

文章编号: 2095-4980(2020)06-1110-07

云无线接入网络的下行链路能效的优化

吴波¹, 庄莉², 骆建华², 范照健²

(1.国网江苏省电力有限公司 淮安市洪泽区供电分公司, 江苏 淮安市 223000; 2.福建亿榕信息技术有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 在下行云接入网络(C-RANs)中, 核心网络内基站处理单元(BBU)通过前向回传线路向远端无线电头端(RRH)传输数据, 然后 RRHs 通过无线接入链路转发数据。目前, C-RANs 的下行链路的能效是 C-RANs 的研究热点。为此, 对 C-RANs 下行链路能效进行研究, 其目的在于最大下行链路的能效。通过对联合用户分配(UA)、RRH 激活、数据率分配和信号预编码约束, 建立能效最大化表述式, 再利用基于逐次凸二次规划的迭代算法求解混合整数非线性问题。仿真结果表明, 提出的联合优化设计提高了 C-RANs 的能效。

关键词: 联合用户分配; 逐次凸二次规划; 前向回传线路; 能效; 云接入网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019114

Energy efficient based design for downlink cloud radio access networks

WU BO¹, ZHUANG li², LUO Jianhua², FAN Zhaojian²

(1. Power Supply Branch of Hongze District in Huaian City, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd, Huaian Jiangsu 401331, China; 2. Fujian Yirong Information Technology Co.Ltd, Fuzhou Fujian 350003, China)

Abstract: In downlink Cloud Radio Access Network(C-RANs), the data is transferred from a Base Band Unit(BBU) in the core network to several remote radio heads via a set of edge routers over capacity-limited fronthaul links. The remote radio heads then send the received signals to their users via radio access links. Now, energy efficiency of C-RANs is a topic issue. Therefore, the general downlink of C-RANs is studied in order to maximize the network energy efficiency by jointly optimizing User Association(UA), Radio Remote Head(RRH) activation, data rate allocation and signal precoding. By employing the successive convex quadratic programming framework, an iterative algorithm is proposed to solve the challenging mixed-integer nonlinear problem formulation. Simulation results show that the proposed joint optimization approach significantly improves the energy efficiency.

Keywords: User Association; successive convex quadratic programming; fronthaul links; energy efficiency; Cloud Radio Access Network

云无线接入网络(C-RANs)^[1]是 5G 组网的核心技术之一^[2]。C-RANs 用低成本、低功耗的远端无线电头端(RRH)替代了传统的高成本、高功耗的基站, 降低了功耗^[3]。基站处理单元(BBU)是 C-RANs 的核心组件。BBU 通过有线前向回传线路(前传)连接 RRHs。而 RRHs 通过无线接入链路连用户。C-RANs 主要由 RRH, BBU 和高速前向回传(简称前传)组成^[4]。BBU 池由虚拟机组成, 并处理用户传输到核心网的数据流。而 RRH 接收用户设备信息。C-RANs 最大的优势在于: BBU 池能够集中处理、分配无线资源和计算资源, 提高了能量效率^[5]。然而, 由于采用联合处理, 前传链路需要传输大量的数据, 前传链路的有限容量成为 C-RANs 主要瓶颈之一^[6-7]。

为了提高 C-RANs 下行链路的能量效率, 可采用以下 3 个方法: 1) 提高数据率; 2) 降低 RRH 传输功率; 3) 关掉 RRHs。文献[8]将能量效率最大化问题转化成功率最小化问题, 但其并没有考虑前传容量约束问题。而文献[9]运用随机矩阵理论, 并通过启发式用户分配策略, 最大化能量效率。然而, 上述的研究工作只集中于单跳前传网络。而实际上, BBU 是通过多跳前传网络^[10]的多个路由连通 RRHs。

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-06-26

作者简介: 吴波(1974-), 男, 工程师, 主要从事计算机应用与电力营销相关工作。email: huang_chengbi@21cn.com

为此, 本文以多跳 C-RANs 为对象, 并基于前传容量受限的事实, 提出基于逐次凸二次规划(Successive Convex Quadratic Programming, SCQP)的迭代算法(SCQP-Iterative, SCQP-I)。SCQP-I 算法通过联合用户分配(UA)、RRH 激活、数据率分配和信号预编码, 最大化网络能效。由于最大化网络能效涉及到多个变量, 并且这些变量相互关联, 难以用单一表达式表述最大化网络能效问题。

