

子连接有源可重构智能表面辅助的宽带无蜂窝网络能效优化

孙钢灿¹, 王硕¹, 宁冰², 郝万明¹

(1. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 面对无蜂窝网络中超密集基站部署产生的高功耗问题, 提出了一种基于子连接有源可重构智能表面辅助的宽带无蜂窝网络系统。考虑有源智能超表面最大功率约束、放大因子约束和基站端最大功率约束, 构建了一个联合基站和可重构智能表面波束优化的能效最大化问题。由于所形成的优化问题非凸, 提出了一种交替优化方案将原问题转化为多个子问题, 进而利用块坐标下降、拉格朗日对偶变换、多维复二次变换等方法将每个子问题转化为凸优化问题, 通过交替求解每个子问题最终获得原问题的解。仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 有源可重构智能表面; 子连接架构, 无蜂窝网络; 宽带; 能效

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024031

Energy efficiency optimization for sub-connected active reconfigurable intelligent surface-assisted wideband cell-free networks

SUN Gangcan¹, WANG Shuo¹, NING Bing², HAO Wanming¹

1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2. School of Electronic and Information, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China

Abstract: In the face of the high power consumption issue caused by the dense deployment of base stations in cell-free networks, a wideband cell-free network system with sub-connected active reconfigurable intelligent surface (RIS) was proposed. Firstly, based on the constraints of maximum power consumption at the active RIS, amplification factor, and maximum power consumption at the base station, a joint precoding design problem for the base station and RIS was formulated to maximize the energy efficiency. To solve the non-convex problem, advanced techniques including alternating optimization, block coordinate descent, Lagrange dual reconstruction, and multidimensional complex quadratic transformation were applied to transform the original problem into multiple sub-problems. By iteratively solving each sub-problem, the solutions of the original problem was ultimately obtained. The simulation results validate the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: active reconfigurable intelligent surface, sub-connected architecture, cell-free network, wideband, energy efficiency

0 引言

随着无线通信的快速发展, 高速数据流量需求越来越大。超密集基站 (BS, base station) 部署在一

定程度上满足了大容量数据的需求, 但也加剧了小区间干扰^[1]。因此, 无蜂窝 (CF, cell-free) ^[2-3] 网络概念被提出。CF 网络以用户为中心, 多基站联合服务用户, 避免了多小区间干扰, 从而提高了系统

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-10-10

通信作者: 郝万明, iewmhao@zzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62101499, No.62101613); 河南省高校科技创新人才支持计划基金资助项目 (No.24HASTIT038); 河南省科技攻关基金资助项目 (No.222102210068)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62101499, No.62101613), Project Sponsored by Program for Science & Technology Innovation Talents in Universities of Henan Province (No.24HASTIT038), Henan Science and Technology Planning Project (No.222102210068)

吞吐量和覆盖范围。但是，大规模基站部署将带来巨大的功率消耗。最近，可重构智能表面（RIS, reconfigurable intelligent surface）技术由于具备高阵列增益、低成本与低功耗等优点引起了广泛关注^[4-5]，它利用大量反射元件可动态控制无线信号传播环境^[6]，有效提高了无线通信频谱/能效^[7-8]，降低了系统功耗。因此，RIS 辅助的 CF 网络将成为未来无线通信有效候选技术。

文献[9]首次将多个低功耗低成本的 RIS 部署在 CF 网络中，对基站和 RIS 联合设计预编码，并提出更实际的双时间尺度方案，以最大化宽带 CF 网络系统容量。在此基础上，文献[10]研究了 RIS 辅助 CF 网络的物理层安全问题，利用半定松弛和连续凸逼近等方法求解最大加权安全速率问题，仅需获知 RIS 的部分信道状态信息（CSI, channel state information），但以上研究工作并未考虑系统能耗。文献[11]研究了 RIS 辅助 CF 多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）系统，提出了一种混合波束设计方案以最大化系统能效，并研究了 RIS 数量和大小对系统能效的影响。文献[12]研究了宽带 RIS 辅助 CF 网络的能效问题，通过对所有用户在每个子载波下的功率和速率进行约束，用功率分配联合波束成形优化问题，以最大化系统能效。但是，传统无源 RIS 存在“乘性衰落”问题，因此研究者提出了有源 RIS 的概念^[13-14]，即在 RIS 单元处加入功放器件。文献[13]对有源 RIS 的布局优化进行了研究，研究表明在大多数情况下有源 RIS 优于传统无源 RIS。文献[15]将传统 RIS 辅助 CF 网络用有源 RIS 代替，分析了该系统的能效公平性问题，并通过交替优化和分式规划技术提出了一种联合波束形成的资源分配算法。为了深入探究有源和无源 RIS 给 CF 网络带来的性能增益，文献[16]提出将混合有源/无源 RIS 部署于系统中，结果表明该方案系统能效高于单独部署有源或无源 RIS。文献[17]考虑宽带多载波有源 RIS 系统，将所有子载波分为若干组，且每组子载波由单个放大电路和相移电路组成，由此构建了一个和速率最大化波束设计问题，并提出一种有效迭代算法。

但是，全连接有源 RIS 需要大量功放器件，这极大地增加了 RIS 功耗和硬件复杂度。因此，文献[18]提出了一种子连接有源 RIS 结构，该结构中多个 RIS 元件独立控制相移，但共享一个功率放大器，这有效减少了功率放大器数量，提高了系统

能效。文献[19]通过对比系统和速率，验证了子连接有源 RIS 相对于全连接有源 RIS 的优势。

基于以上分析，目前并未有相关文献联合考虑子连接有源 RIS 和宽带 CF 网络，因此本文研究了子连接有源 RIS 辅助的宽带 CF 网络能效问题，其主要工作如下。1) 基于基站最大发射功率约束、子连接有源 RIS 最大可用功率约束和放大因子约束，建立一个通过联合优化基站和 RIS 波束以最大化子连接有源 RIS 辅助的宽带 CF 网络能效问题。2) 该问题为非凸优化问题，本文首先应用分式规划（FP, fractional programming）中的二次变换解耦能效；然后通过拉格朗日对偶重构（LDR, Lagrange dual reconstruction）和多维复二次变换（MCQT, multi-dimensional complex quadratic transformation）对联合波束优化进行解耦，将此问题重构为二次规划问题（QCQP, quadratic constrained quadratic programming）；最后利用块坐标下降（BCD, block coordinate descent）算法交替优化，获得了原始问题的解。仿真结果表明，相比全连接有源 RIS 和无源 RIS，本文所提方案有效提高了系统能效。

