

云无线接入网络高效功率分配和波束成形联合优化算法

左加阔^{*①②} 杨龙祥^② 鲍楠^① 卢官明^②

^①(南京邮电大学物联网学院 南京 210023)

^②(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210023)

摘要: 针对云无线接入网络(C-RAN)的资源分配问题, 该文采用max-min公平准则作为优化准则, 以C-RAN用户的能量效率作为优化目标函数, 在满足最大发射功率和最小传输速率约束条件下, 通过最大化最差链路的能量效率来实现用户发射功率和无线远端射频单元(RRHs)波束成形向量的联合优化。上述优化问题属于非线性、分式规划问题, 为了方便求解, 首先将原优化问题转化为差分形式的优化问题, 然后通过引入变量将差分形式的、非平滑优化问题转化为平滑优化问题。最终, 提出一种双层迭代功率分配和波束成形算法。在仿真实验中, 将该文算法与传统的非能效资源分配算法和能量效率最大化算法进行了比较, 实验结果证明该文算法在改进C-RAN能量效率和提高资源分配公平性方面的有效性。

关键词: 云无线接入网络; 能量效率; 功率分配; 波束成形

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2979-07

DOI: 10.11999/JEIT180218

Energy Efficient Joint Power Allocation and Beamforming for Cloud Radio Access Network

ZUO Jiakuo^{①②} YANG Longxiang^② BAO Nan^① LU Guanming^②

^①(College of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

^②(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The resource allocation for Cloud Radio Access Network (C-RAN) is investigated. The max-min fairness criterion is used as the optimization criterion and the Energy Efficiency (EE) of C-RAN users is taken as the optimization objective function, by maximizing the EE of the worst link under the constraints of maximum transmit power and minimum transmit rate, the user transmit power and Remote Radio Heads (RRHs) beamforming vectors are jointly optimized. The above optimization problem belongs to the nonlinear and fractional programming problem. First, the original nonconvex optimization problem is transformed into an equivalent optimization problem in subtractive form. Then, by introducing a new variable, non-smooth equivalent optimization problem is transformed into a smooth optimization problem. Finally, a two-layer iterative power allocation and beamforming algorithm is proposed. The proposed algorithm is compared with traditional non-EE resource allocation algorithm and EE maximization algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm is effective in improving the EE and the fairness of resource allocation.

Key words: Cloud Radio Access Network (C-RAN); Energy efficiency; Power allocation; Beamforming

收稿日期: 2018-03-07; 改回日期: 2018-08-16; 网络出版: 2018-08-29

*通信作者: 左加阔 zuojiakuo@njupt.edu.cn

基金项目: 江苏省博士后基金(SBH17024), 江苏省高校自然科学基金(15KJB510026), 江苏省自然科学基金(BK20150866), 南京邮电大学引进人才基金(NY215046, NY217056), 国家自然科学基金(61801237, 61701255)

Foundation Items: The Postdoctoral Fund of Jiangsu Province (SBH17024), The Jiangsu University of Natural Science Foundation (15KJB510026), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150866), The Introduction of Talent Fund of Nanjing University of Posts and Telecommunications (NY215046, NY217056), The National Natural Science Foundation of China (61801237, 61701255)

1 引言

近几年, 高速增长的移动数据业务对现有蜂窝系统构成了迫在眉睫的挑战, 需要更高的吞吐量、更大范围的无线网络覆盖以及更小的通信延迟。云无线接入网络(Cloud Radio Access Network, C-RAN)作为一种新型的网络架构, 具有成本低、网络部署灵活、资源利用率高等特点, 因此C-RAN被认为是满足未来无线通信网络需求的最有前途的解决方案之一^[1,2]。据统计, 高效C-RAN网络能够减少无线蜂窝网络运营70%的能量消耗^[3], 因此针对C-RAN网络高效的研究正成为研究的热点。

文献[4]研究了时分复用C-RAN系统中的资源分配问题, 针对下行链路和上行链路两种情况, 以最大化系统的能量效率为优化目标, 分别提出了不同的高效资源分配策略。在考虑非完美信道信息以及溢出约束的条件下, 文献[5]提出了一种低复杂度的高效功率分配算法, 并且基于随机矩阵理论, 推导出了用户数量趋于无限大时, 用户发射功率的闭式表达式。文献[6]提出了一种集群内容缓存结构, 在该结构中一些内容可以存储在本地集群内容缓存中, 利用随机博弈网络模型对C-RAN内容缓冲问题进行建模, 证明了所提出结构能够提高系统的能量效率(Energy Efficiency, EE)和有效容量。文献[7]定义了一种新的经济型谱效率(Economical Spectral Efficiency, ESE)准则, 该准则同时考虑了网络的能量效率和前向回传成本。通过最大化ESE提出了一种双层迭代算法, 该算法能够有效地提高系统的ESE。在C-RAN网络中, 基带处理是在基带处理单元池(Based Band Unit pool, BBU)完成的, BBU池以虚拟的方式工作, 并且能够很大程度上降低蜂窝网络的功耗。因此, BBU之间的协作能够有效地提高网络的资源使用效率和降低功耗。

