

## 异构云无线接入网络中的波束成形算法

左加阔<sup>1,2</sup>, 杨龙祥<sup>2</sup>, 鲍楠<sup>1</sup>

(1.南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210023; 2.南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 针对现有异构云无线接入网络的研究主要集中在单个蜂窝网络场景, 仅考虑了蜂窝网络内部干扰, 忽略了蜂窝网络间干扰的问题, 研究了多个蜂窝网络共存场景下的 H-CRAN, 通过最大化系统总传输速率, 对宏基站和无线远端射频单元的波束成形向量进行联合优化。基于交替优化算法和拉格朗日对偶方法, 提出了一种 MBS 和 RRH 波束成形向量联合优化算法。首先将原优化问题分解为 2 个子优化问题, 然后通过迭代的求解这 2 个子优化问题得到原优化问题的最终解。另外, 根据拉格朗日对偶方法推导出了 MBS 和 RRH 波束成形向量的闭式表达式。在仿真实验中, 将所提算法与其他波束成形算法进行了比较, 实验结果证明, 所提算法能够较好地改善系统传输速率。

**关键词:** 异构云无线接入网络; 波束成形; 交替优化; 多天线技术

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019170

## Beamforming for heterogeneous cloud radio access network

ZUO Jiakuo<sup>1,2</sup>, YANG Longxiang<sup>2</sup>, BAO Nan<sup>1</sup>

1. College of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

2. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To overcome the problem that previous researches for heterogeneous cloud radio access network (H-CRAN) mainly focus on single macro cell, and only considered the intracell interference in the one macro cell, while the inter cell interferences among different macro cells are neglected, H-CRAN with multiple macro-cells was studied, and the objective was to maximize system sum-rate through jointly optimizing the beamforming vectors of macro base stations (MBS) and remote radio heads (RRH). Based on alternating optimization and Lagrangian dual method, a joint MBS and RRH beamforming algorithm was proposed. The original problem was first divided into two subproblems. Then, the two sub-problem were solved alternately to obtain the final solutions of the original problem. In addition, the closed expression solutions of the two sub-problem were derived based on Lagrangian dual method. The proposed algorithm was compared with some beamforming algorithms in the simulation. The experimental results demonstrate the proposed algorithm has a better performance in improving the sum-rate of H-CRAN.

**Key words:** heterogeneous cloud radio access network, beamforming, alternating optimization, multi-antenna technology

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2019-07-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No.61801237, No.61701255); 江苏省博士后基金资助项目 (No.SBH17024); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (No.15KJB510026); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20150866); 南京邮电大学引进人才基金资助项目 (No.NY215046, No.NY217056)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61801237, No.61701255), Postdoctoral Fund of Jiangsu Province (No.SBH17024), Jiangsu University of Natural Science Foundation (No.15KJB510026), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20150866), Introduction of Talent Fund of Nanjing University of Posts and Telecommunications (No.NY215046, No. NY217056)

## 1 引言

随着移动社交网络、车载无线通信等<sup>[1-2]</sup>技术的高速发展,现有无线通信网络在提高系统容量、降低延迟、保证用户服务质量等方面面临着重大挑战<sup>[3-4]</sup>。异构云无线接入网络(H-CRAN, heterogeneous cloud radio access network)作为一种新型网络,具有成本低、资源利用率高、网络部署灵活等特点,被认为是未来无线通信网络(包括物联网、高速铁路通信网络等)的关键技术之一<sup>[5-7]</sup>。在H-CRAN中,基带处理单元(BBU, base band processing unit)池用于实现大规模协作信号处理,主要的基带信号处理和上层空中接口协议功能都在BBU池中实现。无线远端射频单元(RRH, remote radio head)作为前端射频单元具有天线模块。宏基站(MBS, macro base station)与BBU池相连,用于全网的控制信息分发,实现蜂窝网络的无缝覆盖<sup>[8]</sup>。然而,H-CRAN中RRH与MBS工作在underlay模式下,两者之间存在严重的层间干扰,这种干扰降低了网络的整体性能。为了克服该问题,可采用多天线技术来提高空间资源复用和抑制层间干扰。

文献[9-10]研究了RRH与MBS间的干扰抑制和资源分配问题,分别采用干扰协调(IC, interference collaboration)方法和波束成形(BF, beamforming)方法来抑制蜂窝内部的干扰,并推导出了溢出概率、系统容量和平均误码率;另外,还分别提出了采用IC和BF干扰抑制时的RRH功率分配算法。文献[11]研究了基于时延敏感业务的资源分配问题,在满足队列稳定的约束条件下,通过最大化H-CRAN的平均能量效率对RRH波束成形向量进行优化。采用随机优化理论将原优化问题转化为Lyapunov优化问题,结合加权最小均方误差(WMMSE, weighted minimum mean-square error)方法,提出了动态波束成形算法。文献[12]将大规模MIMO技术与H-CRAN相结合,对系统的物理层安全和能量效率进行了研究。研究表明,采用大规模MIMO技术能够提高安全性能,将更多的无线资源分配给RRH能够线性地增加RRH的能量效率,而不影响宏蜂窝的能量效率。文献[13]对H-CRAN中的带宽分配和回程链路压缩问题进行了研究,根据随机矩阵理论给出了遍历容量的确定性近似方法,并且基于分式规划提出了联合优化算法。基于可扩展性和灵活性原则,文献[14]结合大

