m,n} 前面的 UE 产生的干扰, UE_{2,l,s} 可以消除第 l 个波束里信道排序在 UE_{2,l,s} 前面的 UE 产生的干扰. 由于同一波束内处于相近区域的 UEs 信道增益近似相等, 会导致 SIC 的性能急剧下降, 因此需要通过分组算法来选择每一时刻波束内通信的 UE^[22] (本文假定同一波束内不同 UE 间的信道增益是完全不同的). 实际上, 除了信道增益, 接收设备硬件缺陷和星地链路的环境因素也会影响 SIC 的性能. 因此, 为了模拟实际系统 SIC 能力, 本文引入线性不完美 SIC 模型^[23], SIC 处理后的 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的接收信号可以分别表示为

$$\begin{aligned} y_{1,m,n} &= \underbrace{\mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_m \sqrt{\alpha_{1,m,n}} x_{1,m,n}}_{\text{目标信号}} + \underbrace{\mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_m \sum_{i \neq n} \sqrt{\beta_{1,m,i}} \alpha_{1,m,i} x_{1,m,i}}_{\text{波束内残余干扰}} \\ &+ \underbrace{\sum_{j=1, j \neq m}^{M_l} \mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_j \sum_{i=1}^{N_M} \sqrt{\alpha_{1,j,i}} x_{1,j,i}}_{\text{波束间干扰}} + \underbrace{\delta(m,n) \sum_{l=1}^L |\mathbf{h}_{2,m,n}^H \mathbf{v}_l|^2 \sum_{s=1}^{S_l} \alpha_{2,l,s}}_{\text{邻星干扰}} + \underbrace{n_{1,m,n}}_{\text{AWGN}}, \\ y_{2,l,s} &= \underbrace{\mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_l \sqrt{\alpha_{2,l,s}} x_{2,l,s}}_{\text{目标信号}} + \underbrace{\mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_l \sum_{i \neq s} \sqrt{\beta_{2,l,i}} \alpha_{2,l,i} x_{2,l,i}}_{\text{波束内残余干扰}} \\ &+ \underbrace{\sum_{j=1, j \neq l}^L \mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_j \sum_{i=1}^{S_l} \sqrt{\alpha_{l,s}} x_{2,j,i}}_{\text{波束间干扰}} + \underbrace{\delta(l,s) \sum_{m=1}^{M_l} |\mathbf{h}_{1,l,s}^H \mathbf{w}_m|^2 \sum_{n=1}^{N_m} \alpha_{1,m,n}}_{\text{邻星干扰}} + \underbrace{n_{2,l,s}}_{\text{AWGN}}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $n_{1,m,n}$ 和 $n_{2,l,s}$ 分别是 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 信道中方差为 $\sigma_{1,m,n}^2$ 和 $\sigma_{2,l,s}^2$ 的加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN), $\delta(m,n)$, $\delta(l,s) \in \{0, 1\}$ 是辅助控制变量, 其中 1 表示该 UE 在重叠区域且受到来自相邻卫星的干扰, $\beta_{1,m,n}$ 和 $\beta_{2,l,s}$ 是辅助变量, 分别定义为

$$\beta_{1,m,n} = \begin{cases} \eta_{1,m,n}, & \text{if } i < n, \\ 1, & \text{if } i \geq n, \end{cases} \quad \beta_{2,l,s} = \begin{cases} \eta_{2,l,s}, & \text{if } i < s, \\ 1, & \text{if } i \geq s. \end{cases}$$

$\eta_{1,m,n}$ 和 $\eta_{2,l,s} \in [0, 1]$ 分别是 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的不完美 SIC 系数²⁾. 最终, UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的 SINR 可以写为

$$\begin{aligned} \Gamma_{1,m,n} &= \frac{\alpha_{1,m,n} |\mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_m|^2}{c_{1,m,n} |\mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_m|^2 + \sum_{j=1, j \neq m}^{M_l} |\mathbf{g}_{1,m,n}^H \mathbf{w}_j|^2 \sum_{i=1}^{N_M} \alpha_{1,j,i} + \delta(m,n) \sum_{l=1}^L |\mathbf{h}_{2,m,n}^H \mathbf{v}_l|^2 \sum_{s=1}^{S_l} \alpha_{2,l,s} + \sigma_{1,m,n}^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

2) 不完美 SIC 系数可通过对设备的译码错误长期统计所获得.

$$\Gamma_{2,l,s} = \frac{\alpha_{2,l,s} |\mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_l|^2}{c_{2,l,s} |\mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_l|^2 + \sum_{j=1, j \neq l}^L |\mathbf{g}_{2,l,s}^H \mathbf{v}_j|^2 \sum_{i=1}^{S_l} \alpha_{2,j,i} + \delta(l,s) \sum_{m=1}^M |\mathbf{h}_{1,l,s}^H \mathbf{w}_m|^2 \sum_{n=1}^{N_m} \alpha_{1,m,n} + \varrho_{2,l,s}^2}, \quad (12)$$

其中, $c_{1,m,n} = \sum_{i=1}^{N_m} \beta_{1,m,i} \alpha_{1,m,i} - \alpha_{1,m,n}$ 且 $c_{2,l,s} = \sum_{i=1}^{S_l} \beta_{2,l,i} \alpha_{2,l,i} - \alpha_{2,l,s}$.

从 SINR 表达式中可以看出, 基于星间协作的 LEO-SIoT 网络的性能与多种干扰有关, 比如 SIC 残余干扰、波束间干扰和星间干扰等. 这些干扰的大小取决于 \mathbf{w}_m 和 \mathbf{v}_l 的设计, 因此第 3 节将详细阐述如何设计 \mathbf{w}_m 和 \mathbf{v}_l 来确保 LEO-SIoT 网络的性能.