为了降低功耗, 文献[8]通过最小化C-RAN的总功耗, 比较了两种不同的下行链路传输策略(即数据共享策略和压缩策略)的能量效率。上述优化问题为离散、非凸优化问题, 通过加权 l_1 范数最小化和连续凸优化算法将原优化问题转化为凸优化问题, 并提出了一种有效的功率分配算法。针对C-RAN网络中多天线多用户中继子网络设计问题, 文献[9]从能量最小化角度研究了联合无线远端射频单元(Remote Radio Heads, RRHs)选择和中继选择问题, 基于重加权 l_1 范数最小化, 提出了一种迭代算法。另外, 为了克服潜在的非理想情况, 即备选RRHs没有满足目标用户的QoS要求, 提出了

一种用户设备许可控制策略。文献[10]研究了C-RAN网络非完美信道状态下的鲁棒能量优化问题, 其目的是通过优化基站模式、波束成形向量、用户-基站关联问题来最小化网络的功耗, 利用半正定规划(Semi-Definite Programming, SDP)算法, 提出了一种基于SDP的组稀疏波束成形方法。为了降低求解SDP问题的复杂度, 将信道状态的不确定性转换为信道协方差矩阵的不确定性, 进而提出了一种两阶段的等级选择框架。

上述针对C-RAN资源分配的研究, 均以最大化能量效率^[4-7]或者最小化功耗^[8-10]为优化目标, 忽略了用户之间资源分配的公平性问题, 而公平性是衡量资源分配算法的重要方面^[11,12]。本文以最大化最差用户链路的能量效率作为优化目标, 将C-RAN资源分配问题建模为maxmin优化问题, 在满足最大发射功率和最小传输速率约束条件下, 通过优化功率分配和波束成形向量来提高用户的能量效率以及资源分配的公平性。利用分式规划将原优化问题转化为等效的、方便处理的最大最小优化问题, 然后对等效问题进行平滑处理, 最后采用拉格朗日对偶方法进行求解, 最终给出了包含两层循环迭代的高效资源分配算法。在本文中, 令 $(\cdot)^H$ 和 $(\cdot)^T$ 分别表示共轭转置和转置, \mathbb{C} 表示复数域, \mathbf{I}_M 表示 M 维的单位矩阵, $\mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_M)$ 表示服从均值向量为0, 协方差矩阵为 \mathbf{I}_M 的复高斯分布, $\|\cdot\|_p$ 为向量的 l_p 范数, $(\cdot)^\dagger$ 表示矩阵的伪逆矩阵。

本文的结构如下: 第2节描述了本文C-RAN系统的模型以及优化问题; 第3节给出了联合功率分配和波束成形算法; 第4节分析本文提出算法的仿真结果; 第5节对本文进行了总结。

2 系统模型

考虑一个C-RAN上行链路系统, 该系统由1个BBU池, J 个RRHs和 N 个C-RAN用户组成(C-RAN User, CU)。每个RRH配有 M 根天线, 每个C-RAN用户配有1根天线。RRH负责将C-RAN用户的基带信号转发给BBU池。通常, RRHs由前端射频单元和信号处理单元组成, 例如: 射频放大器、滤波器、A/D和D/A转换器等。BBU池包含多个BBU, 这些BBU以虚拟基站的形式实现网络功能虚拟化。BBU池配置功能强大的中央处理器, 来处理基带信号和实现资源优化配置。前向回传链路(Fronthaul Links)将RRH与BBU池相连, 并要求具有较低的延迟, 前向回传链路可以通过不同的技术来实现^[1,2]。

在BBU池端接收到的第 n 个C-RAN用户的信号:

$$y_n = \sum_{j=1}^J \mathbf{w}_{j,n}^H \mathbf{h}_{j,n} \sqrt{p_n} s_n + \sum_{j=1}^J \sum_{l \neq n}^N \mathbf{w}_{j,n}^H \cdot \mathbf{g}_{j,l} \sqrt{p_l} s_l + \sum_{j=1}^J \mathbf{w}_{j,n}^H \mathbf{z}_n \quad (1)$$

其中, $\mathbf{w}_{j,n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为第 j 个 RRH 对第 n 个 C-RAN 用户的波束成形向量, $\mathbf{h}_{j,n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为第 j 个 RRH 与第 n 个 C-RAN 用户之间的信道增益, $\mathbf{g}_{j,l}$ 为第 j 个 RRH 与第 l 个 C-RAN 用户之间的干扰信道增益, p_n 和 s_n 分别为第 n 个 C-RAN 用户的发射功率和发射信号, $\mathbf{z}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为第 j 个 RRH 端的高斯白噪声向量, 并且 $\mathbf{z}_n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \cdot \mathbf{I}_M)$ 。其中 σ_n^2 为第 j 个 RRH 端的噪声方差。