符号说明如下。粗体字母表示矩阵和向量，小写斜体字母表示变量， $(\mathbf{Y})^\circ$ 、 $(\mathbf{Y})^\top$ 、 $(\mathbf{Y})^H$ 和 $\mathbf{Y}_{n,n}$ 分别表示矩阵 \mathbf{Y} 的伪逆、转置、共轭转置和矩阵第 n 行第 n 列的值， $\text{diag}(\mathbf{y})$ 表示以向量 \mathbf{y} 为主对角线元素的对角矩阵， $|\cdot|$ 表示模运算， $\|\cdot\|_2$ 表示 2 范数， $\|\cdot\|_F$ 表示 F 范数， \otimes 和 \odot 分别表示克罗内克乘积和 Hadamard 玛乘积， $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 $M \times N$ 的复数矩阵， \mathbf{I}_L 表示 $L \times L$ 的单位矩阵， $\mathbf{0}_{N \times M}$ 表示 $M \times N$ 的零矩阵。 $\mathbf{0}_L$ 和 $\mathbf{1}_L$ 分别表示 $L \times 1$ 的零向量和全 1 向量， \mathbf{Y}^* 表示变量的最优解。

1 系统模型

全连接有源 RIS 和子连接有源 RIS 结构如图 1 所示。全连接有源 RIS 中的相移器和功率放大器成对出现，硬件成本和功耗较高，而子连接有源 RIS 由多个相移器共享一个功率放大器，更加节能。

本文主要考虑子连接有源 RIS， $L = \frac{M}{T}$ 表示功率放大器数量，其中， T 表示每个功率放大器服务子连接架构的 RIS 单元数量，全连接架构可被视为 $T=1$ 时子连接架构的特殊形式； M 表示 RIS 单元总数。有源 RIS 预编码矩阵 $\Psi \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 可以表示为 $\Psi = \text{diag}(\psi)$ ，令 $\psi = \Theta \mathbf{E} \alpha$ ，其中 $\Theta \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为相移

对角矩阵, $\mathbf{A} = \text{diag}(\boldsymbol{\alpha})$, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \dots, \alpha_l]^T$ 为有源 RIS 放大系数矩阵, $\boldsymbol{\mathcal{E}}$ 表示功率放大器和相移电路之间的指示矩阵, 假设 $\boldsymbol{\mathcal{E}} = \mathbf{I}_L \otimes \mathbf{1}_T$ 。

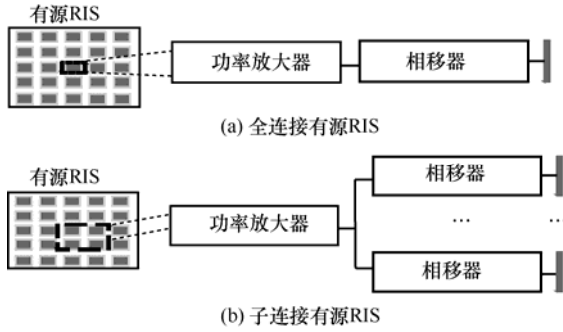


图1 全连接有源 RIS 和子连接有源 RIS 结构

如图2所示, 本文考虑子连接有源 RIS 辅助的宽带 CF 网络系统, B 个基站通过单个有源 RIS 协作服务 K 个单天线用户, 其中, 基站配备 N 根天线, 子载波数为 L , 假设系统可以获得理想的 CSI。

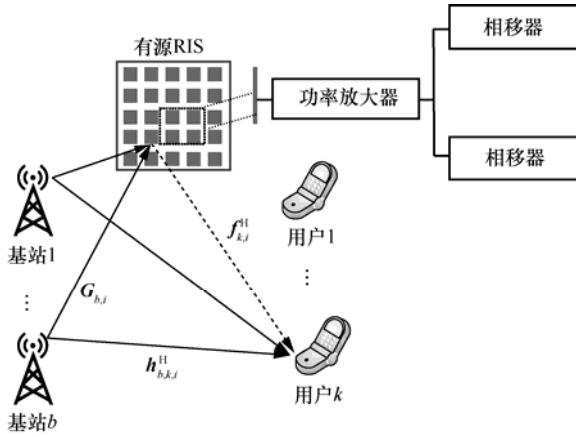


图2 子连接有源 RIS 辅助的宽带 CF 网络系统

用户、子载波、基站、功率放大器和 RIS 单元分别用集合 $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 、 $\mathcal{I} = \{1, \dots, L\}$ 、 $\mathcal{B} = \{1, \dots, B\}$ 、 $\mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$ 和 $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ 表示。第 i 条子载波上基站 b 的发射信号为

$$\mathbf{x}_{b,i} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{b,i,k} s_{i,k} \quad (1)$$

其中, $s_{i,k}$ 表示在第 i 条子载波上发送第 k 个用户的信号, 定义 $\mathbf{s}_i \triangleq [s_{i,1}, \dots, s_{i,K}]^T \in \mathbb{C}^K$, 满足 $\mathbb{E}\{\mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H\} = \mathbf{I}_K, \forall i \in \mathcal{I}$; $\mathbf{w}_{b,i,k} \in \mathbb{C}^N$ 表示第 i 条子载波上基站 b 发送给用户 k 的波束成形向量。

在下行链路中, 频域符号 $s_{i,k}$ 首先由波束成形向量 $\mathbf{w}_{b,i,k}$ 在第 b 个基站进行预编码; 然后, 通过离

散傅里叶逆变换 (IDFT, inverse discrete Fourier transform), 将基站 b 在所有子载波上的频域信号转换为时域信号。加入循环前缀 (CP, cyclic prefix) 后, 发射信号通过 N 个射频链转换到射频域上。 $\mathbf{h}_{b,k,i} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 、 $\mathbf{G}_{b,i} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 和 $\mathbf{f}_{k,i} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 分别代表第 i 条子载波上从基站 b 到用户 k 、从基站 b 到有源 RIS 和从有源 RIS 到用户 k 的信道增益, 由于 B 台基站同时服务 K 个用户, 因此用户 k 接收的信号是所有基站发射信号的叠加, 则其在第 i 条子载波上的接收信号 $y_{k,i}$ 可以表示为