据此, SCQP-I 算法建立新的最大化能效问题表达式, 并且其受路由限制、前传容量和最大传输功率的约束。SCQP-I 算法引用逐次凸二次规划解决最大化能效问题, 进而降低能耗。主要工作可归纳于 2 点: 1) 依据 UA,RRH 激活、数据率分配和信号预编码建立了能效最大化表达式; 2) 引用逐次凸二次规划求解。

1 系统模型及问题表述

1.1 系统模型

图 1 显示了通用 C-RANs 的下行链路模型。BBU 通过前传网络的 M 个路由器和 N 个无噪声链路^[10]连通 K_R 个 RRHs。将 K_R 个 RRHs 构成一个矢量 $\kappa_r = \{1, 2, \dots, K_R\}$ 。

对于多跳 C-RANs, 一定满足 $M > 0$ 和 $N > K_R$; 对于单跳 C-RAN, $M = 0$ 和 $N = K_R$ 。令 $\pi = \{1, 2, \dots, M\}$ 、 $\psi = \{1, 2, \dots, N\}$ 。假定任意前传链路 $n \in \psi$ 的容量为 C_n , 且 $C_n > 0$, 其单位为 bit/s。

RRHs 通过无线接入链路服务了 $\kappa_U = \{1, 2, \dots, K_U\}$ 个用户^[11], 并且允许每个用户连通多个 RRHs。每个用户 $k \in \kappa_U$ 安装了 N_u 个天线, 而每个 RRH $i \in \kappa_R$ 安装了 N_r 个天线。

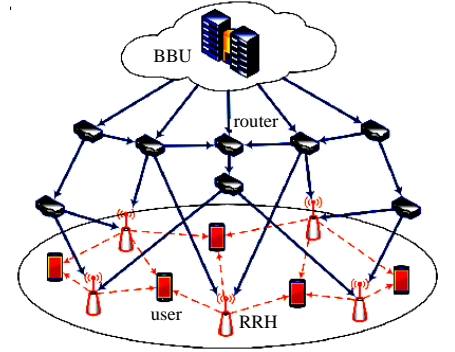


Fig.1 Generic C-RANs downlink model
图 1 通用 C-RANs 的下行链路模型

1.2 问题表述

令 M_k 表示 BBU 传输给每个用户 k 的消息, 并且 M_k 分布于 $\{1, 2, \dots, 2^{uR_k}\}$ 中, 其中 u 为块长度, R_k 为传输消息 M_k 的数据率^[12]。再将消息 M_k 编码成符号 $\chi_k \in C^{d \times 1}$, 其中 χ_k 来自高斯信道码本 C_k^{CH} 。因此, $\chi_k \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。而 d 表示数据流数, 其定义如式(1)所示:

$$d = \min(N_u, N_r) \quad (1)$$

因此, 网络的总体吞吐量可依式(2)表述:

$$R_{\text{sum}} = \sum_{k \in \kappa_U} R_k \quad (2)$$

此外, 每个用户的已编码的消息符号通过前传链路路由至 RRHs。不同的 RRH 为用户服务。为此, 引用布尔变量表示 RRH-用户的分配关系、RRH 的激活状态, 如式(3)和(4)所示:

$$\alpha_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{if RRH } i \text{ serves user } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{if RRH } i \text{ serves no user} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

假定服务用户 k 的 RRHs 集为 D_k , 其定义如式(5)所示:

$$D_k = \{i | a_{k,i} = 1, i \in K_R\} \quad (5)$$

然后, BBU 通过多跳的前传网络, 并以速率 R_k 向 D_k 传输信息 χ_k 。

此外, 对于 K_U 个用户的消息, 存在 K_U 个组播业务。以 $r_{k,n}$ 为路由变量, 其决定链路 n 上的流量率, 其中 k 表示第 k 个组播业务。如果 $r_{k,n} = 0$, 表示在链路 n 上没有传输组播业务 k 。

依据文献[13]的网络编码理论, 如果 D_k 内每个目的节点所获取的速率 R_k 相互独立, 那整条组播业务也能获取速率 R_k 。因此, 将连通 RRH $i \in D_k$ 的链路 n 上的组播流量看成独立的流量:

$$f_{k,i,n} \leq r_{k,n}, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R, n \in \pi \quad (6)$$