3 低轨卫星物联网的鲁棒预编码设计

3.1 鲁棒算法设计

考虑到星上能量有限, 本小节以最小总功率为目标函数结合 QoS 概率约束和单天线功率约束来设计鲁棒预编码向量. LEO-SIoT 网络的鲁棒预编码问题可以建模为

$$\min_{\mathbf{w}_m, \mathbf{v}_l, \forall m, l} \sum_{m=1}^M \|\mathbf{w}_m\|^2 + \sum_{l=1}^L \|\mathbf{v}_l\|^2 \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } \Pr \{\Gamma_{1,m,n} \geq \gamma_{1,m,n}\} \geq 1 - p_{1,m,n}, \quad \forall m, n, \quad (13b)$$

$$\Pr \{\Gamma_{2,l,s} \geq \gamma_{2,l,s}\} \geq 1 - p_{2,l,s}, \quad \forall l, s, \quad (13c)$$

$$\left[\sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H \right]_{k,k} \leq P_{1,k}, \quad \left[\sum_{l=1}^L \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l^H \right]_{t,t} \leq P_{2,t}, \quad \forall k, t, \quad (13d)$$

其中, $P_{1,k}$ 和 $P_{2,t}$ 分别是 LEO₁ 和 LEO₂ 的单天线最大功率约束, $\gamma_{1,m,n}$ 和 $\gamma_{2,l,s}$ 分别是 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的最小 SINR 值, $p_{1,m,n}$ 和 $p_{2,l,s}$ 则是 UE_{1,m,n} 和 UE_{2,l,s} 的中断传输概率阈值.

显然, 问题 (13) 是一个非凸问题, 很难在多项式时间内找到最优解. 因此, 在原问题中引入松弛变量 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H$ 和 $\mathbf{V}_l = \mathbf{v}_l \mathbf{v}_l^H$, 原问题 (13) 可以重写为

$$\min_{\mathbf{w}_m, \mathbf{v}_l, \forall m, l} \sum_{m=1}^M \text{tr}(\mathbf{W}_m) + \sum_{l=1}^L \text{tr}(\mathbf{V}_l) \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \Pr \{\Gamma_{1,m,n} \geq \gamma_{1,m,n}\} \geq 1 - p_{1,m,n}, \quad \forall m, n, \quad (14b)$$

$$\Pr \{\Gamma_{2,l,s} \geq \gamma_{2,l,s}\} \geq 1 - p_{2,l,s}, \quad \forall l, s, \quad (14c)$$

$$\left[\sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right]_{k,k} \leq P_{1,k}, \quad \left[\sum_{l=1}^L \mathbf{V}_l \right]_{t,t} \leq P_{2,t}, \quad \forall k, t, \quad (14d)$$

$$\text{Rank}(\mathbf{W}_m) = 1, \quad \text{Rank}(\mathbf{V}_l) = 1, \quad \forall m, l, \quad (14e)$$

$$\mathbf{W}_m \succeq \mathbf{0}, \quad \mathbf{V}_l \succeq \mathbf{0}, \quad \forall m, l, \quad (14f)$$

然而, 由于存在概率约束 (14b) 和 (14c), 问题 (14) 依然非凸. 为了解决概率约束, 本文提出利用二阶泰勒展开和 BTI 定理将概率约束转化为一组凸约束的集合. 由于两个概率约束形式相似, 本小节给出约束 (14b) 的具体转化过程, 式 (14c) 可以由此直接写出转化后的结果. 首先, 引入定理 1^[24] 介绍二次项 $\mathbf{x}^H \mathbf{Y} \mathbf{x}$ 的泰勒展开式.

定理1 对于一个 N 阶厄米特矩阵 \mathbf{Y} , 高斯随机向量 $\boldsymbol{\theta}$ 和复指数高斯向量 $\mathbf{x} = (e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_K})$, 可以得到二次项 $\mathbf{x}^H \mathbf{Y} \mathbf{x}$ 的二阶泰勒展开式:

$$\mathbf{x}^H \mathbf{Y} \mathbf{x} \approx \sum_{i,j} \mathbf{Y}_{i,j} + \boldsymbol{\theta}^T f_1(\mathbf{A}) \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\theta}^T f_2(\mathbf{B}), \quad (15)$$

式中, $\mathbf{A} = \text{real}(\mathbf{Y}) \in \mathcal{S}^K$ 且 $\mathbf{B} = \text{imag}(\mathbf{Y}) \in \mathcal{K}^K$, $f_1: \mathbb{R}^{N \times N} \rightarrow \mathbb{R}^{N \times N}$ 和 $f_2: \mathbb{R}^{N \times N} \rightarrow \mathbb{R}^N$ 是两个线性映射函数, 分别定义为

$$[f_1(\mathbf{A})]_{i,j} = \begin{cases} \mathbf{A}_{i,j} - \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_{i,n}, & \text{if } i = j, \\ \mathbf{A}_{i,j}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (16a)$$