规模MIMO技术,提出了一种新的H-CRAN网络架构;另外,为了克服MIMO预编码技术的难题,提出了一种零空间混合预编码方法。文献[15]不仅考虑了RRH的资源分配问题,同时也考虑了BBU池中的虚拟计算资源分配问题,以H-CRAN的能效函数为优化目标,对BBU和RRH的资源进行联合优化。为了方便求解,将原优化问题分解为2个独立的子资源优化问题,即RRH波束成形问题和BBU虚拟计算资源分配问题,然后分别对这2个子问题进行求解。

上述针对多天线H-CRAN的研究中,文献[9-14]均假设H-CRAN中仅存在一个蜂窝网络和一个MBS,研究的H-CRAN架构较简单。文献[15]虽然研究了H-CRAN中存在多个蜂窝网络的情况,但是文中假设MBS的波束成形向量是已知的,只对RRH的波束成形向量进行优化,没有考虑MBS和RRH波束成形向量的联合优化问题。针对上述问题,本文主要研究多个蜂窝网络场景下的多天线H-CRAN波束成形技术,在考虑蜂窝内部干扰和蜂窝间干扰的情况下,以最大化系统总传输速率为优化目标,在满足MBS和RRH发射功率约束的条件下,对MBS和RRH的波束成形向量进行联合优化。上述优化问题是非凸的,很难直接求解。为了方便求解,将上述优化问题分解为2个子优化问题,分别对MBS和RRH的波束成形向量进行单独优化,原优化问题的最优解可通过迭代的求解上述2个子优化问题得到。针对这2个子优化问题的求解,根据拉格朗日对偶方法分别推导出了MBS和RRH波束成形向量的闭式表达式,通过对拉格朗日乘子和波束成形向量的更新,最终得到2个子优化问题的解。

本文中, $(\cdot)^H$ 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, $\text{CN}(0, \mathbf{I}_M)$ 表示服从均值向量为0且协方差矩阵为 $\mathbf{I}_M$ 的复高斯分布, $\|\cdot\|_p$ 为向量的 $l_p$ 范数, $(\cdot)^\dagger$ 表示矩阵的逆。

## 2 系统模型

考虑一个下行H-CRAN,如图1所示,由BBU池、MBS、RRH、蜂窝用户、RRH用户等组成。其中,MBS提供广域无线信号覆盖,RRH负责一些热点区域或边缘区域的无线信号覆盖,蜂窝用户由MBS提供服务,RRH用户由RRH提供服务。

假设 H-CRAN 中存在  $M$  个蜂窝网络，每个蜂窝中部署一个 MBS。在第  $m$  个蜂窝网络中，令  $\mathcal{N}_m = \{1, 2, \dots, |\mathcal{N}_m|\}$  表示所有 RRH 组成的集合， $\mathcal{K}_m = \{1, 2, \dots, |\mathcal{K}_m|\}$  表示所有蜂窝用户组成的集合， $\mathcal{J}_m = \{1, 2, \dots, |\mathcal{J}_m|\}$  表示所有 RRH 用户组成的集合，其中， $|\mathcal{N}_m|$ 、 $|\mathcal{K}_m|$  和  $|\mathcal{J}_m|$  分别为 RRH、蜂窝用户和 RRH 用户的总数。假设每个 MBS 配有  $T_1$  根天线，每个 RRH 配有  $T_2$  根天线，蜂窝用户和 RRH 用户配有一根天线。