那么, 第 n 个 C-RAN 用户的数据传输速率为

$$R_n = \log_2 \left(1 + \frac{p_n |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{h}_n = [\mathbf{h}_{1,n}^T \ \mathbf{h}_{2,n}^T \ \cdots \ \mathbf{h}_{J,n}^T]^T$, $\mathbf{w}_n = [\mathbf{w}_{1,n}^T \ \mathbf{w}_{2,n}^T \ \cdots \ \mathbf{w}_{J,n}^T]^T$, $\mathbf{g}_n = [\mathbf{g}_{1,l}^T \ \mathbf{g}_{2,l}^T \ \cdots \ \mathbf{g}_{J,l}^T]^T$, $\mathbf{Q}_n = \sum_{l \neq n}^N p_l \mathbf{g}_l \cdot \mathbf{g}_l^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{(J \times M)}$ 。

第 n 个 C-RAN 用户设备消耗的总功率为

$$P_n^{\text{total}} = \kappa_n p_n + P_n^{\text{cir}} \quad (3)$$

其中, $1/\kappa_n$ 和 P_n^{cir} 分别为第 n 个 C-RAN 用户的功率放大器系数和电路消耗的总功率。

令 ξ_n 表示第 n 个 C-RAN 用户的能量效率, 定义为

$$\xi_n = \log_2 \left(1 + \frac{p_n |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) / (\kappa_n p_n + P_n^{\text{cir}}) \quad (4)$$

以能量效率作为衡量链路状态的指标, 令 n^* 表示最差链路的序号, 那么, $n^* = \min_n \xi_n$ 。为了最大化最差链路状态下的用户能量效率, 并且满足用户最基本的数据传输速率需求, 本文研究的高效功率分配和波束成形问题可以表示为

$$\left. \begin{array}{l} \text{OP1} \max \min_{p_n, \mathbf{w}_n, 1 \leq n \leq N} \log_2 \left(1 + \frac{p_n |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) / (\kappa_n p_n + P_n^{\text{cir}}) \\ \text{s.t.} \\ \text{C1: } 0 \leq p_n \leq P_{\max}, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \text{C2: } R_n \geq R_{\min}, \quad n = 1, 2, \dots, N \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中, P_{\max} 和 R_{\min} 分别为 C-RAN 用户 n 的发射功率门限值和最小传输速率门限值。C1 为发射功率约束, C2 保证所有用户的传输速率要求。

3 联合功率分配和波束成形算法

由于 OP1 是非凸的、分式规划问题, 通常情况

下很难直接对其进行求解。本文基于分式规划理论^[3,14]和拉格朗日对偶方法^[15], 提出了一种高效的最优功率分配和波束成形算法。

3.1 迭代算法设计

在求解 OP1 前, 引入一个变量 λ , 并定义函数 $F(\lambda)$:

$$F(\lambda) = \max_{p_n, \mathbf{w}_n \in \Omega} \min_{1 \leq n \leq N} \{R_n(p_n, \mathbf{w}_n) - \lambda P_n^{\text{total}}(p_n)\} \quad (6)$$

其中 Ω 为优化问题 OP1 的可行域, $R_n(p_n, \mathbf{w}_n)$ 表示 R_n 为 p_n 和 \mathbf{w}_n 的函数, $P_n^{\text{total}}(p_n)$ 表示 P_n^{total} 为 p_n 的函数。

令 p_n^* 和 \mathbf{w}_n^* 表示 OP1 的最优解, 并定义 λ^* :

$$\lambda^* = \max_{p_n, \mathbf{w}_n \in \Omega} \min_{1 \leq n \leq N} \xi_n(p_n, \mathbf{w}_n) = \min_{1 \leq n \leq N} \xi_n(p_n^*, \mathbf{w}_n^*) \quad (7)$$

定理 1^[13] OP1 和优化问题式 (6) 具有相同的最优解, 当且仅当:

$$\begin{aligned} F(\lambda^*) &= \max_{p_n, \mathbf{w}_n \in \Omega} \min_{1 \leq n \leq N} \{R_n(p_n, \mathbf{w}_n) - \lambda^* P_n^{\text{total}}(p_n)\} \\ &= \min_{1 \leq n \leq N} \{R_n(p_n^*, \mathbf{w}_n^*) - \lambda^* P_n^{\text{total}}(p_n^*)\} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

根据定理 1 可知, 通过寻找使得 $F(\lambda^*) = 0$ 的 p_n 和 \mathbf{w}_n , 得到优化问题 OP1 的最优解 p_n^* 和 \mathbf{w}_n^* 。然而 λ^* 是未知的, 在求解 λ^* 前引入定理 2。