$$y_{k,i} = \sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{b,k,i}^H \mathbf{w}_{b,i,j} s_{i,j} + \mathbf{f}_{k,i}^H \boldsymbol{\Psi} \mathbf{z}_i + n_{k,i} = \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,j} s_{i,j} + \mathbf{f}_{k,i}^H \boldsymbol{\Psi} \mathbf{z}_i + n_{k,i} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H}_{b,k,i}^H = (\mathbf{h}_{b,k,i}^H + \mathbf{f}_{k,i}^H \boldsymbol{\Psi} \mathbf{G}_{b,i})$ 表示第 i 条子载波上基站到 b 用户 k 的级联信道。定义 $\mathbf{h}_{k,i} \triangleq [\mathbf{h}_{1,k,i}^T, \dots, \mathbf{h}_{B,k,i}^T]^T$ 为基站 b 到用户 k 的信道增益, $\mathbf{w}_{k,i} \triangleq [\mathbf{w}_{1,k,i}^T, \dots, \mathbf{w}_{B,k,i}^T]^T$ 为第 i 条子载波上发送给用户 k 的波束成形向量。此时用户接收的信号为时域信号, 然后转化到下基带, 再经过循环前缀消除和离散傅里叶变换 (DFT, discrete Fourier transform), 最终恢复为频域信号。其中, $\{\mathbf{z}_i, n_{k,i}\} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \{\sigma_z^2, \sigma_n^2\} \mathbf{I})$ 表示频域有源噪声和用户 k 处的频域加性白高斯噪声。因此, 用户 k 在第 i 条子载波上的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) $\gamma_{k,i}$ 表示为

$$\gamma_{k,i} = \frac{|\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{k,i}|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{j,k}|^2 + \|\mathbf{f}_{k,i}^H \boldsymbol{\Psi}\|_{\text{F}}^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{H}_{k,i} \triangleq [\mathbf{H}_{1,k,i}^T, \dots, \mathbf{H}_{B,k,i}^T]^T$ 表示第 i 条子载波上用户 k 的级联信道。因此, 系统可达和速率 R_{sum} 可表示为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L \text{lb}(1 + \gamma_{k,i}) \quad (4)$$

系统总能耗主要包括基站处发射功率、有源 RIS 的功耗以及其他硬件电路功耗, 表示为

$$P_{\text{total}} = \xi \sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L \|\mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + P_{\text{r}} + BW_{\text{BS}} + KW_{\text{U}} \quad (5)$$

其中, $\xi \in (0,1]$ 为基站的能量转换效率, W_{BS} 为每个基站的电路功耗, W_U 为单个用户的电路功耗, P_r 为子连接有源 RIS 功耗, 表示为

$$P_r = \zeta \left(\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \right) + MW_{PS} + LW_{PA} \quad (6)$$

其中, $\zeta \in (0,1]$ 为有源 RIS 的能量转换效率, W_{PS} 和 W_{PA} 分别表示移相器和放大器在有源 RIS 处的静态功耗。

本文以最大化系统能效为目标, 形成的资源优化问题可以描述为

$$\max_{\mathbf{W}, \Theta, \mathbf{a}} \eta(\mathbf{W}, \Theta, \mathbf{a}) = \frac{R_{\text{sum}}}{P_{\text{total}}} \quad (7a)$$

$$\text{s.t. } C_1: \xi \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \|\mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + W_{BS} \leq P_{BS}^{\max}, \forall b \in \mathcal{B} \quad (7b)$$

$$C_2: \zeta \left(\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \right) + MW_{PS} + LW_{PA} \leq P_{RIS}^{\max} \quad (7c)$$

$$C_3: |\theta_m| = 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (7d)$$

$$C_4: a_l \leq a_{l,\max}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (7e)$$

其中, P_{BS}^{\max} 为基站的 最大发射功率, P_{RIS}^{\max} 为有源 RIS 最大可用功率, C_3 为相移器幅度约束, C_4 限制了放大因子幅度, $a_{l,\max}$ 表示放大因子的上限。定义相移对角矩阵 $\Theta = \text{diag}(\theta)$ 和数字预编码矩阵

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{1,1}^T, \mathbf{w}_{1,2}^T, \dots, \mathbf{w}_{1,K}^T, \mathbf{w}_{2,1}^T, \mathbf{w}_{2,2}^T, \dots, \mathbf{w}_{2,K}^T, \dots, \mathbf{w}_{I,1}^T, \mathbf{w}_{I,2}^T, \dots, \mathbf{w}_{I,K}^T \end{bmatrix}^T。$$

2 能效最大化问题求解

2.1 整体算法设计

上述问题中 \mathbf{W} 、 \mathbf{a} 和 Θ 高度耦合, 并且目标函数包含分数规划, 因此为非凸优化问题, 直接求解难度较大。本文使用基于 FP 框架的方案, 首先将分式目标函数转化为相减形式, 然后将原问题拆分为多个子问题, 分别使用 LDR、MCQT 和 BCD 将目标函数和非凸约束转化为易求解的 QCQP, 更新优化变量和辅助变量直至满足收敛条件。

2.2 目标函数转化

由于式(7a)中向量 \mathbf{a} 和矩阵 Θ 总是以乘积形式出现, 定义 RIS 反射矩阵 Ψ 合并该变量。首先, 引

入 FP 算法, 采用二次变换方法将能效公式(式(7a))解耦为

$$z_1(\mathbf{W}, \Psi, d) = 2d \sqrt{R_{\text{sum}}(\mathbf{W}, \Psi)} - d^2 P_{\text{total}}(\mathbf{W}, \Psi) \quad (8)$$

其中, d 为辅助变量。基于 BCD 算法, 变量 \mathbf{W} 和 Ψ 保持固定, 令 $\frac{\partial z}{\partial d_{k,i}} = 0$, 可获得最优解^[20]为

$$d^* = \frac{\sqrt{R_{\text{sum}}(\mathbf{W}, \Psi)}}{P_{\text{total}}(\mathbf{W}, \Psi)} \quad (9)$$

由于新的目标函数仍为非凸, 因此采用 LDR 方法对式(8)中的 $R_{\text{sum}}(\mathbf{W}, \Psi)$ 项解耦, 并引入辅助变量 $\rho \in \mathbb{R}^{K \times I}$, 其中 $\rho = [\rho_{1,1}, \dots, \rho_{1,K}, \rho_{2,1}, \dots, \rho_{2,K}, \dots, \rho_{I,1}, \dots, \rho_{I,K}]^T$, 原始问题式(7)重新表述为

$$\max_{\mathbf{W}, \Psi, d, \rho} z_2(\mathbf{W}, \Psi, d^*, \rho) \quad (10)$$

s.t. C_1, C_2, C_3, C_4

目标函数 $z_2(\mathbf{W}, \Psi, d, \rho)$ 表示为

$$z_2(\mathbf{W}, \Psi, d, \rho) = 2d [g(\mathbf{W}, \Psi, \rho)]^{\frac{1}{2}} - d^2 P_{\text{total}}(\mathbf{W}, \Psi) \quad (11)$$

其中

$$g(\mathbf{W}, \Psi, \rho) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \ln(1 + \rho_{k,i}) - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \rho_{k,i} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (1 + \rho_{k,i}) s_{k,i}(\mathbf{W}, \Psi) \quad (12)$$

$$s_{k,i}(\mathbf{W}, \Psi) = \frac{|\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{k,i}|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{j,k}|^2 + \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|_F^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2} \quad (13)$$