$$[f_2(\mathbf{B})]_i = 2 \sum_{n=1}^N \mathbf{B}_{i,n}. \quad (16b)$$

因此, 根据定理 1, 约束 (14b) 可以近似表示为

$$\begin{aligned} & \Pr \{ \mathbf{q}_{1,m,n}^H \mathbf{Z}_{1,m,n} \mathbf{q}_{1,m,n} - \delta(m,n) \mathbf{q}_{2,m,n}^H \mathbf{Z}_{2,m,n} \mathbf{q}_{2,m,n} - \varrho_{1,m,n}^2 \} \\ & \approx \Pr \left\{ \boldsymbol{\xi}_{1,m,n}^H \mathbf{O}_{1,m,n} \boldsymbol{\xi}_{1,m,n} + \boldsymbol{\xi}_{1,m,n}^H \mathbf{r}_{1,m,n} + \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{1,m,n} \right. \\ & \quad \left. - \delta(m,n) \left(\boldsymbol{\xi}_{2,m,n}^H \mathbf{O}_{2,m,n} \boldsymbol{\xi}_{2,m,n} + \boldsymbol{\xi}_{2,m,n}^H \mathbf{r}_{2,m,n} + \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{2,m,n} \right) - \varrho_{1,m,n}^2 \geq 0 \right\} \\ & \geq 1 - p_{1,m,n}, \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{Z}_{1,m,n} = \text{diag}(\hat{\mathbf{g}}_{1,m,n}^H) \boldsymbol{\Psi}_{1,m,n} \text{diag}(\hat{\mathbf{g}}_{1,m,n})$, $\boldsymbol{\Psi}_{1,m,n} = (\frac{\alpha_{1,m,n}}{\gamma_{1,m,n}} - c_{1,m,n}) \mathbf{W}_m - \sum_{j=1, j \neq m}^M \mathbf{W}_j \sum_{i=1}^{NM} \alpha_{1,j,i}$, $\mathbf{Z}_{2,m,n} = \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{2,m,n}^H) \sum_{l=1}^L \mathbf{V}_l \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{2,m,n})$, $\boldsymbol{\xi}_{1,m,n} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, $\boldsymbol{\xi}_{2,m,n} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, $\mathbf{O}_{1,m,n} = \epsilon_{1,m,n}^2 f_1[\text{real}(\mathbf{Z}_{1,m,n})]$, $\mathbf{r}_{1,m,n} = \epsilon_{1,m,n} f_2[\text{imag}(\mathbf{Z}_{1,m,n})]$, $\mathbf{O}_{2,m,n} = \epsilon_{2,m,n}^2 f_1[\text{real}(\mathbf{Z}_{2,m,n})]$ 和 $\mathbf{r}_{2,m,n} = \epsilon_{2,m,n} f_2[\text{imag}(\mathbf{Z}_{2,m,n})]$.

通过上述转换, 近似后的约束 (14b) 可以通过 BTI^[25] 定理转化为一组凸约束集合. 下面介绍 BTI 定理具体内容.

定理2 对于任意一个 N 阶高斯随机向量 $\mathbf{e} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, N 阶矩阵 $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{N \times N}$, N 阶向量 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^N$, 只要满足 $x > 0$, 下列不等式恒成立:

$$\Pr \left\{ \mathbf{e}^T \mathbf{T} \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{r} \geq \text{tr}(\mathbf{T}) - 2\sqrt{\|\mathbf{T}\|^2 + \frac{1}{2}\|\mathbf{r}\|^2} \sqrt{x} - 2\lambda^+(\mathbf{T})x \right\} \geq 1 - e^{-x}. \quad (18)$$

可以看到式 (17) 的近似式满足 BTI 定理表达式. 因此, 通过引入松弛变量 $\rho_{1,m,n}$ 和 $\nu_{1,m,n}$, 概率约束 (14b) 的近似等效凸约束组合如下所示:

$$\text{tr}(\mathbf{T}_{1,m,n}) - 2\sqrt{\ln\left(\frac{1}{p_{1,m,n}}\right)} \rho_{1,m,n} + 2 \ln(p_{1,m,n}) \nu_{1,m,n} + \omega_{1,m,n} \geq 0, \quad (19a)$$

$$\left\| \left[\text{vec}(\mathbf{T}_{1,m,n}), \sqrt{\frac{1}{2}} \mathbf{t}_{1,m,n} \right] \right\| \leq \rho_{1,m,n}, \quad (19b)$$

$$\nu_{1,m,n} \mathbf{I}_K + \mathbf{T}_{1,m,n} \succeq \mathbf{0}, \quad (19c)$$

$$\nu_{1,m,n} \leq 0, \quad (19d)$$

其中,

$$\mathbf{T}_{1,m,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{1,m,n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\delta(m,n)\mathbf{O}_{2,m,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t}_{1,m,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{1,m,n} \\ -\delta(m,n)\mathbf{r}_{2,m,n} \end{bmatrix},$$

$$\omega_{1,m,n} = \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{1,m,n} - \delta(m,n) \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{2,m,n} - \varrho_{1,m,n}^2.$$

同理, 概率约束 (14c) 的近似等效凸约束组合可以直接推导得到

$$\text{tr}(\mathbf{T}_{2,l,s}) - 2\sqrt{\ln\left(\frac{1}{p_{2,l,s}}\right)}\rho_{2,l,s} + 2\ln(p_{2,l,s})\nu_{2,l,s} + \omega_{2,l,s} \geq 0, \quad (20a)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{T}_{2,l,s}), \sqrt{\frac{1}{2}}\mathbf{t}_{2,l,s} \end{bmatrix} \right\| \leq \rho_{2,l,s}, \quad (20b)$$

$$\nu_{2,l,s} \mathbf{I}_K + \mathbf{T}_{2,l,s} \succeq \mathbf{0}, \quad (20c)$$