最终, 对前传网络的路由约束可表示为^[8]:

$$f_{k,i,n} \leq r_{k,n}, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R, n \in \psi \quad (7)$$

$$r_{k,n} \leq a_{k,i} C_n, \forall k \in \kappa_U, n \in I_i^{K_R} \quad (8)$$

$$a_{k,i}R_k \leq \sum_{n \in I_i^{\kappa_R}} f_{k,i,n}, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R, m \in \pi \quad (9)$$

$$\sum_{n \in O_m^{\kappa_U}} f_{k,i,n} = \sum_{n \in I_m^{\kappa_U}} f_{k,i,n}, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R, m \in \pi \quad (10)$$

$$\sum_{k \in \kappa_U} r_{k,n} \leq C_n, \forall n \in \psi \quad (11)$$

$$R_k \geq R_{QoS}, r_{k,n} \geq 0, f_{k,i,n} \geq 0, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R, n \in \pi \quad (12)$$

式中： $I_i^{\kappa_R}$ 表示流入第 i 个 RRH 的链路集； I_m^{π}, O_m^{π} 分别表示路由 m 上流入和流出链路集。

接下来，先描述每个 RRH 传播的基带信号以及它们所消耗的功率。最后，通过这些功耗建立网络能效。

1.3 信号模型

一旦通过多跳前传网络，收到来自 K 个组播业务所传输的消息符号，第 i 个 RRH 就能产生已传输的基带信号 $\mathbf{x}_i \in C^{N_u \times 1}$ ：

$$\mathbf{x}_i = \sum_{k \in \kappa_U} \mathbf{F}_{k,i} \boldsymbol{\chi}_k \quad (13)$$

式中 $\mathbf{F}_{k,i} \in C^{N_r \times d}$ 表示 $\boldsymbol{\chi}_k$ 的预编码矩阵。

假定每个 RRH 受平均传输功率约束，如式(14)所示：

$$E\{\|\mathbf{x}_i\|^2\} \leq P_i \quad (14)$$

以 $\mathbf{H}_{k,i} \in C^{N_u \times N_r}$ 表示从 RRH i 连通用户 k 的平稳-衰落信道矩阵。相应地， $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_{k,1}, \mathbf{H}_{k,2}, \dots, \mathbf{H}_{k,\kappa_R}] \in C^{N_u \times N_R}$ 表示用户 k 连通所有 RRHs 的信道矩阵，其中 $N_R = \kappa_R N_r$ 。

假定在传输间隔内，信道状态 $\mathbf{H}_{k,i}$ 仍保持不变，且 $k \in \kappa_U, i \in \kappa_R$ 。引入变量 $\bar{\mathbf{F}}_k$ ：

$$\bar{\mathbf{F}}_k = [(\mathbf{F}_{k,1})^H, (\mathbf{F}_{k,2})^H, \dots, (\mathbf{F}_{k,\kappa_R})^H]^H \in C^{N_R \times d} \quad (15)$$

那用户 k 所接收的 $\mathbf{y}_k \in C^{N_u \times 1}$ 可表示为：

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{F}}_k \boldsymbol{\chi}_k + \sum_{l \in \kappa_U \setminus \{k\}} \mathbf{H}_l \bar{\mathbf{F}}_l \boldsymbol{\chi}_l + \mathbf{n}_k \quad (16)$$

式中： $\sum_{l \in \kappa_U \setminus \{k\}} \mathbf{H}_l \bar{\mathbf{F}}_l \boldsymbol{\chi}_l$ 为干扰项； $\mathbf{n}_k \in C^{N_u \times 1}$ 为加性噪声项，其服从 $CN(0, \sum_k)$ 。将此干扰项看成加性高斯噪声进行处理，可用香农形式表述消息符号 $\boldsymbol{\chi}_k$ 的传输速率 R_k ：

$$R_k \leq g_k(\bar{\mathbf{F}}) = W \log_2 | \mathbf{I}_{N_u} + \Pi_k \Pi_k^H \Xi_k^{-1} | \quad (17)$$

式中： W 为总体可用带宽； $\bar{\mathbf{F}} = \{\mathbf{F}_k\}_{k \in \kappa_U}, \Pi_k = \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{F}}_k$ 。而 Ξ_k 的定义如式(18)所示：

$$\Xi_k = \sum_{l \in \kappa_U \setminus \{k\}} \mathbf{H}_l \bar{\mathbf{F}}_l \bar{\mathbf{F}}_l^H \mathbf{H}_l^H + \Sigma_k \quad (18)$$