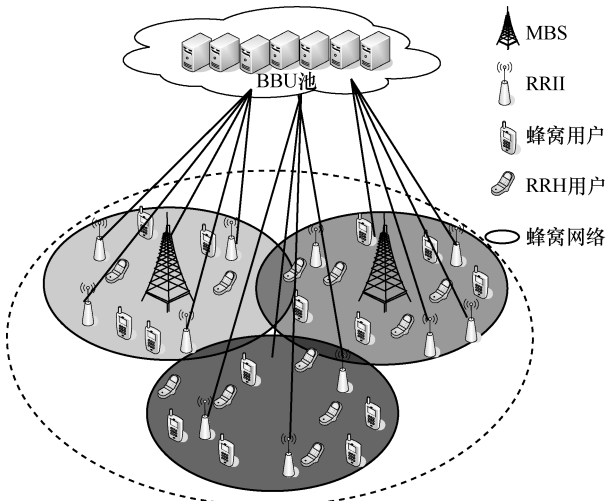


图 1 H-CRAN 组成架构

对于第  $m$  个蜂窝网络，假设  $\mathbf{v}_k^m \in \mathbb{C}^{T_1 \times 1}$  为 MBS 对蜂窝用户  $k$  的波束成形向量， $\mathbf{g}_k^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_1}$  为 MBS 与蜂窝用户  $k$  之间的信道向量， $\mathbf{w}_{n,j}^m \in \mathbb{C}^{T_2 \times 1}$  为第  $n$  个 RRH 对 RRH 用户  $j$  的波束成形向量， $\mathbf{g}_{n,k}^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_2}$  为第  $n$  个 RRH 与蜂窝用户  $k$  之间的干扰信道向量， $x_{m,k}^{\text{MU}}$  和  $x_{m,j}^{\text{RU}}$  分别为蜂窝用户  $k$  和 RRH 用户  $j$  接收到的信号， $\mathbf{h}_{n,j}^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_2}$  为第  $n$  个 RRH 与 RRH 用户  $j$  之间的信道向量， $\mathbf{h}_j^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_1}$  为 MBS 与 RRH 用户  $j$  之间的干扰信道向量。那么，蜂窝用户  $k$  ( $k \in \mathcal{K}_m$ ) 接收到的信号可以表示为

$$y_{m,k}^{\text{MU}} = \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m x_{m,k}^{\text{MU}} + \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m x_{m,j}^{\text{RU}} + \sum_{\substack{m \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k})}} \sum_{\substack{k \in \mathcal{K}_m \\ (m, k)}} \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m x_{m,k}^{\text{MU}} + z_{m,k}^{\text{MU}} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} = [\mathbf{g}_{1,k}^{m,m} \dots \mathbf{g}_{|\mathcal{N}_m|,k}^{m,m}]$ ， $\mathbf{w}_j^m = [(\mathbf{w}_{1,j}^m)^T \dots (\mathbf{w}_{|\mathcal{N}_m|,j}^m)^T]^T$ ， $\mathbf{g}_k^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_1}$  为第  $\underline{m}$  个蜂窝

网络中的 MBS 与第  $m$  个蜂窝网络中的蜂窝用户  $k$  之间的干扰信道向量， $z_{m,k}^{\text{MU}} \sim \text{CN}(0,1)$  为接收到的噪声信号。式(1)中的第一项为有效信号，第二项为第  $m$  个蜂窝网络内部所有 RRH 对蜂窝用户  $k$  的干扰信号，第三项为所有 MBS 对第  $m$  个蜂窝网络中的蜂窝用户  $k$  的干扰信号。

由式(1)可得，蜂窝用户  $k$  ( $k \in \mathcal{K}_m$ ) 的数据传输速率为

$$R_{m,k}^{\text{MU}} = \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2}{\sum_{j \in \mathcal{J}_m} |\mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2 + \sum_{\substack{m \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k})}} \sum_{\substack{k \in \mathcal{K}_m \\ (m, k) \neq (m, k)}} |\mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2 + 1} \right) \quad (2)$$

第  $m$  个蜂窝网络中，RRH 用户  $j$  ( $j \in \mathcal{J}_m$ ) 接收到的信号为

$$y_{m,j}^{\text{RU}} = \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m x_{m,j}^{\text{RU}} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m x_{m,k}^{\text{MU}} + z_{m,j}^{\text{RU}} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} = [\mathbf{h}_{1,j}^{m,m} \mathbf{h}_{2,j}^{m,m} \dots \mathbf{h}_{|\mathcal{N}_m|,j}^{m,m}]$ ， $\mathbf{h}_j^{m,m} \in \mathbb{C}^{1 \times T_1}$  为第  $\underline{m}$  个蜂窝网络中的 MBS 与第  $m$  个蜂窝网络中的 RRH 用户  $j$  之间的干扰信道向量， $z_{m,j}^{\text{RU}} \in \text{CN}(0,1)$  为接收到的噪声信号。式(3)中的第一项为有效信号，第二项为所有 MBS 对第  $m$  个蜂窝网络中的 RRH 用户  $j$  的干扰信号。

那么，RRH 用户  $j$  ( $j \in \mathcal{J}_m$ ) 的数据传输速率为

$$R_{m,j}^{\text{RU}} = \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}_m} |\mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2 + 1} \right) \quad (4)$$

根据上述分析，可得 H-CRAN 中所有蜂窝用户和 RRH 用户的总数据传输速率为

$$R(\mathbf{w}, \mathbf{v}) = \sum_{m \in \mathcal{M}} \left( \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}_m} |\mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2 + 1} \right) + \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2}{\sum_{j \in \mathcal{J}_m} |\mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2 + \sum_{\substack{m \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k})}} \sum_{\substack{k \in \mathcal{K}_m \\ (m, k) \neq (m, k)}} |\mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m|^2 + 1} \right) \right) \quad (5)$$