然后, 采用 BCD 算法交替优化式(9)中的变量 ρ 、 \mathbf{W} 和 Ψ , 具体过程如下。

2.3 辅助变量 ρ 优化

给定 $(\mathbf{W}^*, \Psi^*, d^*)$, 令 $\frac{\partial z}{\partial \rho_{k,i}} = 0$, 可以得到最优解为

$$\rho_{k,i}^* = \gamma_{k,i} \quad (14)$$

将式(14)中的 $\rho_{k,i}^*$ 代入式(11), 由于式(12)中仅最后一项和 \mathbf{W} 、 Ψ 有关, 式(10)可进一步求解。

2.4 基站数字预编码矩阵优化

给定 Ψ^* 、 ρ^* 和 d^* , 忽略常数项, 新的优化问题为 $\max_{\mathbf{W}} z_3(\mathbf{W}) =$

$$2d \left[\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I g_{k,i} s_{k,i}(\Psi^*, \mathbf{W}) \right]^{\frac{1}{2}} - d^2 P_{\text{total}}(\Psi^*, \mathbf{W}) \quad (15a)$$

$$\text{s.t. } C_1: \xi \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \|\mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + W_{\text{BS}} \leq P_{\text{BS}}^{\max}, \forall b \in \mathcal{B} \quad (15b)$$

$$C_2: \zeta \left(\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \right) + MW_{\text{PS}} + LW_{\text{PA}} \leq P_{\text{RIS}}^{\max} \quad (15c)$$

其中, $\vartheta_{k,i} = (1 + \rho_{k,i}^*)$ 。本节采用 MCQT 方法解决式(15a)中的高维非凸性^[21], 引入辅助变量 $\beta_{k,i} \in \mathbb{C}$ 且 $\beta = [\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \dots, \beta_{1,I}, \beta_{2,1}, \beta_{2,2}, \dots, \beta_{2,I}, \dots, \beta_{K,1}, \beta_{K,2}, \dots, \beta_{K,I}]$, 式(15)转换为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{W}, \beta} z_3(\mathbf{W}, \beta) \\ \text{s.t. } C_1, C_2 \end{aligned} \quad (16)$$

新的目标函数 $z_3(\mathbf{W}, \beta)$ 表示为

$$\begin{aligned} z_3(\mathbf{W}, \beta) = 2d \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I 2\sqrt{\vartheta_{k,i}} \Re\{\beta_{k,i} \mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,k}\} - \right. \\ \left. \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \beta_{k,i}^H \left[\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,j} (\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,j})^H + \right. \right. \\ \left. \left. \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right] \beta_{k,i} \right\}^{\frac{1}{2}} - d^2 \xi \sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \|\mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \\ \zeta \sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

因此, \mathbf{W} 的更新可分为 2 个步骤, 依次更新 β 和 \mathbf{W} , 则式(16)可表述为 2 个子问题。

1) 固定 \mathbf{W} , 解决 β^* 。令 $\frac{\partial z_3}{\partial \beta_{k,i}} = 0$, $\beta_{k,i}$ 最优

解为

$$\begin{aligned} \beta_{k,i}^* = \sqrt{\vartheta_{k,i}} \left[\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,j} (\mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,j})^H + \right. \\ \left. \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{k,i}^H \mathbf{w}_{i,k} \end{aligned} \quad (18)$$

2) 固定 β , 解决 \mathbf{W}^* 。式(16)可转换为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} z_5(\mathbf{W}) = -2d(-\mathbf{W}^H \mathbf{U} \mathbf{W} + 2\Re\{\mathbf{O}^H \mathbf{W}\} - \tau)^{\frac{1}{2}} + \\ d^2 (\xi \mathbf{W}^H \mathbf{W} + \zeta \mathbf{W}^H \mathbf{Z} \mathbf{W}) \\ \text{s.t. } \bar{C}_1: \xi \mathbf{W}^H \mathbf{C}_b \mathbf{W} \leq P_{\text{BS}}, \forall b \in \mathcal{B} \\ \bar{C}_2: \zeta \mathbf{W}^H \mathbf{D} \mathbf{W} \leq P_{\text{RIS}} - \zeta \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \end{aligned} \quad (19)$$

定义 $P_{\text{BS}} = P_{\text{BS}}^{\max} - W_{\text{BS}}$ 和 $P_{\text{RIS}} = P_{\text{RIS}}^{\max} - MW_{\text{PS}} -$

LW_{PA} 分别表示除去硬件功耗后的基站发射功率和有源 RIS 发射功率, 并且得到矩阵表达式如下

$$\begin{aligned} \mathbf{O}_{k,i} = \sqrt{\vartheta_{k,i}} \mathbf{H}_{k,i} \beta_{k,i}, \\ \mathbf{O} = [\mathbf{O}_{1,1}^T, \mathbf{O}_{1,2}^T, \dots, \mathbf{O}_{1,K}^T, \mathbf{O}_{2,1}^T, \mathbf{O}_{2,2}^T, \dots, \mathbf{O}_{I,K}^T]^T \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\mathbf{U} = \text{diag}(\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_I),$$

$$\mathbf{u}_i = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{k,i} \beta_{k,i} \beta_{k,i}^H \mathbf{H}_{k,i}^H, \quad \mathbf{U}_i = \mathbf{I}_k \otimes \mathbf{u}_i \quad (20b)$$

$$\tau = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \beta_{k,i}^H \left(\|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right) \beta_{k,i} \quad (20c)$$

$$\mathbf{Z}_{b,i} = \mathbf{I}_i \otimes (\mathbf{G}_{b,i}^H \Psi^H \Psi \mathbf{G}_{b,i})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} = \text{diag}[\mathbf{Z}_{1,1}^T, \mathbf{Z}_{1,2}^T, \dots, \mathbf{Z}_{1,I}^T, \mathbf{Z}_{2,1}^T, \mathbf{Z}_{2,2}^T, \dots, \\ \mathbf{Z}_{2,I}^T, \dots, \mathbf{Z}_{b,1}^T, \mathbf{Z}_{b,2}^T, \dots, \mathbf{Z}_{b,I}^T]^T \end{aligned} \quad (20d)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{Z} \quad (20e)$$

$$\mathbf{C}_b = \mathbf{I}_{KI} \otimes \{(e_b e_b^H) \otimes \mathbf{I}_N\} \quad (20f)$$

式(19)是一个标准的 QCQP, 因此最优解 \mathbf{W}^* 可以通过 CVX 工具箱解决。

2.5 RIS 反射矩阵优化

当给定 \mathbf{W}^* , ρ^* 和 d^* 时, 式(10)可以改写为

$$\begin{aligned} \max_{\Psi} z_6(\Psi) = 2d \left[\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \vartheta_{k,i} s_{k,i}(\mathbf{W}^*, \Psi) \right]^{\frac{1}{2}} - \\ d^2 P_{\text{total}}(\mathbf{W}^*, \Psi) \\ \text{s.t. } C_2: \zeta \left(\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \right) + \\ MW_{\text{PS}} + LW_{\text{PA}} \leq P_{\text{RIS}}^{\max} \\ C_3 \sim C_4 \end{aligned} \quad (21)$$