令 $\mathbf{a} = \{a_{k,i}\}_{k \in \kappa_U, i \in \kappa_R}, \mathbf{b} = \{b_i\}_{i \in \kappa_R}$ 。用式(19)表示矢量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 和 \mathbf{F} 间的相互关系：

$$a_{k,i} = \begin{cases} 0, & \text{if } \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle = 0, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{if } a_{k,i} = 0, \forall k \in \kappa_U \forall i \in \kappa_R \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

依据式(19)和式(20)可知，矢量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 满足式(21)：

$$a_{k,i} \leq b_i \leq \sum_{k \in \kappa_U} a_{k,i}, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R \quad (21)$$

通过式(21)的约束，确保没有用户安排给未激活的 RHH。

1.4 功率模型

引用文献[8]的功率消耗模型，在给定传输间隔内，RRH $i \in \kappa_R$ 所消耗的功率为：

$$P_i^{\text{RRH}} = \begin{cases} \beta_i P_i^{\text{Tx}} + P_{i,a}, & \text{if } 0 < P_i^{\text{Tx}} \leq P_i \\ P_{i,\chi}, & \text{if } P_i^{\text{Tx}} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\beta_i > 0$, $i \in \mathcal{K}_R$ 表示功率放大效率; P_i^{Tx} 为传输功率; $P_{i,a}$ 表示支持 RRH i 处于活动状态所需要的功率。 $P_{i,\chi}$ 表示处于休眠状态时功率消耗, 且 $P_{i,\chi} < P_{i,a}$ 。 P_i 表示 RRH i 的最大传输功率。因此, RRH i 的传输功率 P_i^{Tx} 可表示为:

$$P_i^{\text{Tx}} = b_i \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \alpha_{k,i} \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle = b_i \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle = \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle \quad (23)$$

换言之, 将前传链路 $n \in \mathcal{V}$ 看成通信信道集, 其总容量为 C_n , 总的功耗为 $P_{n,\max}^{\text{FH}}$ 。依据文献[8], 总的功率消耗可表示为 P_n^{FH} :

$$P_n^{\text{FH}} = \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}_U} r_{k,n}}{C_n} P_{n,\max}^{\text{FH}} = \alpha_n \sum_{k \in \mathcal{K}_U} r_{k,n} \quad (24)$$

式中 $\alpha_n = P_{n,\max}^{\text{FH}} / C_n$ 。而 $r_{k,n}$ 表示链路 k 上的实际流量率。

从式(22)至式(24)可知, 总体网络所消耗的功率可表示为:

$$P_{\text{total}}(\bar{\mathbf{F}}, \mathbf{r}, \mathbf{b}) = \sum_{i \in \mathcal{K}_R} P_i^{\text{RRH}} + \sum_{n \in \mathcal{V}} P_n^{\text{FH}} = \sum_{i \in \mathcal{K}_R} (\beta_i P_i^{\text{Tx}} + b_i P_{i,\Delta}) + \sum_{i \in \mathcal{V}} \alpha_n \sum_{k \in \mathcal{K}_U} r_{k,n} + P_\chi \quad (25)$$

式中: $\bar{\mathbf{F}} = \{\bar{\mathbf{F}}_{k,i}\}_{k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R}$; $P_{i,\Delta} = P_{i,a} - P_{i,\chi}$; $P_\chi = \sum_{i \in \mathcal{K}_R} P_{i,\chi}$; $\mathbf{r} = \{r_{k,n}\}_{k \in \mathcal{K}_U, n \in \mathcal{V}}$ 。

简之, 用功率消耗表示网络的能效^[14]。因此, 多跳 C-RANs 的优化问题可表示如下:

$$\max_{\alpha, \mathbf{b}, \mathbf{R}, \bar{\mathbf{F}}, \mathbf{f}, \mathbf{r}} P_1 = \frac{R_{\text{sum}}}{P_{\text{total}}} \quad (26)$$

$$\text{s.t.} \quad (7) \sim (12), (17), (21), (22) \quad (27)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle \leq P_i, \forall i \in \mathcal{K}_R \quad (28)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{K}_R} \alpha_{k,i} \geq 1, \forall k \in \mathcal{K}_U \quad (29)$$

式中: $\mathbf{R} = \{R_k\}_{k \in \mathcal{K}_U}$; $\mathbf{f} = \{f_{k,i,n}\}_{k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R, n \in \mathcal{V}}$ 。式(26)旨在最大化网络吞吐量与总的功率消耗的比值, 即最大化网络能效。而式(27)对前传网络的路由进行了约束。式(28)对传输功率进行了限制。式(29)确保没有用户安排给未激活的 RRH。