其中， $\mathbf{w}$  和  $\mathbf{v}$  分别表示由  $\mathbf{w}_j^m$  和  $\mathbf{v}_k^m$  组成的向量。

那么, H-CRAN 中 MBS 和 RRH 联合波束成形向量联合优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{w}, \mathbf{v}} R(\mathbf{w}, \mathbf{v}) \\ \text{s.t. C1: } & \|\mathbf{w}_j^m\|_2^2 \leq P_{m,j}^{\text{RRH}}, \forall j \in \mathcal{J}_m, \forall m \in \mathcal{M} \\ \text{C2: } & \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \|\mathbf{v}_k^m\|_2^2 \leq P_m^{\text{MBS}}, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $P_{m,j}^{\text{RRH}}$  为第  $m$  个蜂窝网络中所有 RRH 对第  $j$  个 RRH 用户的发射功率阈值,  $P_m^{\text{MBS}}$  为第  $m$  个蜂窝网络中 MBS 的发射功率阈值, C1 和 C2 为约束条件。由于式(6)优化问题中的目标函数  $R(\mathbf{w}, \mathbf{v})$  对于  $\mathbf{w}$  和  $\mathbf{v}$  是非凸的, 因此很难直接对该问题进行求解。下面将详细介绍本文提出的求解上述优化问题的算法——MBS 和 RRH 波束成形向量联合优化算法。

### 3 MBS 和 RRH 波束成形向量联合优化算法

将式(6)优化问题分解为 2 个子优化问题, 即优化问题 OP<sub>1</sub> 和优化问题 OP<sub>2</sub>, 如式(7)和式(8)所示。

$$\begin{aligned} \text{OP}_1: & \max_{\mathbf{w}} R(\mathbf{w}, \mathbf{v}) \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{w}_j^m\|_2^2 \leq P_{m,j}^{\text{RRH}}, \forall j \in \mathcal{J}_m, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{OP}_2: & \max_{\mathbf{v}} R(\mathbf{w}, \mathbf{v}) \\ \text{s.t. } & \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \|\mathbf{v}_k^m\|_2^2 \leq P_m^{\text{MBS}}, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 优化问题 OP<sub>1</sub> 的优化变量为  $\mathbf{w}$ , 优化问题 OP<sub>2</sub> 的优化变量为  $\mathbf{v}$ 。

根据交替优化理论<sup>[16]</sup>, 可通过迭代求解上述 2 个优化问题得到式(6)优化问题的最优解。令  $t$  表示迭代次数, 迭代求解式(9)和式(10)。

$$\mathbf{w}_t = \arg \max_{\mathbf{w} \in \varphi_1} R(\mathbf{w}, \mathbf{v}_{t-1}) \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_t = \arg \max_{\mathbf{v} \in \varphi_2} R(\mathbf{w}_t, \mathbf{v}) \quad (10)$$

其中,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为优化问题 OP<sub>1</sub> 和优化问题 OP<sub>2</sub> 的可行域。

根据上述分析, 本文提出的求解式(6)优化问题的算法如算法 1 所示。令  $R^*$  表示式(6)优化问题的最优目标函数值, 即  $R^* = \max_{\mathbf{w} \in \varphi_1, \mathbf{v} \in \varphi_2} R(\mathbf{w}, \mathbf{v})$ , 有定理 1 成立。

**定理 1** 令  $R_t = R(\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t)$ , 那么  $\lim_{t \rightarrow \infty} R_t = R^*$ 。

**证明** 根据式(9)和式(10), 可得

$$R_t = R(\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t) \geq R(\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_{t-1}) \geq R(\mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{v}_{t-1}) = R_{t-1} \quad (11)$$

因此,  $R_t$  是一个非递减的序列。另外, 由于约束条件  $\|\mathbf{w}_j^m\|_2^2 \leq P_{m,j}^{\text{RRH}}$  和  $\sum_{k \in \mathcal{K}_m} \|\mathbf{v}_k^m\|_2^2 \leq P_m^{\text{MBS}}$  的存在, 目标函数  $R(\mathbf{w}, \mathbf{v})$  的值一定是有界的, 因此  $R_t$  一定收敛于  $R^*$ 。证毕。

**算法 1** 交替优化算法求解式(6)解优化问题

- 1) 初始化  $\varepsilon$ ,  $t=1$ ,  $\mathbf{v}_0 \in \varphi_2$
- 2) repeat
- 3) 根据式(9)计算  $\mathbf{w}_t$
- 4) 根据式(10)及  $\mathbf{w}_t$  计算  $\mathbf{v}_t$
- 5) 将  $\mathbf{w}_t$  和  $\mathbf{v}_t$  代入式(5), 得  $R_t$
- 6)  $t=t+1$
- 7) until  $|R(\mathbf{w}_t, \mathbf{v}_t) - R(\mathbf{w}_{t-1}, \mathbf{v}_{t-1})| \leq \varepsilon$