$$\nu_{2,l,s} \leq 0, \quad (20d)$$

其中, $\mathbf{Z}_{2,l,s} = \text{diag}(\hat{\mathbf{g}}_{2,l,s}^H) \Psi_{2,l,s} \text{diag}(\hat{\mathbf{g}}_{2,l,s})$, $\Psi_{2,l,s} = \left(\frac{\alpha_{2,l,s}}{\gamma_{2,l,s}} - c_{2,l,s}\right) \mathbf{V}_l - \sum_{j=1, j \neq l}^L \mathbf{W}_j \sum_{i=1}^{S_l} \alpha_{2,j,i}$, $\mathbf{Z}_{1,l,s} = \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{1,l,s}^H) \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_l \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{1,l,s})$, $\xi_{2,l,s} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, $\xi_{1,l,s} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, $\mathbf{O}_{2,l,s} = \epsilon_{2,l,s}^2 f_1[\text{real}(\mathbf{Z}_{2,l,s})]$, $\mathbf{r}_{2,l,s} = \epsilon_{2,l,s} f_2[\text{imag}(\mathbf{Z}_{2,l,s})]$, $\mathbf{O}_{1,l,s} = \epsilon_{1,l,s}^2 f_1[\text{real}(\mathbf{Z}_{1,l,s})]$, $\mathbf{r}_{1,l,s} = \epsilon_{1,l,s} f_2[\text{imag}(\mathbf{Z}_{1,l,s})]$,

$$\mathbf{t}_{2,l,s} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{2,l,s} \\ -\delta(m,n)\mathbf{r}_{1,l,s} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{2,l,s} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{2,l,s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\delta(l,s)\mathbf{O}_{1,l,s} \end{bmatrix},$$

$$\omega_{2,l,s} = \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{2,l,s} - \delta(l,s) \sum_{i,j} \mathbf{Z}_{1,l,s} - \varrho_{2,l,s}^2.$$

至此, 中断概率约束的非凸性已经完美解决. 除此之外, 对于一个 SOCP 问题, 还需要处理矩阵变量的秩一约束. 通常半定松弛法 (semidefinite relaxation, SDR) 是消除秩一约束的首选, 具体实现是利用高斯随机法 (gaussian randomization, GR) 分解得到半定松弛后原问题的次优解. 然而, GR 方法具有不确定性, 即每次分解都可能得到不同的解. 此外, GR 方法不适用于包含复杂约束条件的凸优化问题, 因为分解出来的解往往无法满足原问题的约束. 因此, 本文利用迭代罚函数法来保证多轮迭代收敛后的优化变量能分解出预编码向量, 目标函数可以被改写为

$$\min_{\Theta} \sum_{m=1}^M \text{tr}(\mathbf{W}_m) + \sum_{m=1}^M \tau_m (\text{tr}(\mathbf{W}_m) - \lambda_{\max}(\mathbf{W}_m)) + \sum_{l=1}^L \text{tr}(\mathbf{V}_l) + \sum_{l=1}^L \mu_l (\text{tr}(\mathbf{V}_l) - \lambda_{\max}(\mathbf{V}_l)), \quad (21)$$

其中, $\Theta = \{\mathbf{W}_m, \mathbf{V}_l, \rho_{1,m,n}, \nu_{1,m,n}, \rho_{2,l,s}, \nu_{2,l,s}\}$ 是所有优化变量的集合, μ_l 和 τ_m 为罚函数因子. 最大特征值函数 $\lambda_{\max}(\mathbf{W})$ 是一个非平滑函数不利于收敛性, 因此采用下列不等式右侧平滑函数进行替代:

$$\lambda_{\max}(\mathbf{X}) \geq \langle \mathbf{w}_{\max} \mathbf{w}_{\max}^H, \mathbf{X} \rangle, \quad (22)$$

其中 \mathbf{w}_{\max} 是 λ_{\max} 对应的最大特征向量. 最后, 原始问题保守近似转化后的可解凸问题如下所示:

$$\min_{\Theta} \sum_{m=1}^{M_l} \text{tr}(\mathbf{W}_m) + \sum_{m=1}^M \tau_m \left(\text{tr}(\mathbf{W}_m) - \langle \mathbf{w}_{\max,m}^{(t)} (\mathbf{w}_{\max,m}^{(t)})^H, \mathbf{W}_m \rangle \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{l=1}^L \text{tr}(\mathbf{V}_l) + \sum_{l=1}^L \mu_l \left(\text{tr}(\mathbf{V}_l) - \left\langle \mathbf{v}_{\max,l}^{(t)} \mathbf{v}_{\max,l}^{(t)H}, \mathbf{V}_l \right\rangle \right) \\
& \text{s.t. (14d), (14f), (19a)~(19d), (20a)~(20d),}
\end{aligned} \tag{23}$$

其中, $\mathbf{w}_{\max,m}^{(t)}$ 和 $\mathbf{v}_{\max,l}^{(t)}$ 是第 t 轮迭代出的最优解分解出来的预编码向量. 问题 (23) 可以通过多种优化工具求解, 例如 matlab 的 CVX 工具包 [26] 或 python 的 CVX 工具包, 本文采用 matlab 的 CVX 工具包求解. 最终的鲁棒预编码算法如算法 1 所示.

算法 1 基于星间合作的 LEO-SIoT 网络的鲁棒预编码算法

Input: $N_{\text{sat}}, K_1, K_2, \alpha_{1,m,n}, \alpha_{2,l,s}, \gamma_{1,m,n}, \gamma_{2,l,s}, \varrho_{1,m,n}^2, \varrho_{2,l,s}^2, P_{1,k}, P_{2,t}, p_{1,m,n}, p_{2,l,s}$.

Output: \mathbf{w}_m 和 \mathbf{v}_l .