1.5 SCQP-I 算法

首先, 对上述问题进行转换, 如下所述:

$$\max_{t, \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{f}, \mathbf{r}} t \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \quad (7) \sim (12), (17), (21), (29) \quad (31)$$

$$tz \leq \sum_{k \in \mathcal{K}_U} R_k \quad (32)$$

$$z \geq \sum_{i \in \mathcal{K}_R} \left(\beta_i \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle + b_i P_{i,\Delta} \right) + \sum_{n \in \mathcal{V}} \alpha_n \sum_{k \in \mathcal{K}_U} r_{k,n} + P_\chi \quad (33)$$

$$\langle \bar{\mathbf{E}}_i^H \bar{\mathbf{F}}_k \bar{\mathbf{F}}_k^H \bar{\mathbf{E}}_i \rangle \leq u_{k,i}, \forall k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R \quad (34)$$

$$u_{k,i} \leq \alpha_{k,i} P_i, \forall k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R \quad (35)$$

$$\alpha_{k,i} \in \{0,1\}, b_i \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R \quad (36)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_U} u_{k,i} \leq P_i, \forall i \in \mathcal{K}_R \quad (37)$$

式中 $\mathbf{p} = (\mathbf{R}, \mathbf{F}, z, \mathbf{u})$; $\mathbf{u} = \{u_{k,i}\}_{k \in \mathcal{K}_U, i \in \mathcal{K}_R}$ 。

由于处理式(36)二值特性, 对于 $\forall \alpha_{k,i}, b_i \in \{0,1\}$, 存在:

$$\sum_{i \in \mathcal{K}_R} \sum_{k \in \mathcal{K}_U} (\alpha_{k,i} - \alpha_{k,i}^2) + \sum_{i \in \mathcal{K}_R} (b_i - b_i^2) = 0 \quad (38)$$

相反, 对于所有的 $\alpha_{k,i}, b_i \in \{0,1\}$, 则存在:

$$\sum_{i \in \mathcal{K}_R} \sum_{k \in \mathcal{K}_U} (\alpha_{k,i} - \alpha_{k,i}^2) + \sum_{i \in \mathcal{K}_R} (b_i - b_i^2) \geq 0 \quad (39)$$

因此, 可以对式(36)进行改写:

$$\sum_{i \in \kappa_R} \sum_{k \in \kappa_U} (\alpha_{k,i} - \alpha_{k,i}^2) + \sum_{i \in \kappa_R} (b_i - b_i^2) \geq 0 \tag{40}$$

$$0 \leq \alpha_{k,i} \leq 1, 0 \leq b_i \leq 1, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R \tag{41}$$

结合式(40)和式(41)可知, 式(36)为一个凸约束问题^[15]。可将式(30)~式(37)所表述的问题转化为以下形式:

$$\min_{(t, p, a, f, r, b) \in \mathcal{R}} -t \tag{42}$$

式中 $\mathcal{R} = \{(t, p, a, f, r, b) | (7)-(12), (17), (21), (29), (33)-(35), (37), (40), (41)\}$ 。

为了求解式(42)问题, 将式(42)转换成拉格朗日形式:

$$\mathfrak{L}(t, b, a, \lambda) = -t + \lambda \left(\sum_{i \in \kappa_R} \sum_{k \in \kappa_U} (\alpha_{k,i} - \alpha_{k,i}^2) + \sum_{i \in \kappa_R} (b_i - b_i^2) \right) \tag{43}$$

式中 $\lambda \geq 0$ 为拉格朗日乘子。

因此, 式(42)所表述的问题能够表示为:

$$\min_{(t, p, f, r, a, b) \in \mathcal{R}} \mathfrak{L}(t, b, a, \lambda) = -t + \lambda \left(\sum_{i \in \kappa_R} \sum_{k \in \kappa_U} (\alpha_{k,i} - \alpha_{k,i}^2) + \sum_{i \in \kappa_R} (b_i - b_i^2) \right) \tag{44}$$

通过选择合适 λ 值, 求解式(44), 进而得到式(42)问题的解。为了处理式(9)和式(33), 对它们进行改写:

$$(R_k + \alpha_{k,i})^2 - (R_k - \alpha_{k,i})^2 - 4 \sum_{n \in I_i^R} f_{k,i,n} \leq 0 \tag{45}$$

$$(t+z)^2 - (t-z)^2 - 4 \sum_{k \in \kappa_U} R_k \leq 0 \tag{46}$$

函数 $f_1(x, y) = (x-y)^2$ 为联合凸优函数。在给定点 $(x^{(\kappa)}, y^{(\kappa)})$ 进行一阶泰勒级数展开, 其凸下界表示为:

$$2(x^{(\kappa)} - y^{(\kappa)})(x - y) - (x^{(\kappa)} - y^{(\kappa)})^2 \leq (x - y)^2 \tag{47}$$