定理 2^[14] 定义 $P_{\text{lb}}^{\text{total}}$ 和 $P_{\text{ub}}^{\text{total}}$ 分别为所有 N 个 C-RAN 用户中, 设备消耗总功率的下限值和上限值, 那么:

$$\begin{aligned} P_{\text{lb}}^{\text{total}} &\triangleq \min_{p_n, \mathbf{w}_n \in \Omega} \min_n (p_n + P_n^{\text{cir}}) \\ &= \min_n \left(\frac{(2^{R_{\min}} - 1) \sigma_n^2 \kappa_n}{\|\mathbf{h}_n\|_2^2} + P_n^{\text{cir}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_{\text{ub}}^{\text{total}} \triangleq \max_{p_n \in \Omega} \max_n (p_n + P_n^{\text{cir}}) = \max_n (\kappa_n P_{\max} + P_n^{\text{cir}}) \quad (10)$$

令区间 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 包含最优值 λ^* , 根据通用 Dinkelbach 算法^[14], 在第 t 次迭代中 α_{\min} 和 α_{\max} 可通过式 (11) 和式 (12) 进行更新:

$$\alpha_{\min}^t = \min \left\{ \lambda^t + \frac{F(\lambda^t)}{P_{\text{lb}}^{\text{total}}}, \lambda^t + \frac{F(\lambda^t)}{P_{\text{ub}}^{\text{total}}} \right\} \quad (11)$$

$$\alpha_{\max}^t = \max \left\{ \lambda^t + \frac{F(\lambda^t)}{P_{\text{lb}}^{\text{total}}}, \lambda^t + \frac{F(\lambda^t)}{P_{\text{ub}}^{\text{total}}} \right\} \quad (12)$$

表 1 给出了采用 Dinkelbach 算法求解优化问题式 (6) 中的 λ , 进而得到 OP1 最优解的具体步骤。关于 Dinkelbach 算法收敛性证明, 详细见文献^[14]。在 **表 1** 的第 2 步中, 需要根据 λ^t 求解优化问题式

表1 Dinkelbach算法求解优化问题式(6)

外循环:
(1)根据式(9)和式(10)计算 P_{lb}^{total} and P_{ub}^{total} , 令 $t = 1, \mathbb{I}^1 = (-\infty, +\infty)$, 选取 $\lambda^1 \in \mathbb{I}^1$, 并设置迭代终止精度阈值 $\varepsilon > 0$
(2)对于 λ^t , 通过求解优化问题式(6)得到 $p_{n,t}$ 和 $\mathbf{w}_{n,t}, n=1,2,\dots,N$
(3)计算 $F(\lambda^t) = \min_n \{R_n(p_{n,t}, \mathbf{w}_{n,t}) - \lambda P_n^{total}(p_{n,t})\}$
(4)根据式(11)和式(12)更新区间 $[\alpha_{min}^t, \alpha_{max}^t]$
(5)更新 $\mathbb{I}^{t+1} = \mathbb{I}^t \cap [\alpha_{min}^t, \alpha_{max}^t]$, 并选取 $\lambda^t \in \mathbb{I}^{t+1}$
(6)如果 $ F(\lambda^t) \geq \varepsilon$, 令 $t = t + 1$
(7)重复步骤2~步骤6, 直到 $ F(\lambda^t) < \varepsilon$

(6)的解 $p_{n,t}$ 和 $\mathbf{w}_{n,t}$ 。下面讨论如何在给定 λ 值的情况下求解优化问题式(6)。

3.2 功率分配和波束成形

由于优化问题式(6)是一个非平滑优化问题,

$$L_a(p_n, \mathbf{w}_n, \eta, \alpha_n, \beta_n, \chi_n) = \eta + \sum_{n=1}^N \alpha_n \left\{ \log_2 \left(1 + p_n \frac{|\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) - R_{min} \right\} + \sum_{n=1}^N \beta_n (P_{max} - p_n) + \sum_{n=1}^N \chi_n \left\{ \log_2 \left(1 + p_n \frac{|\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) - \lambda (\kappa_n p_n + P_n^{cir}) - \eta \right\} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14), 经整理后式(14)可改写为

$$D_u(\alpha_n, \beta_n, \chi_n) = \max_{p_n, \mathbf{w}_n, \eta} \sum_{n=1}^N \left\{ (\alpha_n + \chi_n) \cdot \log_2 \left(1 + p_n \frac{|\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) - \alpha_n R_{min} + \beta_n (P_{max} - p_n) - \chi_n \lambda \cdot (\kappa_n p_n + P_n^{cir}) \right\} + \eta \left(1 - \sum_{n=1}^N \chi_n \right) \quad (16)$$