定义 $\mathbf{Q}_{k,i,j}(\Psi) = \sum_{b=1}^B (\mathbf{h}_{b,k,i}^H + \mathbf{f}_{k,i}^H \Psi \mathbf{G}_{b,i}) \mathbf{w}_{b,i,j}$, 则

式(21)中的目标函数等价于

$$\begin{aligned} z_6(\Psi) = 2d \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sqrt{\vartheta_{k,i}} \mathbf{Q}_{k,i,k}^H(\Psi) \left[\sum_{j=1}^K \mathbf{Q}_{k,i,j}(\Psi) \mathbf{Q}_{k,i,k}^H(\Psi) + \right. \right. \\ \left. \left. \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|_{\mathbb{F}}^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right]^{-1} \mathbf{Q}_{k,i,k}(\Psi) \right\}^{\frac{1}{2}} - \\ d^2 \zeta \left(\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \|\Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,k}\|^2 + \|\Psi\|^2 \sigma_z^2 \right) \end{aligned} \quad (22)$$

利用 MCQT 方法解决式(22)的高维非凸性, 引入辅助变量 $\mathbf{l} = [\mathbf{l}_{1,1}, \mathbf{l}_{1,2}, \dots, \mathbf{l}_{1,K}, \mathbf{l}_{2,1}, \mathbf{l}_{2,2}, \dots, \mathbf{l}_{2,K}, \dots,$

$\mathbf{t}_{I,1}, \mathbf{t}_{I,2}, \dots, \mathbf{t}_{I,K}$], 得到优化问题为

$$\max_{\mathbf{t}, \Psi} z_7(\mathbf{t}, \Psi) = 2d \left[\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I g_{k,i}(\mathbf{t}, \Psi) \right]^{\frac{1}{2}} - d^2 P_{\text{total}}(\Psi)$$

s.t. C_2, C_3, C_4 (23)

其中

$$g_{k,i}(\mathbf{t}, \Psi) = 2\sqrt{g_{k,i}} \Re \left\{ \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{Q}_{k,i,k}(\Psi) \right\} - \mathbf{t}_{k,i}^H \left[\sum_{j=1}^K \mathbf{Q}_{k,i,j}(\Psi) \mathbf{Q}_{k,i,j}^H(\Psi) + \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 \right] + \sigma_n^2 \mathbf{t}_{k,i}$$

(24)

依次更新 \mathbf{t} 和 Ψ , 以上优化问题表述为以下 2 个子问题。

1) 固定 Ψ , 令 $\frac{\partial z_7}{\partial \mathbf{t}_{k,i}} = 0$, 则

$$\mathbf{t}_{k,i}^* = \sqrt{g_{k,i}} \left[\sum_{j=1}^K \mathbf{Q}_{k,i,j}(\Psi) \mathbf{Q}_{k,i,j}^H(\Psi) + \|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right]^{-1} \mathbf{Q}_{k,i,k}(\Psi)$$

(25)

2) 固定 \mathbf{t} , 定义 $\alpha_{k,i,j} = \mathbf{h}_{b,k,i}^H \mathbf{w}_{b,i,j}$, $\mathbf{v} = \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j}$

则

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{Q}_{k,i,j}(\Psi) &\triangleq \sum_{b=1}^B (\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{h}_{b,k,i}^H \mathbf{w}_{b,i,j} + \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H \Psi \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j}) \triangleq \\ &\sum_{b=1}^B \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{h}_{b,k,i}^H \mathbf{w}_{b,i,j} + \psi^H \sum_{b=1}^B \text{diag}(\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H) \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j} \triangleq \\ &\mathbf{t}_{k,i}^H \alpha_{k,i,j} + \psi^H \text{diag}(\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H) \mathbf{v}_{i,j} \end{aligned}$$

(26)

所以

$$\begin{aligned} g_{k,i}(\Psi) &= 2\sqrt{g_{k,i}} \Re \left\{ \sum_{b=1}^B \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{h}_{b,k,i}^H \mathbf{w}_{b,i,j} + \right. \\ &\left. \psi^H \sum_{b=1}^B \text{diag}(\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H) \mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j} \right\} - \sum_{j=1}^K \left[\mathbf{t}_{k,i}^H \alpha_{k,i,j} + \right. \\ &\left. \psi^H \text{diag}(\mathbf{v}_{i,j}^*) \mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i} \right] \left[\alpha_{k,i,j}^* \mathbf{t}_{k,i} + \mathbf{f}_{k,i}^H \mathbf{t}_{k,i} \text{diag}(\mathbf{v}_{i,j}) \psi \right] - \\ &\mathbf{t}_{k,i}^H \left(\|\mathbf{f}_{k,i}^H \Psi\|^2 \sigma_z^2 + \sigma_n^2 \right) \mathbf{t}_{k,i} \end{aligned}$$

(27)

根据式(23)和式(27), 有源 RIS 的反射矩阵优化问题可等价于

$$\begin{aligned} \min_{\Psi} & (-2d(\Re\{2\psi^H \boldsymbol{\tau}\} - \psi^H \mathbf{Y} \psi - \delta))^{\frac{1}{2}} + \\ & d^2 \zeta \psi^H \mathbf{E} \psi \\ \text{s.t. } & \tilde{C}_2: \zeta \psi^H \boldsymbol{\Omega} \psi \leq P_{\text{RIS}} \\ & C_3 \sim C_4 \end{aligned}$$

(28)

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sqrt{g_{k,i}} \text{diag}(\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H) \mathbf{v}_{i,k} - \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^K \alpha_{k,i,j}^* \mathbf{t}_{k,i} \text{diag}(\mathbf{t}_{k,i}^H \mathbf{f}_{k,i}^H) \mathbf{v}_{i,j} \end{aligned}$$

(29a)

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I |\mathbf{t}_{k,i}|^2 \sum_{j=1}^K \text{diag}(\mathbf{v}_{i,j}^*) \mathbf{f}_{k,i} \mathbf{f}_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{v}_{i,j}) + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I |\mathbf{t}_{k,i}|^2 \text{diag}(\mathbf{f}_{k,i} \odot \mathbf{f}_{k,i}^H) \sigma_z^2 \end{aligned}$$

(29b)

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^K \mathbf{t}_{k,i}^H |\alpha_{k,i,j}|^2 \mathbf{t}_{k,i} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \mathbf{t}_{k,i}^H \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \mathbf{t}_{k,i} - \\ & 2 \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sqrt{g_{k,i}} \Re \left\{ \mathbf{t}_{k,i}^H \alpha_{k,i,k} \right\} \end{aligned}$$