- 1: **初始化:** 初始可行解 $\mathbf{W}_{l,m}^{(0)}, \mathbf{V}_l^{(0)}$ 通过求解消除约束 (14e) 的松弛问题 (14) 得到;
 - 2: **参数设置:** 迭代精度为 ϵ_1, ϵ_2 , 最大迭代次数 $T_{\max} = 20$, 罚函数因子 τ_m, μ_l , 以及罚函数迭代系数 k_m, k_l ;
 - 3: **While** $|\text{tr}(\mathbf{W}_m^{(t)}) - \lambda_{\max}(\mathbf{W}_m^{(t)})| > \epsilon_1$ and $|\text{tr}(\mathbf{V}_l^{(t)}) - \lambda_{\max}(\mathbf{V}_l^{(t)})| > \epsilon_2$;
 - 4: **Or** $t \leq T_{\max}$ **do**
 - 5: 利用 CVX 求解问题 (23);
 - 6: 更新优化变量 $\mathbf{W}_m^{(t)}$ and $\mathbf{V}_l^{(t)}$;
 - 7: 更新迭代次数 $t = t + 1$, 罚函数因子 $\tau_m^{(t)} = k_m \tau_m^{(t+1)}$ and $\mu_l^{(t)} = k_l \mu_l^{(t+1)}$;
 - 8: **end**
 - 9: **最后:** 利用特征值分解得到 \mathbf{w}_m^* 和 \mathbf{v}_l^* .
-

3.2 算法复杂度和收敛性分析

本小节将分析 LEO-SIoT 网络鲁棒预编码算法的复杂度和收敛性. 由于问题 (23) 属于 SOCP 问题, 因此可以通过经典的内点法 (interior-point method, IPM) [27] 来求解. 为了简化分析, 本小节假设 LEO₁ 在重叠区域拥有 a_1 个 UEs 且 LEO₂ 在重叠区域拥有 a_2 个 UEs. 算法复杂度通常和优化变量维度以及约束条件强相关. 问题 (23) 有 $2(K_1 + K_2 + N_{\text{sat}})$ 个标量约束, $(K_1 + K_2 - a_1 - a_2)$ 个 N_{sat} 维线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 约束, $(a_1 + a_2)$ 个 $2N_{\text{sat}}$ 维 LMI 约束, $(a_1 + a_2)$ 个 $(4N_{\text{sat}}^2 + 2N_{\text{sat}} + 1)$ 维二阶凸锥 (second-order cone, SOC) 约束和 $(K_1 + K_2 - a_1 - a_2)$ 个 $(N_{\text{sat}}^2 + N_{\text{sat}} + 1)$ 维 SOC 约束. 根据经典 IPM 算法复杂度分析方法 [28], 对于给定的 $\epsilon > 0$, 求解问题 (23) 的 ϵ 精度最优解的复杂度包含两部分: 迭代复杂度 $\ln(\frac{1}{\epsilon})\sqrt{\delta}$, 其中 $\delta = 4(K_1 + K_2) + (K_1 + K_2 + a_1 + a_2 + 2)N_{\text{sat}}$; 每轮迭代的计算成本 ϖ 约为 $\mathcal{O}((K_1 + K_2)N_{\text{sat}}^6)$. 总的计算复杂度可以表示为 $\ln(\frac{1}{\epsilon})\sqrt{\delta}\varpi$. 此外, 根据文献 [29], 可以得知每轮迭代过程中凸问题 (23) 的目标函数均存在上下界, 因此所提算法在可行域内能收敛至最优解. 算法收敛的速度和 SIoT 网络具体参数有关, 例如从图 2 可以看出, UE 的中断概率越低则算法收敛所需迭代次数就越多.

4 仿真结果

本节将给出具体的仿真结果来校验不同维度中鲁棒预编码算法的性能. 设置参数 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10^{-3}$, $\tau_m = \tau_l = 1$, $\alpha_{1,m,\{n=1,2,3\}} = [1/7, 2/7, 4/7]$, $\alpha_{2,l,\{s=1,2,3\}} = [1/7, 2/7, 4/7]$, $k_m = 1.2$, 以及 $k_l = 1.2$. 此外, 根据文献 [16, 30], 系统参数设置如表 2 所示. 为了便于分析, 假设两颗卫星的所有重叠区域用户都均匀分布在重叠区域内.

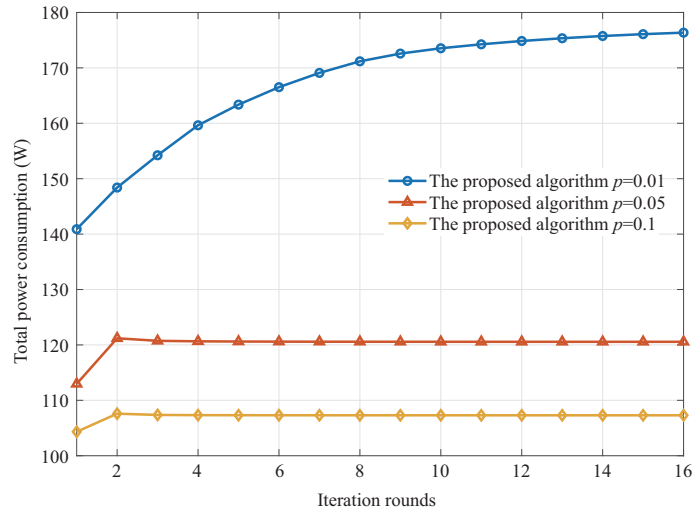


图 2 (网络版彩图) 不同中断概率对于算法 1 收敛性能影响对比

Figure 2 (Color online) Comparison of the effects of different outage probabilities on the convergence performance of Algorithm 1