其中, R_{min}, P_{max} 和 P_n^{cir} 均为常数, 与优化变量 p_n, \mathbf{w}_n, η 无关。观察发现, 去掉式(16)中与变量无关的项之后, 式(16)可分解为如下两个子优化问题:

$$OP2-1 \max_{p_n, \mathbf{w}_n} \left\{ \sum_{n=1}^N (\alpha_n + \chi_n) \log_2 \left(1 + p_n \frac{|\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) - \beta_n p_n - \lambda \kappa_n p_n \right\} \quad (17)$$

$$OP2-2 \max_{\eta \geq 0} \eta \left(1 - \sum_{n=1}^N \chi_n \right) \quad (18)$$

s.t.

$$\eta \leq \log_2 \left(1 + p_n \frac{|\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) - \lambda (\kappa_n p_n + P_n^{cir})$$

通过对上述子优化问题分别进行求解, 可得优

为了方便处理, 通过引入变量 η 将其转化为平滑优化问题:

$$OP2 \max_{p_n, \mathbf{w}_n, \eta} \eta \quad (13)$$

s.t.

$$C1 : 0 \leq p_n \leq P_{max}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$C2 : R_n \geq R_{min}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$C3 : \eta \leq R_n - \lambda P_n^{total}, n = 1, 2, \dots, N$$

显然, 优化问题式(13)为凸优化问题, 可通过拉格朗日对偶分解法求得最优解^[15]。优化问题式(13)的拉格朗日对偶函数为

$$D_u(\alpha_n, \beta_n, \chi_n) = \max_{p_n, \mathbf{w}_n} L_a(p_n, \mathbf{w}_n, \eta, \alpha_n, \beta_n, \chi_n) \quad (14)$$

其中, $\alpha_n, \beta_n, \chi_n$ 为拉格朗日乘子, $L_a(p_n, \mathbf{w}_n, \alpha_n, \beta_n, \chi_n)$ 为拉格朗日函数, 定义如式(15):

化问题OP2的最优解。对于子优化问题OP2-1, 根据KKT条件, 通过对 $L_a(p_n, \mathbf{w}_n, \alpha_n, \beta_n, \chi_n)$ 求 p_n 的偏导数得:

$$p_n = \left[\frac{(\alpha_n + \chi_n)}{(\lambda \kappa_n + \beta_n) \ln 2} - \frac{1}{\gamma_n} \right]^+ \quad (19)$$

其中, $\gamma_n = |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2 / (\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n)$ 。

类似地, 对 $L_a(p_n, \mathbf{w}_n, \alpha_n, \beta_n, \chi_n)$ 求 \mathbf{w}_n 的偏导数得:

$$\frac{\mathbf{h}_n \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_n}{\mathbf{w}_n^H (\mathbf{Q}_n + p_n \mathbf{h}_n \mathbf{h}_n^H) \mathbf{w}_n} = \Gamma_n \mathbf{w}_n \quad (20)$$

其中, Γ_n 定义为

$$\Gamma_n = \frac{\gamma_n \mathbf{Q}_n}{\mathbf{w}_n^H (\mathbf{Q}_n + p_n \mathbf{h}_n \mathbf{h}_n^H) \mathbf{w}_n} \quad (21)$$

定理 3^[16] 优化问题式(13)的最优波束成形向量 \mathbf{w}_n 具有式(22)的形式:

$$\mathbf{w}_n = \phi_n \Gamma_n^\dagger \mathbf{h}_n \quad (22)$$

其中, ϕ_n 定义为

$$\phi_n^2 = \frac{\mathbf{h}_n^H \Gamma_n^\dagger \mathbf{h}_n}{\left(\Gamma_n^\dagger \mathbf{h}_n\right)^H \left(\mathbf{Q}_n + p_n \mathbf{h}_n \mathbf{h}_n^H\right) \Gamma_n^\dagger \mathbf{h}_n} \quad (23)$$

对于子优化问题OP2-2, 根据观察可知, 子优化问题OP2-2的最优解为

$$\eta^* = \begin{cases} 0, & \sum_{n=1}^N \chi_n > 1 \\ \bar{\eta}, & \sum_{n=1}^N \chi_n \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

其中, $\bar{\eta} = \min_n \{\log_2(1 + p_n \gamma_n) - \lambda(\kappa_n p_n + P_n^{\text{cir}})\}$ 。

为了求得最优解 p_n 和 \mathbf{w}_n , 还需确定拉格朗日乘子 $\alpha_n, \beta_n, \chi_n$ 的值。优化问题OP2的对偶问题为

$$\left. \begin{array}{l} \min D_u(\alpha_n, \beta_n, \chi_n) \\ \text{s.t. } \alpha_n \geq 0, \beta_n \geq 0, \chi_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{array} \right\} \quad (25)$$

根据次梯度方法^[17], $\alpha_n, \beta_n, \chi_n$ 分别通过式(26)~式(28)进行迭代更新:

$$\alpha_n(\tau+1) = [\alpha_n(\tau) - \rho_1(\tau) \Delta \alpha_n(\tau)]^+ \quad (26)$$

$$\beta_n(\tau+1) = [\beta_n(\tau) - \rho_2(\tau) \Delta \beta_n(\tau)]^+ \quad (27)$$

$$\chi_n(\tau+1) = [\chi_n(\tau) - \rho_3(\tau) \Delta \chi_n(\tau)]^+ \quad (28)$$