因此, 在给定点 $(t^{(\kappa)}, p^{(\kappa)}, \alpha^{(\kappa)})$ 对式(45)和式(46)进行近似:

$$\begin{aligned} & (R_k + \alpha_{k,i})^2 - 2(R_k^{(\kappa)} - \alpha_{k,i}^{(\kappa)})(R_k - \alpha_{k,i}) \\ & (R_k^{(\kappa)} - \alpha_{k,i}^{(\kappa)})^2 - 4 \sum_{n \in I_i^R} f_{k,i,n} \leq 0, \forall k \in \kappa_U, i \in \kappa_R \end{aligned} \tag{48}$$

$$(t+z)^2 - 2(t^{(\kappa)} - z^{(\kappa)})(t - z) + (t^{(\kappa)} - z^{(\kappa)})^2 - 4 \sum_{k \in \kappa_U} R_k \leq 0 \tag{49}$$

Algorithm 1: energy efficiency maximization for the downlink C-RANs

Step1: initialization: set $\kappa = 1$. set a value of λ and choose an initial point $(t^{(0)}, p^{(0)}, f^{(0)}, a^{(0)}, b^{(0)})$
 Step2: repeat
 Step3: update $\kappa := \kappa + 1$
 Step4: find the optimal solution $(t^*, p^*, f^*, a^*, b^*)$ by solving convex problem(50)
 Step5: update $(t^{(\kappa)}, p^{(\kappa)}, f^{(\kappa)}, a^{(\kappa)}, b^{(\kappa)}) := (t^*, p^*, f^*, a^*, b^*)$ until convergence

算法 1 表述了求解式(42)的过程。首先, 产生迭代的初始点, 然后再利用式(50)求解最优解, 更新值, 再重复 Step3, Step4, Step5, 直到算法收敛。

$$\min_{(t, p, f, r, a, b) \in \mathcal{R}^{(\kappa)}} \mathfrak{L}(t, b, a, \lambda) = -t + \lambda \left(\sum_{i \in \kappa_R} \sum_{k \in \kappa_U} \left((1 - 2\alpha_{k,i}^{(\kappa)})\alpha_{k,i} + (\alpha_{k,i}^{(\kappa)})^2 \right) + \sum_{i \in \kappa_R} \left((1 - 2b_i^{(\kappa)})b_i + (b_i^{(\kappa)})^2 \right) \right) \tag{50}$$

此外, 考虑算法 1 的收敛性能问题, 设置迭代次数阈值 N 。依据仿真实验数据(见图 5), 算法 1 迭代至 10 次时, 性能趋于平稳。因此, 迭代阈值 $N = 20$ 。

2 性能分析

2.1 实验环境

为了更好地分析 SCQP-I 算法的性能, 利用 MATLAB 软件建立仿真平台。C-RANs 的无线接入部分如图 2 所示, 其中 RRHs 数为 $\kappa_R = 7$ 个, 且其位置固定, 而用户数 $\kappa_U = 5$ 。它们随机地分布于 RRHs 的覆盖区域。

实验中用到的 LTE 参数如表 1 所示。每个 RRH 具有 2 根天线 ($N_r = 2$), 而每个用户具有 1 根天线 ($N_u = 1$)。每个 RRH 在活动状态和休眠状态时所消耗的能量分别为 84 W 和 56 W。

所有用户 $i \in \kappa_R$ 的传输功率参数： $\beta_i = \beta = 2.8, \alpha_i = \alpha = 5$ 。而对于所有的 RRH $k \in \kappa_U$ ，其相关参数： $d=1, P_i = P, \sum_k = \sigma^2 \mathbf{I}$ 。 $\lambda=100$ ，每类实验独立重复 100 次，取平均值作为最终的实验数据。

同时，考虑多跳前传和单跳前传网络，如图 3(a)、3(b)所示。在多跳前传网络中有 10 个路由器，25 条前传链路。

选择的启发方案 HUA^[8]，其应用于单跳 C-RAN 网络，将其标记为 HUA-SH。在 HUA-SH 算法中，每个用户分配给 N_c 个 RRHs，并且具有最大的信道增益。当其应用于多跳 C-RAN 网络，其标记为 HUA-MH。