根据算法 1 的步骤 2)和步骤 3)可知, 需要分别对 OP<sub>1</sub> 和 OP<sub>2</sub> 进行求解进而得到  $\mathbf{w}_t$  和  $\mathbf{v}_t$ 。下面将具体讨论如何对这 2 个子优化问题进行求解 (为了表示方便省略下标  $t$ )。

#### 3.1 求解优化问题 OP<sub>1</sub> 的算法

优化问题 OP<sub>1</sub> 的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1(\mathbf{w}, \alpha_m) & \triangleq \sum_{m \in \mathcal{M}} \left[ \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2}{\sum_{\substack{\underline{m} \in \mathcal{M} \\ \underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}}} |\mathbf{h}_{\underline{m},\underline{k}}^{\underline{m},\underline{m}} \mathbf{v}_{\underline{k}}^{\underline{m}}|^2 + 1} \right) + \right. \\ & \left. \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{|\mathbf{g}_{k,m}^{\underline{m},\underline{m}} \mathbf{v}_k^m|^2}{\sum_{j \in \mathcal{J}_m} |\mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m|^2 + \sum_{\substack{\underline{m} \in \mathcal{M} \\ \underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}} \\ (\underline{m}, \underline{k}) \neq (m, k)}} |\mathbf{g}_{\underline{m},\underline{k}}^{\underline{m},\underline{m}} \mathbf{v}_{\underline{k}}^{\underline{m}}|^2 + 1} \right) \right] + \\ & \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \alpha_{m,j} \left( P_{m,j}^{\text{RRH}} - \|\mathbf{w}_j^m\|_2^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

求拉格朗日函数  $\mathcal{L}_1(\mathbf{w}, \alpha_{m,j})$  对  $\mathbf{w}_j^m$  的偏导数<sup>[17]</sup>,

并令  $\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{w}, \alpha_{m,j})}{\partial \mathbf{w}_j^m} = 0$ , 经变换可得

$$\frac{(\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}})^H \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m}{\chi_{m,j}^{\text{RU}} + (\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m)^H \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m} = (\mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m, T_2)}) \mathbf{w}_j^m \quad (13)$$

其中,  $\chi_{m,j}^{\text{RU}}$  表示 RRH 用户  $j$  的同信道干扰和接收到的噪声,  $\chi_{m,j}^{\text{RU}}$  可定义为

$$\chi_{m,j}^{\text{RU}} = \sum_{\underline{m} \in \mathcal{M}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1 \quad (14)$$

式(13)中的  $\mathbf{X}_j^m$  定义为

$$\mathbf{X}_j^m = \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \frac{\text{SINR}_{m,k}^{\text{MU}} (\mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}})^{\text{H}} \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}}}{\chi_{m,k}^{\text{MU}} + \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2} \quad (15)$$

其中,

$$\text{SINR}_{m,k}^{\text{MU}} = \frac{\left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2}{\sum_{j \in \mathcal{J}_m} \left| \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2 + \sum_{\substack{\underline{m} \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k}) \neq (m,k)}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1}$$

为第  $m$  个蜂窝网络中蜂窝用户  $k$  的信干比。

**定理 2** 优化问题 OP<sub>1</sub> 的最优波束成形向量  $\mathbf{w}_j^m$  ( $\mathbf{w}_j^m \neq \mathbf{0}$ ) 可以表示为

$$\mathbf{w}_j^m = \pi_j^m \left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)^{\dagger} (\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}})^{\text{H}} \quad (16)$$

并且常数  $\pi_j^m$  可通过式(17)计算得到。

$$\left( \pi_j^m \right)^2 = \frac{\left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)^{\dagger} (\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}})^{\text{H}} - \chi_{m,j}^{\text{RU}} \right)^+}{\left| \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)^{\dagger} (\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}})^{\text{H}} \right|^2} \quad (17)$$

**证明** 见附录 A。

为了得到最优波束成形向量  $\mathbf{w}_j^m$ , 还需要确定式(17)中的拉格朗日乘子  $\alpha_{m,j}$ 。根据 KKT 条件, 可通过次梯度法<sup>[18]</sup>更新  $\alpha_{m,j}$ , 具体更新方法如式(18)所示。

$$\alpha_{m,j} \leftarrow \left[ \alpha_{m,j} + \eta_1 \left( P_{m,j}^{\text{RRH}} - \left\| \mathbf{w}_j^m \right\|_2^2 \right) \right]^+ \quad (18)$$

其中,  $\eta_1$  为步长。

根据上述分析, 求解优化问题 OP<sub>1</sub> 的具体步骤如算法 2 所示。算法 2 中的算法复杂度主要来自求解矩阵  $\left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)$  的伪逆矩阵。因此, 该算法每次迭代的计算复杂度为  $O\left( \sum_{m \in \mathcal{M}} J_m (N_m T_2)^3 \right)$ 。