其中, τ 为迭代次数, ρ_1, ρ_2, ρ_3 为迭代步长, $\Delta \alpha_n = \log_2(1 + p_n \gamma_n) - R_{\min}$, $\Delta \beta_n = p_{\max} - p_n$, $\Delta \chi_n = \log_2(1 + p_n \gamma_n) - \lambda(\kappa_n p_n + P_n^{\text{cir}}) - \eta$ 。

综合上述分析, 求解优化问题式(13)的具体步骤如表2所示。在表2中, 只要迭代步长 $\rho_1(\tau)$, $\rho_2(\tau)$, $\rho_3(\tau)$ 足够小, 通过式(26), 式(27), 式(28)进行更新, $\alpha_n(\tau)$, $\beta_n(\tau)$, $\chi_n(\tau)$ 将收敛到最优拉格朗日乘子, 这表明可获得对偶最优解。由于优化问题式(13)为凸优化问题, 因此对偶间隙为零, 最终可得到优化问题式(13)的最优解^[15]。通常迭代步长设置为常数, 但是常数步长不具有可加性。本算法采用可变步长, 令 $\rho_1(\tau) = \rho_2(\tau) = \rho_3(\tau) = \varepsilon/\tau$ (其中 ε 为正常数)。

表2 求解优化问题式(13)的步骤

内循环:
(1)初始化 $\alpha_n, \beta_n, \chi_n, \mathbf{w}_n$
(2)repeat
(3)根据式(19)更新 p_n
由式(21)、式(23)计算 Γ_n 和 ϕ_n , 根据式(22)计算 \mathbf{w}_n
(4) $\tau = \tau + 1$, 根据公式(26), 式(27), 式(28)更新 $\alpha_n(\tau), \beta_n(\tau), \chi_n(\tau)$
(5)until $\alpha_n(\tau+1), \beta_n(\tau+1), \chi_n(\tau+1)$ 收敛

4 仿真实验

本小节通过仿真实验来分析本文提出算法的性能, 仿真实验中的参数设置如下: RRH个数 $J=7$, C-RAN用户数 $N=3$, C-RAN用户的最小传输速率门限值 $R_{\min}=1$ bps/Hz, 噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz, 功率放大器系数 $\kappa_n=1$ 和, 电路消耗的总功率 $P_n^{\text{cir}}=20$ dBm, 信道带宽为 200 kHz, 中心频率为 2 GHz。RRHs之间的距离设置为 50 m, C-RAN用户随机分布在CRAN网络中。假设信道的路径损耗模型为: $128.1+37.6\lg(d)$ (其中, 路径损耗模型单位为dB, d 为用户与RRH之间的距离, 单位为km), 信道的小尺度衰落由瑞利衰落产生。仿真实验主要依靠 Matlab 软件平台以及凸优化工具 CVX 实现。

在RRH天线数 $M=4$, 最大发射功率门限值 P_{\max} 取不同值时, 本文算法的收敛性如图1所示, 其中能量效率为最差链路用户 n^* 的能量效率, 即 $n^* = \arg \min_n \xi_n$ 。由于本文提出的算法包括两层循环迭代, 这里只分析了算法随外层循环迭代次数 t 的变化。通过观察发现, 本文提出了算法最终将收敛到最优能量效率。

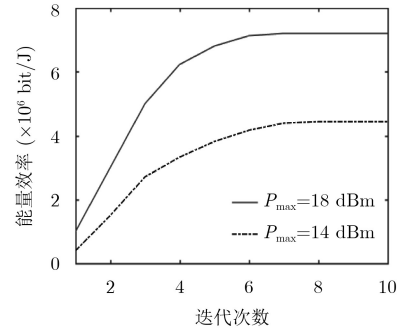


图1 能量效率随迭代次数的变化

为了对比分析本文提出算法性能, 引入一个新的优化问题:

$$\left. \begin{array}{l} \text{OP3 } \max_{p_n, \mathbf{w}_n} \min_n \log_2 \left(1 + \frac{p_n |\mathbf{w}_n^H \mathbf{h}_n|^2}{\mathbf{w}_n^H \mathbf{Q}_n \mathbf{w}_n} \right) \\ \text{s.t.} \\ \text{C1: } 0 \leq p_n \leq P_{\max}, n = 1, 2, \dots, N \\ \text{C2: } R_n \geq R_{\min}, n = 1, 2, \dots, N \end{array} \right\} \quad (29)$$

优化问题式(29)为传统的非能量效率资源分配问题, 类似于求解优化问题式(6), 先将OP3转化为等效的平滑优化问题, 然后采用拉格朗日对偶方法对其进行求解, 求解OP3的算法步骤与算法2类似, 这里不再详细说明。为了表示方便, 将求解OP3的算法称为非能效方法。另外, 还将本文算法