2.2 数据分析

首先，分析 SCQP-I 算法的收敛性。图 4 显示了 SCQP-I 算法在单跳网络和多跳网络中的性能，分别标记为 Alg.1-SH 和 SCQP-I-MH。

从图 4 可知，SCQP-I 算法能够有效地收敛。当迭代至 5 次时， \mathcal{J} 值趋于零。当迭代至 15 次后，SCQP-I-SH 和 SCQP-I-MH 都得到很好的收敛。

图 5 分析了 HUA 算法与 SCQP-I 算法的能效性能。从图 5 可知，提出的 SCQP-I 算法在单跳、多跳 C-RANs 的能效比 HUA 分别提高了 15% 和 23%。这归功于 SCQP-I 算法引用联合优化算法，并利用泰勒级数展开算法进行近似求解，提高了能效。

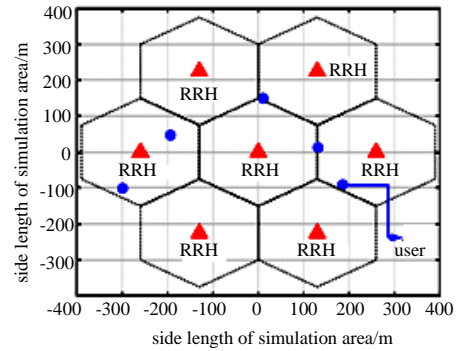


Fig.2 Simulation scene of wireless network ($\kappa_R = 7, \kappa_U = 5$)

图 2 无线网络仿真场景 ($\kappa_R = 7, \kappa_U = 5$)

表 1 LTE 仿真参数

Table1 Parameters of LTE

| parameters | values |
|--|----------------------|
| distance between adjacent RRHs | 0.3 km |
| total bandwidth | 10 MHz |
| standard deviation of log-normal shadowing | 10 dB |
| path loss at distance d /km | $140.7+36.7\lg d$ dB |
| noise variance | -174 dBm/Hz |
| maximum RRH transmit power | 24 dBm |

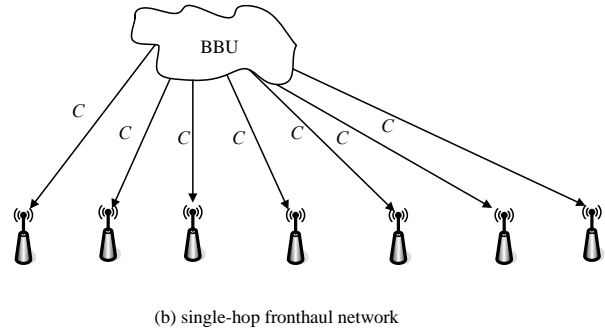
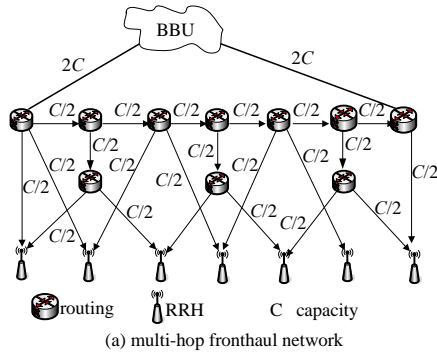