表 2 LEO-SIOT 网络主要参数

Table 2 Main parameters of LEO-SIOT network

Parameter	Value
Satellite orbit	LEO
Number of beams (LEO ₁ /LEO ₂)	$L = 6/M = 6$
Number of overlapping beams (LEO ₁ /LEO ₂)	$A_1 = 1/A_2 = 1$
Number of total UEs (LEO ₁ /LEO ₂)	$K_1 = 18/K_2 = 18$
Number of UEs in a beam (LEO ₁ /LEO ₂)	$N_m = 3/S_l = 3$
Number of antennas	$N_{\text{sat}} = 31$
Imperfect SIC coefficient (LEO ₁ /LEO ₂)	$\eta_{l,m,n} = \eta_{2,l,s} = 0.05$
Variance of AWGN (LEO ₁ /LEO ₂)	$\sigma_{1,m,n}^2 = \sigma_{2,l,s}^2 = 1$
Channel phase error (LEO ₁ /LEO ₂)	$\epsilon_{1,m,n} = \epsilon_{2,l,s} = 5^\circ$
Outage probability of each UE (LEO ₁ /LEO ₂)	$p_{1,m,n} = p_{2,l,s} = 0.1$
Per-antenna power constraint (LEO ₁ /LEO ₂)	$P_{1,k} = P_{2,t} = 5$
Carrier bandwidth	10 MHz
Carrier frequency	10~20 GHz
Altitude of orbit	800~1200 km
3 dB angle	5°
Maximum satellite antenna gain	16 dBi
Signal received gain per noise temperature	$G_{l,s}/T = 30$ (dB/K)
Boltzmann's constant	1.38×10^{-23} J/K
Rain fading mean	-2.6 dB
Rain fading variance	1.63 dB

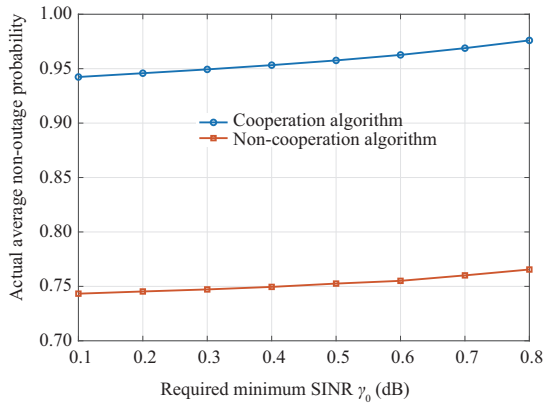


图 3 (网络版彩图) 合作场景和非合作场景下 UEs 的实际非中断概率

Figure 3 (Color online) The actual average non-outage probability of the cooperation algorithm and non-cooperation algorithm

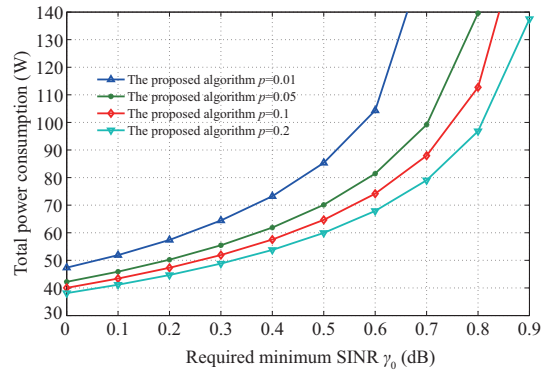


图 4 (网络版彩图) 不同中断概率约束下算法 1 总功率消耗与最小 SINR 关系曲线

Figure 4 (Color online) Total transmit power versus required minimum SINR for different outage probabilities on the proposed Algorithm 1

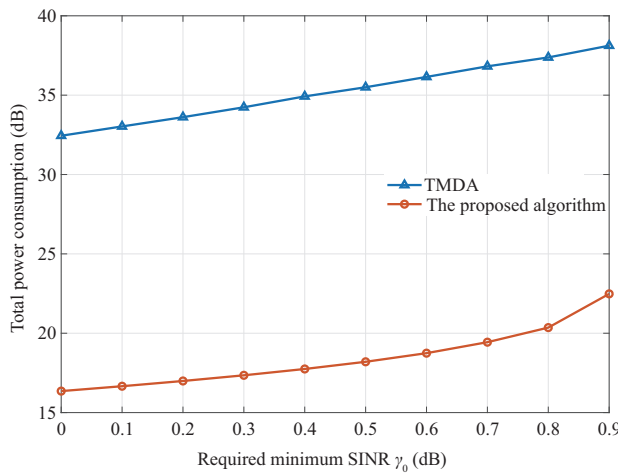


图 5 (网络版彩图) OMA 和 NOMA 方法的性能对比图

Figure 5 (Color online) The performance comparison between OMA and NOMA schemes

首先, 图 3 证明了星间合作机制在 LEO-SIoT 网络中的重要性. 可以看到在合作场景下 UE 的实际中断概率远远小于非合作场景下 UEs 的实际中断概率, 这是由于星间网络存在同频干扰导致 UEs 的接收信号强度变低.

图 4 展示了不同中断概率对于算法性能的影响. 可以看到仿真结果与理论推导一致, 即越严格的 QoS 要求会导致越高的功率消耗. 其中, $p = 0.01$ 和 $p = 0.05$ 两种情形下的算法性能差距远大于其他情形. 因此, 算法所受中断概率影响具有一个敏感下界, 当中断概率低于下界值时, 所提的鲁棒算法性能受到中断概率影响的程度将变小.