与经典的迫零(Zero-Forcing, ZF)算法^[18]进行了比较。根据迫零算法,首先求出RRHs的波束成形向量,然后在此基础上对用户的功率进行优化。图2描述了3种算法的最差链路用户的能量效率随最大发射功率门限值 P_{\max} 的变化曲线,并考虑了天线数 $M=4$ 和 $M=12$ 两种情况。从图中可以看出,本文算法和迫零算法的能量效率要高于非能效算法的能量效率,这是因为本文算法和迫零算法均以用户的能量效率作为优化目标,而非能效算法以用户的传输速率为优化目标,因此非能效算法的能量效率低于本文算法和迫零算法的能量效率。另外,本文算法的性能要优于迫零算法性能,这是因为迫零算法对波束成形向量和功率进行分步求解,而本文算法是对波束成形向量和功率同时进行联合优化,因此本文算法总能够寻找最优的功率分配和波束成形解,达到最高的能量效率。

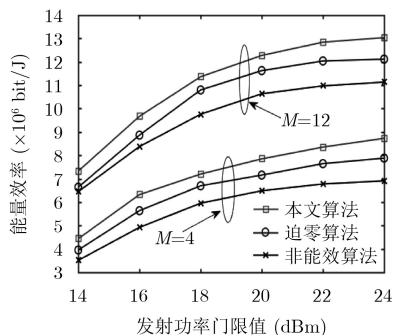


图2 能量效率随发射功率门限值的变化

在最大发射功率门限值 $P_{\max} = 18$ dBm和 $P_{\max} = 14$ dBm时,3种算法的最差链路用户的能量效率随天线数 M 的变化曲线如图3所示。显然,随着每个RRH天线数的增加,用户的能量效率也随着增加,因此选择合适的天线数使得能量效率达到最大也非常重要。在天线数不变的情况下,本文算法在提高用户能量效率方面同样优于迫零算法和非能效方法,原因同图2中对仿真结果的分析。

通常采用公平性系数来衡量算法的公平性,

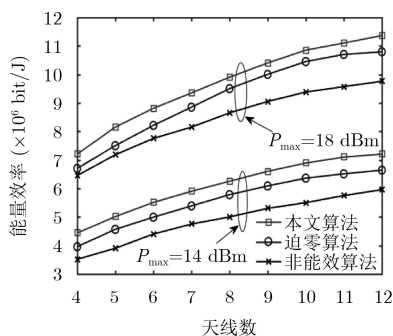


图3 能量效率随天线数的变化

根据文献^[12],定义能量效率公平性系数: $f =$

$$\left(\sum_{n=1}^N \xi_n \right) / \left[\left(\sum_{n=1}^N \xi_n^2 \right) \right].$$

为了说明本文算法在提高资源分配公平性方面的性能,与文献^[4]中的最大化能量效率算法进行了比较。图4比较了两种算法的公平性系数随用户数 N 的变化,显然本文算法在提高资源分配公平性方面要优于文献^[4]中算法。这是因为,本文采用最大最小公平准则,以最大化最差链路的能量效率为优化目标,来提高最差链路用户的能量效率,进而保证资源分配的公平性。而文献^[4]中,以最大化所有用户的能量效率之和为优化目标,将更多资源分配给链路质量好的用户,忽略了用户之间的公平性。

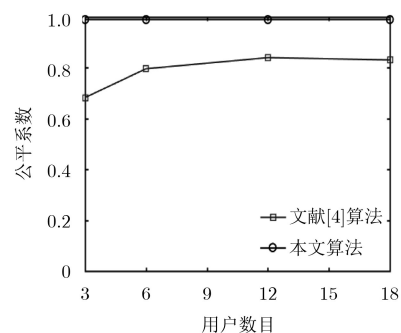


图4 公平性系数随用户数目 N 的变化

图5给出了C-RAN用户数 $N=3$,最大发射功率门限值 P_{\max} 和天线数 M 取不同值时,本文算法不同用户的能量效率比较,其中用户1为最差链路(最差链路是指能量效率最小的链路),用户2为最优链路(最优链路是指能量效率最大的链路)。从图中可以看出,C-RAN用户的最高能量效率和最低能量效率的差距较小,这是因为本文算法能够通过最优解来增大最差链路的能量效率,使得各个链路之间能量效率的差距较小,进而保证了不同用户自己资源分配的公平性。