(29c)

$$\mathbf{E} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{b=1}^B \text{diag}(\mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j}) \left(\text{diag}(\mathbf{G}_{b,i} \mathbf{w}_{b,i,j}) \right)^H + \sigma_z^2 \mathbf{I}_M$$

(29d)

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{E}$$

(29e)

式(29)也是一个典型的 QCQP, 可以由 CVX 工具箱直接求解^[22], 相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}^*$ 和放大因子 \mathbf{a}^* 为

$$\boldsymbol{\Theta}^* = \text{diag}(\exp(\text{jarg}(\psi^*)))$$

(30a)

$$\mathbf{a}^* = \boldsymbol{\Xi}^{\cup} \text{diag}(\exp(-\text{jarg}(\psi^*))) \psi^*$$

(30b)

最大化能效联合预编码如算法 1 所示, 变量 d 、 $\boldsymbol{\beta}$ 、 \mathbf{t} 、 \mathbf{W} 和 Ψ 交替更新, 直到目标函数收敛。

算法 1 最大化能效联合预编码

初始化 参数 $\mathbf{h}_{b,k,i}$ 、 $\mathbf{G}_{b,i}$ 、 $\mathbf{f}_{k,i}$ 、 σ_z^2 、 σ_n^2 、 $P_{\text{RIS}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{BS}}^{\text{max}}$ 、 $\mathbf{W}^{(r)}$ 、 $\mathbf{a}^{(r)}$ 、 $\boldsymbol{\Theta}^{(r)}$, 迭代次数 $r \geq 1$, 最大迭代次数 r_{max} , 收敛精度 $\varpi \geq 10^{-4}$

1) while $|\eta^{(r)} - \eta^{(r-1)}| \geq \varpi$ 或 $r \leq R_{\text{max}}$ do

2) repeat

3) 固定 $\mathbf{W}^{(r)}$ 和 $\Psi^{(r)}$, 求解式(9)得到 d^* , 并更新 $d^{(r+1)}$

- 4) 固定 $\mathbf{W}^{(r)}$ 、 $\Psi^{(r)}$ 和 $d^{(r+1)}$ ，求解式(14)得到 ρ^* 并更新 $\rho^{(r+1)}$
- 5) 固定 $d^{(r+1)}$ 、 $\rho^{(r+1)}$ 、 $\Psi^{(r)}$ 和 $\mathbf{W}^{(r)}$ ，求解式(18)得到 β^* 并更新 $\beta^{(r+1)}$
- 6) 固定 $d^{(r+1)}$ 、 $\rho^{(r+1)}$ 、 $\Psi^{(r)}$ 和 $\beta^{(r+1)}$ ，求解式(19)得到波束成形向量优化值 \mathbf{W}^* ，并更新 $\mathbf{W}^{(r+1)}$
- 7) 固定 $d^{(r+1)}$ 、 $\rho^{(r+1)}$ 、 $\Psi^{(r)}$ 和 $\mathbf{W}^{(r+1)}$ ，求解式(25)得到 \mathbf{i}^* ，并更新 $\mathbf{i}^{(r+1)}$
- 8) 固定 $d^{(r+1)}$ 、 $\rho^{(r+1)}$ 、 $\mathbf{i}^{(r+1)}$ 和 $\mathbf{W}^{(r+1)}$ ，求解式(28)得到 ψ^* ，由 $\Psi = \text{diag}(\psi)$ 得到 RIS 反射矩阵优化值 Ψ^* ，并更新 $\Psi^{(r+1)}$
- 9) 通过式(30a)和式(30b)分别得到 Θ^* 和 \mathbf{a}^* ，依次更新 $\Theta^{(r+1)}$ 和 $\mathbf{a}^{(r+1)}$
- 10) until 收敛
- 11) 设置迭代次数 $r = r + 1$ 并将 $\{\mathbf{W}^{(r+1)}, \Theta^{(r+1)}, \mathbf{a}^{(r+1)}\}$ 代入计算 $\eta^{(r)}$
- 12) end while
- 13) 直到满足收敛精度或到达最大迭代次数，得到最优的 $\{\mathbf{W}^* = \mathbf{W}^{(r+1)}, \Theta^* = \Theta^{(r+1)}, \mathbf{a}^* = \mathbf{a}^{(r+1)}\}$

3 算法分析

3.1 收敛性和最优性

所提算法中的交替迭代，即式(9)、式(14)、式(18)、式(19)、式(25)和式(28)交替更新变量，在其他变量固定及资源有限的条件下，可得到相应子问题的最优解，且使目标函数单调增加直至收敛，因此可至少获得局部最优。

3.2 复杂度分析

所提算法的复杂度主要由 ρ 、 β 、 \mathbf{i} 、 \mathbf{W} 和 Ψ 的更新来确定。具体来说，更新 ρ 的复杂度为 $\mathcal{O}(IK(KBN + M^2))$ ，更新 β 的复杂度为 $\mathcal{O}(IK(BN(K+1) + M^2))$ ，更新 \mathbf{i} 的复杂度为 $\mathcal{O}(IK(K+2 + M^2))$ 。不同于 ρ 和 β 的更新具有封闭的表达式， \mathbf{W}^* 和 Ψ^* 仅能通过迭代优化方法求解 QCQP 来获得。因此 ρ 、 β 和 \mathbf{i} 的复杂度远低于 \mathbf{W} 和 Ψ [9]。通过求解，式(19)和式(28)的复杂度分别为 $\mathcal{O}(IK\sqrt{BNK+2}(1+BNK)B^3N^3K^3)$ 和 $\mathcal{O}(\sqrt{M+1}(1+M)M^3)$ ，同理更新 \mathbf{A} 的复杂度为

$\mathcal{O}(\sqrt{L+1}(1+L)L^3)$ 。因此所提算法的整体复杂度为 $\mathcal{O}(IK\sqrt{BNK+2}(1+BNK)B^3N^3K^3 + \sqrt{M+1}(1+M)M^3 + \sqrt{L+1}(1+2)L^3)$