Fig.3 Simulation platform of multi-hop and single-hop fronthaul network

图 3 多跳和单跳前传网络仿真平台

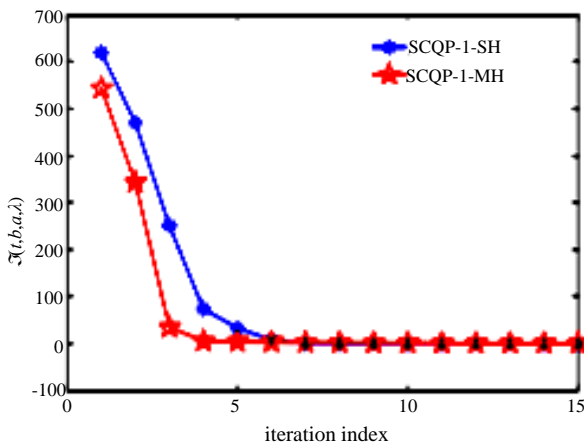


Fig.4 Convergence of the algorithm

图 4 算法的收敛性

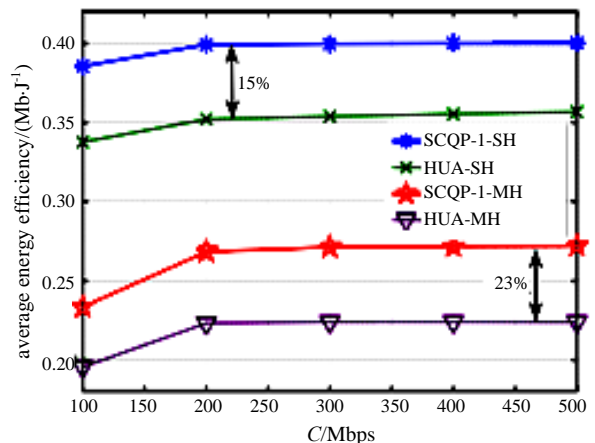


Fig.5 Average energy efficiency

图 5 能效

3 结论

针对 C-RAN 网络的下行链路能效问题, 提出基于 SCQP-I 算法优化下行链路能效。基于前传链路的容量限制、最小数据率以及最大 RRH 的传输功率约束, 建立混合整数优化问题, 再利用 SCQP-I 算法求解优化问题。仿真结果表明, 提出的 SCQP-I 算法能够有效地降低能效。

本文仅考虑了简单的 C-RANs 网络(7 个 RRHs, 5 个用户数), 并只通过实验仿真分析了算法的性能。后期, 将加大 C-RANs 网络规模, 并用实测数据分析算法的性能, 这将是后期的工作方向。

参考文献:

- [1] 高鹏,胡晓东,李家兴. 5G-C-RAN 中最大化效用服务功能链部署算法[J]. 计算机工程与应用, 2018,5(8):89-92. (GAO Peng,HU Xiaodong,LI Jiaying. Utility maximization service function chain deployment algorithm in 5G-C-RAN[J]. Computer Engineering and Applications, 2018,5(8):89-92.)
- [2] PENG M,SUN Y,LI X,et al. Recent advances in cloud radio access networks:system architectures,key techniques,and open issues[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2016,18(3):2282-2308.
- [3] HU B,HUA C,ZHANG J,et al. Joint fronthaul multicast beamforming and user-centric clustering in downlink C-RANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017,16(8):5395-5409.
- [4] 彭木根,艾元. 异构云无线接入网络:原理、架构、技术和挑战[J]. 电信科学, 2015,31(5):41-45. (PENG Mugen,AI Yuan. Heterogeneous cloud radio access networks:principle,architecture,techniques and challenges[J]. Telecommunications Science, 2015,31(5):41-45.)
- [5] QUEK T,PENG M,SIMEONE O,et al. Cloud radio access networks:principles,technologies,and applications[M]. Cambridge, USA:Cambridge University Press, 2017.
- [6] LIU D,WANG L,CHEN Y,et al. User association in 5G networks:a survey and an outlook[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018,18(2):1018-1044.
- [7] 唐春菊. 基于能效和异构服务的密集家庭小区资源分配[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):223-229. (TANG Chunju. Energy-efficiency and heterogeneous services based resource allocation in dense femtocells[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):223-229.)
- [8] DAI B,YU W. Energy efficiency of downlink transmission strategies for cloud radio access networks[J]. Journal on Selected Areas Communications, 2016,34(4):1037-1050.
- [9] ZUO J,ZHANG J,YUEN C. Energy efficient user association for cloud radio access networks[J]. IEEE Access, 2016,4(8):2429-2438.
- [10] LIU L,YU W. Cross-layer design for downlink multihop cloud radio access networks with network coding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017,65(7):1728-1740.
- [11] 王汝言,周静,吴大鹏. C-RAN 回传网络中下行资源调度策略[J]. 工程科学学报, 2018,40(5):629-638. (WANG Ruyan,ZHOU Jing,WU Dapeng. A downlink resource scheduling strategy for C-RAN backhaul network[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018,40(5):629-638.)
- [12] PARK S H,SIMEONE O,SAHIN O,et al. Joint precoding and multivariate backhaul compression for the downlink of cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(22):5646-5658.
- [13] AHLWEDE R,CAI N,LI S Y R,et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015,46(4):1204-1216.
- [14] YAN Z,PENG M,WANG C. Economical energy efficiency: an advanced performance metric for 5G systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2017,24(1): 32-37.
- [15] 孟敏. 基于二次规划的任务卸载决策和资源分配方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):1080-1086. (MENG Min. Research on task offloading decision and resource allocation method based on quadratic programming[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):1080-1086.)