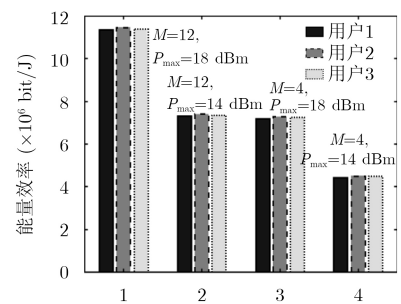


图5 每个用户的能量效率对比

5 总结

本文主要研究了C-RAN网络中的高效资源分配问题,以最大化最差链路的能量效率作为优化

目标, 在满足最大发射功率和最小传输速率约束条件下, 对用户发射功率和波束成形向量进行联合优化。基于通用Dinkelbach算法和拉格朗日对偶方法, 提出了一种新的功率分配和波束成形算法, 该算法包括两层循环迭代。仿真实验证明了本文所提算法在改进C-RAN能量效率以及保证用户资源分配公平性方面的有效性。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Deyu, CHEN Zhigang, CAI Lin, *et al.* Resource allocation for green cloud radio access networks with hybrid energy supplies[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 1684–1697. doi: [10.1109/TVT.2017.2754273](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2754273).
- [2] DARIO P, ABOLFAZI H, and TUYEN X. Elastic resource utilization framework for high capacity and energy efficiency in cloud RAN[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(1): 26–32. doi: [10.1109/MCOM.2016.7378422](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7378422).
- [3] SAXENA N, ROY A, and KIM H. Traffic-aware cloud RAN: A key for green 5G networks[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 1010–1021. doi: [10.1109/JSAC.2016.2549438](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2549438).
- [4] YOON C and CHO D H. Energy efficient beamforming and power allocation in dynamic TDD based C-RAN system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(10): 1806–1809. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2469294](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2469294).
- [5] LI Peirong and RENG Kaiten. Channel-aware resource allocation for energy-efficient cloud radio access networks under outage specifications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(11): 7389–7403. doi: [10.1109/TWC.2017.2748104](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2748104).
- [6] ZHAO Zhongyuan, PENG Mugen, DING Zhiguo, *et al.* Cluster content caching: an energy-efficient approach to improve quality of service in cloud[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2016, 34(5): 1207–1221. doi: [10.1109/JSAC.2016.2545384](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2545384).
- [7] PENG Mugen, WANG Yayun, DANG Tian, *et al.* Cost-efficient resource allocation in cloud radio access networks with heterogeneous fronthaul expenditures[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(7): 4626–4638. doi: [10.1109/TWC.2017.2700841](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2700841).
- [8] DAI Binbin and YU Wei. Energy efficiency of downlink transmission strategies for cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 1037–1050. doi: [10.1109/JSAC.2016.2544459](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2544459).
- [9] YANG Jiaxin, CHAMPAGNE B, ZOU Yulong, *et al.* Centralized energy-efficient multiuser multiantenna relaying in next-generation radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 7913–7924. doi: [10.1109/TVT.2017.2677880](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2677880).
- [10] WANG Yong, MA Lin, XU Yubin, *et al.* Computationally efficient energy optimization for cloud radio access networks with CSI uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(12): 1–15. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2737014](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2737014).
- [11] LI Yuzhou, SHENG Min, TAN W C, *et al.* Energy-efficient subcarrier assignment and power allocation in OFDM system with max-min fairness guarantees[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3183–3195. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2450724](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2450724).
- [12] NGUYEN T D and HAN Y. A proportional fairness algorithm with QoS Provision in downlink OFDM system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(11): 760–762. doi: [10.1109/LCOMM.2006.060750](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2006.060750).
- [13] CROUZEIX J P, FERLAND J A, and SCHAIBLE S. Algorithm for generalized fractional programs[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1985, 47(1): 35–49. doi: [10.1007/BF00941314](https://doi.org/10.1007/BF00941314).
- [14] CHEN H J, SCHAIBLE S, and SHEN R L. Generic algorithm for generalized fractional programming[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2009, 141(1): 93–105. doi: [10.1007/s10957-008-9499-7](https://doi.org/10.1007/s10957-008-9499-7).
- [15] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004: 215–223.
- [16] VENTURINO L, PRASSAD N, and WANG Xiaodong. Coordinated linear beamforming in downlink multi-cell wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1451–1461. doi: [10.1109/TWC.2010.04.090553](https://doi.org/10.1109/TWC.2010.04.090553).
- [17] BOYD S, XIAO Lin, and MUTAPCIC A. Subgradient Methods[OL]. http://101.96.10.63/web.mit.edu/6.976/www/notes/subgrad_method.pdf, 2003.
- [18] PENG Mugen, XIANG Hongyu, Chen Yangyuan, *et al.* Inter-tier interference suppression in heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 2441–2455. doi: [10.1109/ACCESS.2015.2497268](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2497268).

左加阔: 男, 1985年生, 讲师, 研究方向为云无线接入网络资源管理和干扰抑制等。

杨龙祥: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为移动无线通信和物联网等。

鲍楠: 女, 1985年生, 讲师, 研究方向为异构网络资源优化和干扰抑制等。

卢官明: 男, 1965年生, 教授, 研究方向为信息处理、模式识别等。