**算法 2** 求解优化问题 OP<sub>1</sub> 的算法

- 1) 初始化  $\mathbf{w}_j^m$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$ ,  $\forall j \in \mathcal{J}_m$
- 2) repeat
- 3) 根据式(15)计算矩阵  $\mathbf{X}_j^m$
- 4) repeat
- 5) 根据式(18)更新  $\alpha_{m,j}$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$ ,

$\forall j \in \mathcal{J}_m$

6)

根据式(17)计算  $\pi_j^m$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$ ,

$\forall j \in \mathcal{J}_m$

7)

根据式(16)计算  $\mathbf{w}_j^m$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$ ,

$\forall j \in \mathcal{J}_m$

8)

until  $\alpha_{m,j}$ ,  $\pi_j^m$  收敛

9) until  $\mathbf{w}_j^m$  收敛

### 3.2. 求解优化问题 OP<sub>2</sub> 的算法

优化问题 OP<sub>2</sub> 的拉格朗日函数如式(19)所示。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_2(\mathbf{v}, \beta_m) \triangleq & \sum_{m \in \mathcal{M}} \left( \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{\left| \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2}{\sum_{\underline{m} \in \mathcal{M}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1} \right) + \right. \\ & \left. \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \text{lb} \left( 1 + \frac{\left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2}{\sum_{j \in \mathcal{J}_m} \left| \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2 + \sum_{\substack{\underline{m} \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k}) \neq (m,k)}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1} \right) + \right. \\ & \left. \sum_{m \in \mathcal{M}} \beta_m \left( P_m^{\text{MBS}} - \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \left\| \mathbf{v}_k^m \right\|_2^2 \right) \right) \quad (19) \end{aligned}$$

类似于求解优化问题 OP<sub>1</sub>, 令  $\frac{\partial \mathcal{L}_2(\mathbf{v}, \beta_m)}{\partial \mathbf{v}_k^m} = 0$ ,

经变换可得

$$\frac{(\mathbf{g}_k^{m,m})^{\text{H}} \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m}{\chi_{m,k}^{\text{MU}} + \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2} = (\mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_{T_1}) \mathbf{v}_k^m \quad (20)$$

其中,  $\chi_{m,k}^{\text{MU}}$  表示蜂窝用户  $k$  的同信道干扰和接收到的噪声, 定义为

$$\chi_{m,k}^{\text{MU}} = \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \left| \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2 + \sum_{\substack{\underline{m} \in \mathcal{M} \\ (\underline{m}, \underline{k}) \neq (m,k)}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1$$

式(20)中的  $\mathbf{Y}_k^m$  定义为

$$\mathbf{Y}_k^m = \sum_{j \in \mathcal{J}_m} \frac{\text{SINR}_{m,j}^{\text{RU}} (\mathbf{h}_j^{m,m})^{\text{H}} \mathbf{h}_j^{m,m}}{\chi_{m,j}^{\text{RU}} + \left| \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2} \quad (21)$$

其中,  $\text{SINR}_{m,j}^{\text{RU}} = \frac{\left| \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \right|^2}{\sum_{\underline{m} \in \mathcal{M}} \sum_{\underline{k} \in \mathcal{K}_{\underline{m}}} \left| \mathbf{h}_j^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2 + 1}$  为第  $m$  个蜂窝网络中 RRH 用户  $j$  的信干比。

**定理 3** 优化问题 OP<sub>2</sub> 的最优波束成形向量  $\mathbf{v}_k^m$

( $\mathbf{v}_k^m \neq 0$ ) 可以表示为

$$\mathbf{v}_k^m = \lambda_k^m (\mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M)^\dagger (\mathbf{g}_k^{m,m})^H \quad (22)$$

并且常数  $\lambda_k^m$  可通过式(23)计算得到。

$$(\lambda_k^m)^2 = \frac{(\mathbf{g}_k^{m,m} (\mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M)^\dagger (\mathbf{g}_k^{m,m})^H - \chi_{m,k}^{\text{MU}})^+}{\left| \mathbf{g}_k^{m,m} (\mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M)^\dagger (\mathbf{g}_k^{m,m})^H \right|^2} \quad (23)$$

**证明** 见附录 B。

式(22)中的拉格朗日乘子  $\beta_m$ ，可通过式(24)进行更新。

$$\beta_m \leftarrow \left[ \beta_m + \eta_2 \left( P_m^{\text{MBS}} - \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \|\mathbf{v}_k^m\|_2^2 \right) \right]^+ \quad (24)$$

其中， $\eta_2$  为步长。

算法 3 给出了求解优化问题  $\text{OP}_2$  的算法步骤，该算法的计算复杂度主要来自求解矩阵  $(\mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M)$  的伪逆矩阵。因此，该算法每次迭代的复杂度为  $O\left(\sum_{m=1}^M K_m (T_1)^3\right)$ 。