然后, 图 5 比较了不同接入方法下 LEO-SIoT 网络的总功率消耗. 在 TDMA^[31] 方式中, LEO₁ 和 LEO₂ 同一时刻各自服务一个 UE. 从图中可以看出, 在相同的 SINR 约束下, 基于 NOMA 的功率消

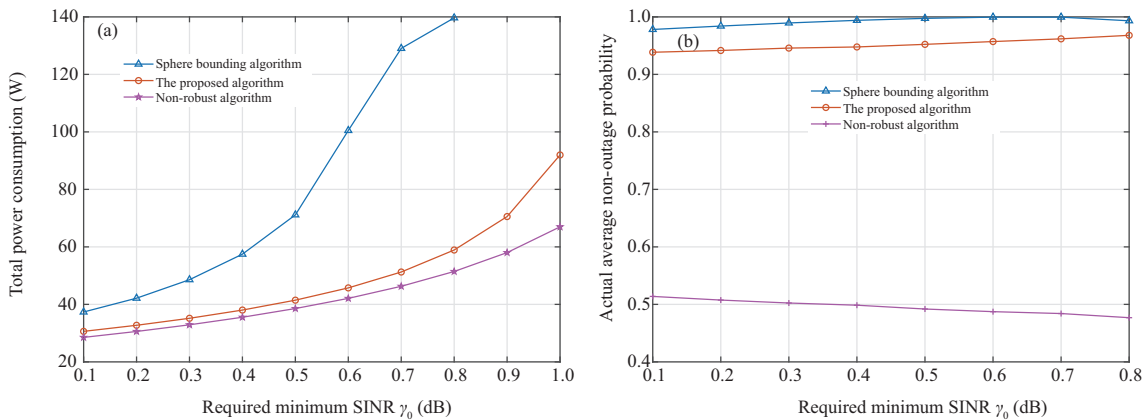


图 6 (网络版彩图) (a) 不同预编码算法的性能对比; (b) 不同预编码算法的实际平均非中断概率

Figure 6 (Color online) (a) The performance comparison of different precoding algorithms; (b) the actual average non-outage probability of different beamforming algorithms

耗远远低于基于 TDMA 的功率消耗, 这是由于 NOMA 技术充分利用频率资源且预编码技术在多天场景下能有效发挥多路复用的优势. 因此在 LEO-SIoT 网络中, NOMA 相比传统的接入方式更加高效.

最后, 图 6(a) 展示了不同预编码算法的性能, 对比算法选取经典的 sphere bounding 鲁棒算法^[32]以及非鲁棒预编码算法 (非鲁棒算法即为单纯设计一个 SDP 问题不考虑信道误差存在以及将 SINR 中断概率约束简化为 SINR 约束). 由于 sphere bounding 鲁棒算法复杂度过高, 本轮仿真将天线数量修改为 21 且总 UE 数量设置为 12. 在图 6(a) 中, 非鲁棒算法消耗的功率最少而 sphere bounding 鲁棒算法消耗功率最高. 在低 SINR 条件下, 三者性能差距不大. 然而随着 SINR 的增大, sphere bounding 鲁棒算法消耗的功率急剧增加. 3 个算法的实际中断概率如图 6(b) 所示, 其中非鲁棒算法的中断概率几乎达到 50%, 这是实际系统无法接受的. 仿真结果直接证明对于存在信道误差的系统, 鲁棒算法设计的重要性. 此外, 可以看到 sphere bounding 鲁棒算法的中断概率比本文所提算法更小, 这也是 sphere bounding 鲁棒算法消耗功率更高的原因, 因为 sphere bounding 鲁棒算法利用更高的功率来实现更严格的中断性能. 然而, 在两图中, sphere bounding 鲁棒算法在 SINR = 0.8 dB 的情况下均出现了一个下降趋势, 这是由于仿真时 sphere bounding 鲁棒算法在迭代达到最大次数后依然没有收敛到秩为 1 的可行解, 从而造成了性能损失, 表明 sphere bounding 鲁棒算法在高 SINR 要求下存在缺陷. 观察仿真结果可知, 本文所提鲁棒算法同时兼具鲁棒性和有效性.

5 结论

为了实现全球 IoT 网络的无缝连接, 本文提出了一种基于星间合作机制的 LEO-SIoT 网络用以支撑海量广域分布设备接入. 结合实际卫星通信系统, 本文针对信道误差提出了基于星间合作的 LEO-SIoT 网络的鲁棒预编码问题. 然后通过多种数学定理将原问题转化为可解凸问题, 并设计一种可行鲁棒预编码算法. 仿真结果证明了本文所提鲁棒预编码算法的有效性和鲁棒性.

参考文献

- 1 Chettri L, Bera R. A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems. IEEE Int Things