4 仿真分析

本节通过仿真结果验证所提方案的性能。参数设置参照文献[9]，2个基站同时为4个用户服务，构建三维坐标来演示模拟场景，假设所有用户随机分布在以 $(q_0, 0)$ 为圆心、半径为 1 m 的圆中。一个由 $M = 100$ 个反射元件组成的子连接有源 RIS 位于 $(60, 10, 6)$ m。假设第 c 个基站位于 $(40(c-1), -50, 3)$ m，基站的有效发射功率为 $P_{BS} = 25$ dBm，每个基站天线数为 $N = 6$ ，每个用户为单天线，子载波数设为 $I = 4$ 。此外，本文采用一般路径损耗模型，参考文献[18]，考虑在 5 GHz 频率下工作的宽带系统，波长 $\lambda = 0.06$ 。若无特别说明，其他参数选择如下： $\sigma_z^2 = \sigma_n^2 = -70$ dBm， $P_{RIS} = 0.02$ W，基站与有源 RIS 的能量转换效率相同，即 $\xi = \zeta = 0.8$ ，放大因子约束 $a_{i,\max} = 80$ ，单个基站电路功耗 $W_{BS} = 5$ dBW，相移电路静态功耗 $W_{PS} = 10$ dBm，放大器静态功耗 $W_{PA} = 10$ dBm，单个用户电路功耗为 $W_U = 10$ dBm。

所提算法的收敛性如图3所示。从图3可以发现，所提算法在不同子连接 RIS 结构下均表现了较好的收敛性，且系统能效随着共享功率放大器的 RIS 单元数量 T 的增加而提高。这是因为在 RIS 单元总数相同时，子连接架构所需功放数量仅为全连接架构的 $\frac{1}{T}$ ，所以可以显著降低系统功耗。此外，由于 RIS 总功率有限，随着放大器数量减少，系统能效增速开始降低。

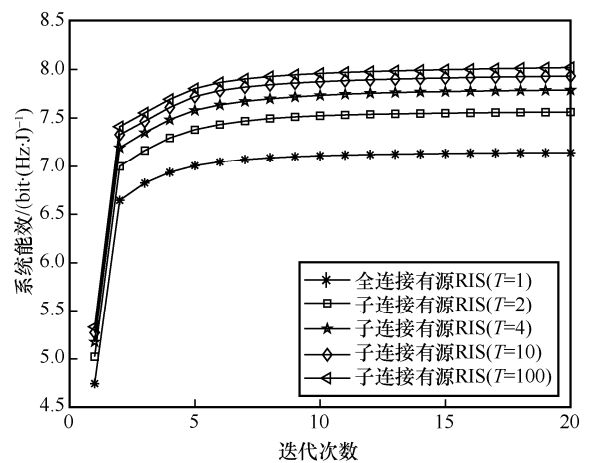


图3 所提算法的收敛性

系统能效与基站发射功率的关系如图 4 所示。由于在高功率区域，频谱效率将随着功率的增大而增加，而能效保持稳定^[23]。因此本文在低功率下仿真，且有源 RIS 功率不变。从图 4 可以发现，系统能效随基站发射功率的增加而增加，但上升趋势逐渐平缓。具体而言，随着子连接数目 T 的增加，系统能效也随之增大，即联合优化算法取得了较高的性能。

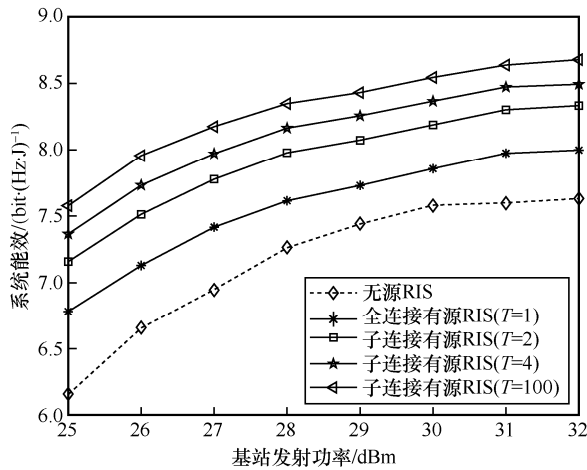


图 4 系统能效与基站发射功率的关系

系统能效与用户数量的关系如图 5 所示。从图 5 可以发现，随着用户数量增加，子连接 RIS 架构和全连接 RIS 架构下系统能效均增加。这是由于在 CF 网络中，用户数量增加导致了系统容量增大，且用户功耗较低，因此系统能效接近于线性增长。

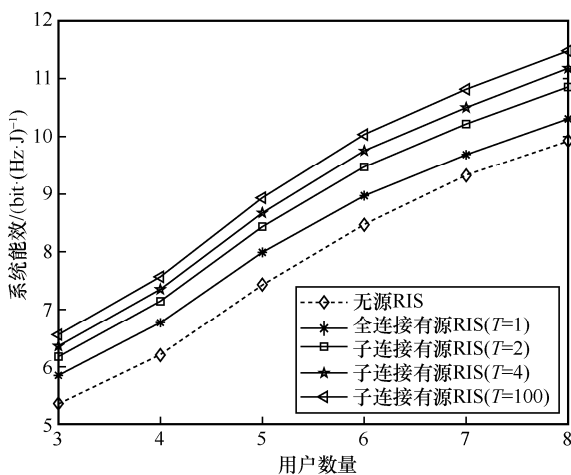


图 5 系统能效与用户数量的关系

系统能效与用户位置的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出，当用户远离基站和 RIS 时，3 种方案的能效均下降，这是由于仿真设置基站数为 2，第二个基站的横坐标为 40，RIS 的横坐标为 60，且基站位

置在坐标系中 y 轴的负半轴，有源 RIS 处于 y 轴的正半轴。故随着圆心横坐标 q_0 的增加，用户位置逐渐远离 BS 和 RIS，信道增益会逐渐减小。但在不同位置的情况下，本文子连接有源 RIS 仍优于全连接有源 RIS。

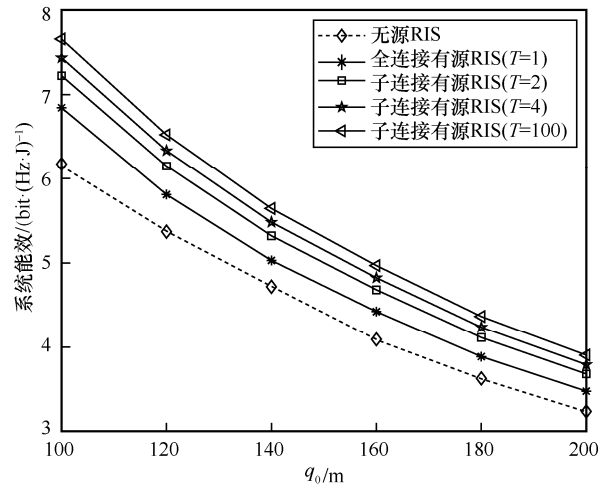


图 6 系统能效与用户位置的关系

系统能效与基站数量的关系如图 7 所示，其中 $N = 2$ 。从图 7 可以看出，随基站数量的增加，系统能效先增加后减少。这是由于增加基站数量可以提升系统容量，使用户分配到更多功率，因此能效增大。但基站数量较多时，巨大的硬件功耗导致能效降低，表明在实际部署中，需要权衡基站数量与系统能效^[1]。