**算法 3** 求解优化问题  $\text{OP}_2$  的算法

- 1) 初始化  $\mathbf{v}_k^m, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_m$
- 2) repeat
- 3) 根据式(21)计算矩阵  $\mathbf{Y}_k^m$
- 4) repeat
- 5) 根据式(25)更新  $\beta_m, \forall m \in \mathcal{M}$
- 6) 根据式 (23) 计算  $\lambda_k^m, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_m$
- 7) 根据式 (22) 计算  $\mathbf{v}_k^m, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_m$
- 8) until  $\lambda_k^m, \beta_m$  收敛
- 9) until  $\mathbf{v}_k^m$  收敛

综上所述，本文提出的 MBS 和 RRH 联合波束成形算法由外循环和内循环组成，外循环的具体步骤如算法 1 所示。算法 1 中步骤 3) 求解  $\mathbf{w}_t$  可通过算法 2 (内循环) 实现，算法 1 中步骤 4) 求解  $\mathbf{v}_t$  可通过算法 3 (内循环) 实现。

## 4 仿真实验

本节通过仿真实验来分析本文提出算法的性能。考虑一个 HC-RAN 网络，包含 3 个宏蜂窝网络，每个宏蜂窝网络配有一个 MBS 和 3 个 RRH。MBS

和 RRH 的覆盖范围分别为 500 m 和 50 m，蜂窝用户和 RRH 用户随机分布在对应的 MBS 和 RRH 覆盖范围内，仿真实验中部分参数设置参考文献[15]，具体设置如表 1 所示。不失一般性，令  $P_{m,j}^{\text{RRH}} = P_{\max}^{\text{RRH}}$ ， $P_m^{\text{MBS}} = P_{\max}^{\text{MBS}}$ 。仿真实验主要依靠 Matlab 软件平台及凸优化工具 CVX 实现。

表 1 仿真参数设置

参数	值
蜂窝网络的个数/个	3
系统带宽/MHz	10
每个 MBS 的覆盖半径/m	500
每个 RRH 的覆盖半径/m	50
每个蜂窝网络中 RRH、蜂窝用户、RRH 用户数	3、3、4
每个蜂窝网络中 MBS、RRH 的天线数	5、5
MBS 到蜂窝用户和 RRH 用户的路径损耗/dB	128.1+37.6lgd, d 表示距离 (单位 km)
RRH 到蜂窝用户和 RRH 用户的路径损耗/dB	140.1+36.7lgd, d 表示距离 (单位 km)
对数正态阴影(Log-normal shadowing) 衰落/dB	-8
穿透损耗/dB	-20

图 2 给出了 MBS 和 RRH 的功率门限取不同值时本文算法的收敛性，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，本文所提算法最终将收敛到最优数据传输速率。

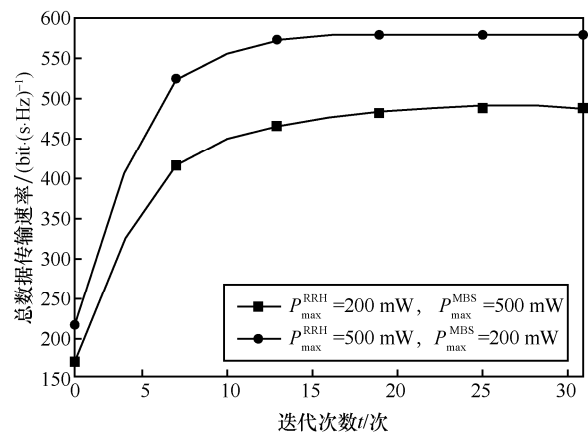


图 2 总数据传输速率随迭代次数  $t$  的变化

为了对比分析本文提出算法的性能，将本文算法与文献[9]中的 IC 算法及文献[15]中的算法进行了比较。文献[9]针对单个蜂窝网络的 H-CRAN 进

行研究，仅考虑了蜂窝网络内部的干扰，而没有考虑蜂窝网络间的干扰，提出的 IC 算法首先求出 MBS 波束成形向量，然后再对 MBS 和 RRH 天线的发射功率进行优化。文献[15]研究了多个蜂窝网络共存的 H-CRAN 波束成形问题，但是仅对 RRH 的波束成形向量进行优化，没有考虑 MBS 的波束成形向量优化问题。图 3 描述了 2 种算法的总数据传输速率随发射功率门限值  $P_{\max}^{\text{RRH}}$  变化曲线。从图中可以看出，系统的传输速率随着发射功率门限值  $P_{\max}^{\text{RRH}}$  的增大而增大，这是因为功率门限值  $P_{\max}^{\text{RRH}}$  越大，RRH 可用的发射功率范围就越大，分配给每个 RRH 用户的功率就越大，进而提高了 RRH 用户的传输速率，因此系统的总传输速率就会增大。本文算法的性能要优于其他算法，这是因为本文算法是在考虑蜂窝网络内部干扰和蜂窝网络间干扰的情况下，对 MBS 和 RRH 的波束成形向量进行联合优化，因此本文算法总能够寻找最优的解，减小蜂窝网络内和蜂窝网络间存在的干扰，使系统达到最高的传输速率。而 IC 算法无法消除蜂窝网络间的干扰，文献[15]中的算法没有对 MBS 和 RRH 的波束成形向量进行同时优化。