- J, 2020, 7: 16–32
- 2 Shao X, Chen X, Zhong C, et al. A unified design of massive access for cellular Internet of Things. *IEEE Int Things J*, 2019, 6: 3934–3947
 - 3 Liu G Y, Huang Y H, Li N, et al. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030. *China Commun*, 2020, 17: 92–104
 - 4 Chen S Z, Sun S H, Kang S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication — the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G. *China Commun*, 2020, 17: 156–171
 - 5 Lee Y L, Qin D H, Wang L C, et al. 6G massive radio access networks: key applications, requirements and challenges. *IEEE Open J Veh Technol*, 2021, 2: 54–66
 - 6 Wang C, Liu L, Ma H, et al. A joint optimization scheme for hybrid MAC layer in LEO satellite supported IoT. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 11822–11833
 - 7 Zhen L, Bashir A K, Yu K, et al. Energy-efficient random access for LEO satellite-assisted 6G Internet of remote Things. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 5114–5128
 - 8 Centenaro M, Costa C E, Granelli F, et al. A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT. *IEEE Commun Surv Tut*, 2021, 23: 1693–1720
 - 9 Bai L, Zhu L N, Choi J, et al. Cooperative transmission over Rician fading channels for geostationary orbiting satellite collocation system. *IET Commun*, 2017, 11: 538–547
 - 10 Bai L, Zhu L, Zhang X J, et al. Multi-satellite relay transmission in 5G: concepts, techniques, and challenges. *IEEE Netw*, 2018, 32: 38–44
 - 11 Motzigemba M, Zech H, Biller P. Optical inter satellite links for broadband networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Recent Advances in Space Technologies (ICRAST)*, 2019. 509–512
 - 12 Heine F, Kmpfner H, Czichy R, et al. Optical inter-satellite communication operational. In: *Proceedings of Military Communications Conference (MILCOM)*, 2010. 1583–1587
 - 13 Jia X H, Lv T, He F, et al. Collaborative data downloading by using inter-satellite links in LEO satellite networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2017, 16: 1523–1532
 - 14 Chen X M, Jia R D, Ng D W K. On the design of massive non-orthogonal multiple access with imperfect successive interference cancellation. *IEEE Trans Commun*, 2019, 67: 2539–2551
 - 15 Yan X J, An K, Liang T, et al. The application of power-domain non-orthogonal multiple access in satellite communication networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 63531–63539
 - 16 Wang W J, Liu A, Zhang Q, et al. Robust multigroup multicast transmission for frame-based multi-beam satellite systems. *IEEE Access*, 2018, 6: 46074–46083
 - 17 Gharanjik A, Shankar M R B, Arapoglou P D, et al. Robust precoding design for multibeam downlink satellite channel with phase uncertainty. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, South Brisbane, 2015. 3083–3087
 - 18 Zhang X, Wang J J, Jiang C X, et al. Robust beamforming for multibeam satellite communication in the face of phase perturbations. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 3043–3047
 - 19 Chu J H, Chen X M, Zhong C J, et al. Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite Internet of Things. *IEEE Int Things J*, 2021, 8: 1959–1970
 - 20 Lin M, Lin Z, Zhu W P, et al. Joint beamforming for secure communication in cognitive satellite terrestrial networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2018, 36: 1017–1029
 - 21 Taricco G. Linear precoding methods for multi-beam broadband satellite systems. In: *Proceedings of the 20th European Wireless Conference*, 2014
 - 22 Ali M S, Hossain E, Kim D I. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for downlink multiuser MIMO systems: user clustering, beamforming, and power allocation. *IEEE Access*, 2017, 5: 565–577
 - 23 Chen X M, Zhang Z Z, Zhong C J, et al. Exploiting multiple-antenna techniques for non-orthogonal multiple access. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2017, 35: 2207–2220
 - 24 Yue M C, Wu S X, So A M C. A robust design for MISO physical-layer multicasting over line-of-sight channels. *IEEE Signal Process Lett*, 2016, 23: 939–943
 - 25 Bechar I. A Bernstein-type inequality for stochastic processes of quadratic forms of Gaussian variables. 2009. ArXiv:0909.3595

- 26 Grant M, Boyd S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, Version 3.0 Beta. <http://cvxr.com/cvx>
- 27 Boyd S, Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- 28 Wang K Y, So A M C, Chang T H, et al. Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: tractable approximations by conic optimization. *IEEE Trans Signal Process*, 2014, 62: 5690–5705
- 29 Lin Z, Lin M, Wang J B, et al. Robust secure beamforming for 5G cellular networks coexisting with satellite networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2018, 36: 932–945
- 30 Deng B, Jiang C, Yan J, et al. Joint multigroup precoding and resource allocation in integrated terrestrial-satellite networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 8075–8090
- 31 Mosen P. Multiple-access capacity in mobile user satellite systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1995, 13: 222–231
- 32 Qi Q, Chen X M, Ng D W K. Robust beamforming for NOMA-based cellular massive IoT with SWIPT. *IEEE Trans Signal Process*, 2020, 68: 211–224

Robust precoding design for inter-satellite cooperation-based low-earth orbit satellite Internet of Things

Jianhang CHU & Xiaoming CHEN*

College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

* Corresponding author. E-mail: chen_xiaoming@zju.edu.cn

Abstract With the widespread application of the Internet of Things (IoT), a large demand for supporting massive access of IoT devices distributed over a large area urges researchers to focus on the low-earth orbit (LEO) satellite IoT (SIoT) network. Due to the high-speed movement of LEO satellites, SIoT is composed of dozens of satellites to thousands of LEO satellites covering the whole world, which inevitably causes inter-satellite interference. Hence, in this paper, we propose an inter-satellite cooperation framework for a SIoT network based on non-orthogonal multiple access(NOMA) and multiple-beam techniques, which can support massive access and reduce interference. However, the satellite cannot catch accurate channel state information(CSI), resulting in residual interference. In this context, we formulate a robust precoding optimization problem based on inter-satellite cooperation to minimize the total power consumption of the LEO SIoT network with outage probability constraints on the rates for the IoT devices. Because the original problem is intractable, we utilize some mathematical tools, e.g., second-order Taylor expression, Bernstein-type inequality, and penalty function, to obtain an approximate equivalent second-order cone program (SOCP) problem. Then, we propose a robust precoding algorithm to solve the SOCP problem. Finally, numerical results show the impacts of key system parameters and confirm the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Keywords LEO satellite IoT, robust precoding, non-orthogonal multiple access, inter-satellite cooperation