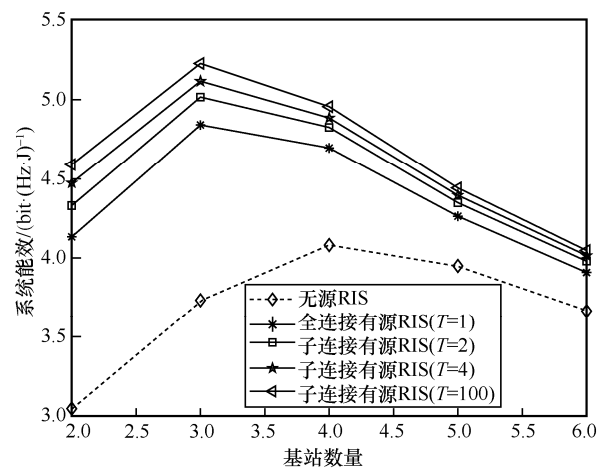


图 7 系统能效与基站数量的关系

系统能效与 RIS 单元总数的关系如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着 RIS 单元总数增加，系统能效呈现先上升再下降的趋势。这是由于系统设计中

硬件功耗逐渐增大，但系统容量增速减缓，表明选择合理的 RIS 单元总数对系统能效有较大影响，也再次验证了减少放大器数量或增加基站功率可带来能效增益。

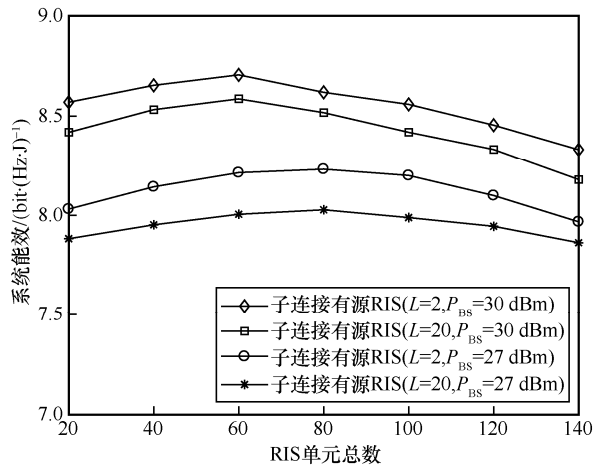


图 8 系统能效与 RIS 单元总数的关系

5 结束语

本文针对宽带有源 RIS 子连接架构能耗问题进行研究，考虑基站的发射功率约束、有源 RIS 可用最大功率约束和放大因子约束，基于发射预编码和反射波束成形的联合设计，使 CF 网络系统能效最大化。通过 FP、LDR、MCQT 等方法，将原非凸优化问题转化成凸优化问题，同时采用交替优化方法优化耦合变量并求解基站波束成形矩阵和有源 RIS 反射矩阵。仿真结果表明，所提方案可以有效降低系统能耗，同时验证了该文算法的优越性。

参考文献：

- [1] HAO W M, LI J J, SUN G C, et al. Robust security energy efficiency optimization for RIS-aided cell-free networks with multiple eavesdroppers[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2211.05562, 2022.
- [2] NGUYEN T K, NGUYEN H H, TUAN H D. Max-min QoS power control in generalized cell-free massive MIMO-NOMA with optimal backhaul combining[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10949-10964.
- [3] NAYEBI E, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Precoding and power optimization in cell-free massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(7): 4445-4459.
- [4] RENZO M D, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [5] ZHENG B X, YOU C S, MEI W D, et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1035-1071.
- [6] 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.
- [7] SHAO X D, YOU C S, MA W Y, et al. Target sensing with intelligent reflecting surface: architecture and performance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2070-2084.
- [8] BASAR E, RENZO M D, ROSNY J D, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 116753-116773.
- [9] ZHANG Z J, DAI L L. A joint precoding framework for wideband reconfigurable intelligent surface-aided cell-free network[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 4085-4101.
- [10] HAO W M, LI J J, SUN G C, et al. Securing reconfigurable intelligent surface-aided cell-free networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2022, 17: 3720-3733.
- [11] ZHANG Y T, DI B Y, ZHANG H L, et al. Beyond cell-free MIMO: energy efficient reconfigurable intelligent surface aided cell-free MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 412-426.
- [12] SIDDIQI M Z, MACKENZIE R, HAO M, et al. On energy efficiency of wideband RIS-aided cell-free network[J]. IEEE Access, 2022, 10: 19742-19752.
- [13] ZHANG Z J, DAI L L, CHEN X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: which will prevail in 6G?[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(3): 1707-1725.
- [14] LONG R Z, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 4962-4975.
- [15] WANG Y H, PENG J Y. Energy efficiency fairness of active reconfigurable intelligent surfaces-aided cell-free network[J]. IEEE Access, 2023, 11: 5884-5893.
- [16] LYU W T, XIU Y, YANG S J, et al. Energy-efficient cell-free network assisted by hybrid RISs[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(4): 718-722.
- [17] ZHANG J D, LI Z Y, ZHANG Z J. Wideband active RISs: architecture, modeling, and beamforming design[J]. IEEE Communications Letters,

2023, 27(7): 1899-1903.

- [18] LIU K Z, ZHANG Z J, DAI L L, et al. Active reconfigurable intelligent surface: fully-connected or sub-connected?[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(1): 167-171.
- [19] ZHU Q, LI M, LIU R, et al. Joint beamforming designs for active reconfigurable intelligent surface: a sub-connected array architecture[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(11): 7628-7643.
- [20] MA Y N, LI M, LIU Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface for energy efficiency in MU-MISO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 4103-4107.
- [21] SHEN K M, YU W. Fractional programming for communication systems—part I: power control and beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [22] GUIMARAES D A, FLORIANO G H F, CHAVES L S. A tutorial on the CVX system for modeling and solving convex optimization problems[J]. IEEE Latin America Transactions, 2015, 13(5): 1228-1257.
- [23] YOU L, XIONG J Y, ZAPPONE A, et al. Spectral efficiency and energy efficiency tradeoff in massive MIMO downlink transmission with statistical CSIT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 2645-2659.

[作者简介]



孙钢灿（1977- ），男，河南濮阳人，博士，郑州大学教授，主要研究方向为深度学习、机器学习、无线通信、物理层安全技术等。



王硕（1998- ），男，河南周口人，郑州大学硕士生，主要研究方向为无线通信与深度学习。

宁冰（1986- ），女，河南郑州人，博士，中原工学院副教授，主要研究方向为无线通信、认知协作下的资源分配。

郝万明（1988- ），男，河南林州人，博士，郑州大学副研究员，主要研究方向为毫米波通信、大规模 MIMO 技术、物理层安全技术等。