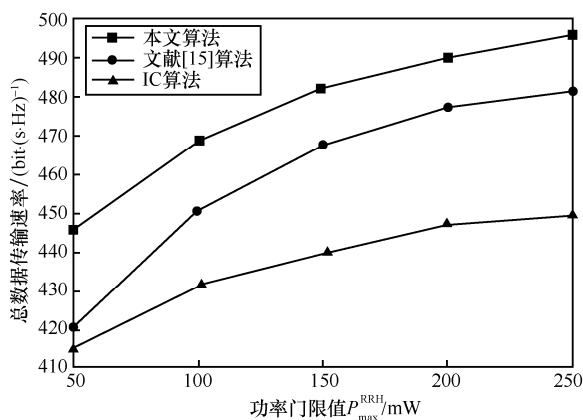


图 3 总数据传输速率随功率门限值  $P_{\max}^{\text{RRH}}$  的变化， $P_{\max}^{\text{MBS}} = 500 \text{ mW}$

图 4 分析了系统的总数据传输速率随发射功率门限值  $P_{\max}^{\text{MBS}}$  的变化曲线。与图 3 中的结论类似，当提高  $P_{\max}^{\text{MBS}}$  的值时，MBS 分配给蜂窝用户的功率增加，因此蜂窝用户的数据传输速率提高，进而系统的总数据传输速率增大。同样，由于 IC 算法是针对单个蜂窝网络设计的，仅考虑蜂窝内部的干扰，无法消除蜂窝间的干扰；文献[15]中的算法对 RRH 波束成形向量进行优化，没有考虑 MBS 和 RRH 的

波束成形向量联合优化问题。因此，本文算法的性能要优于 IC 算法和文献[15]中算法的性能。

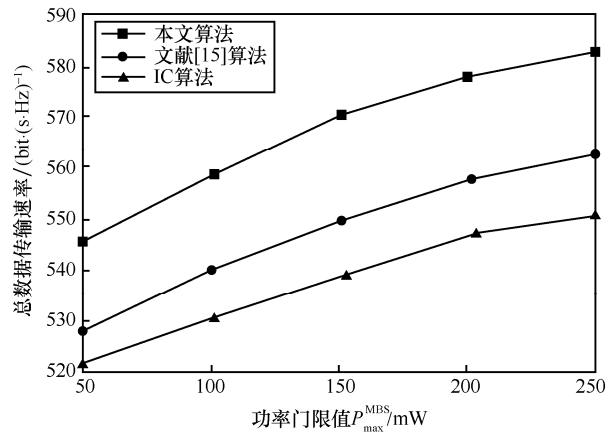


图 4 总数据传输速率随功率门限值  $P_{\max}^{\text{MBS}}$  的变化， $P_{\max}^{\text{RRH}} = 500 \text{ mW}$

图 5 为本文算法的性能随 MBS 天线数和 RRH 天线数的变化曲线，其中， $P_{\max}^{\text{MBS}} = 500 \text{ mW}$ ， $P_{\max}^{\text{RRH}} = 150 \text{ mW}$ 。不失一般性，令 MBS 的天线数与 RRH 的天线数相等，即  $T_1=T_2=T$ 。显然，随着每个天线数  $T$  的增加，系统的传输速率也增加，因此选择合适的天线数使传输速率达到最大也非常重要。由于本文提出的算法对 MBS 和 RRH 的波束成形向量进行联合优化，降低了蜂窝网络间和蜂窝内部存在的干扰，因此当天线数增加时，本文算法的性能优于其他 2 种算法。

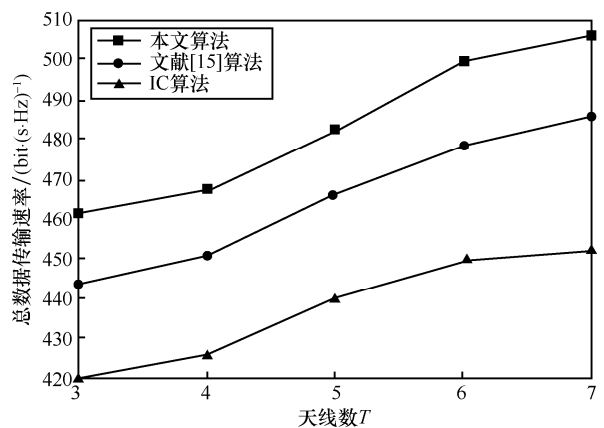


图 5 系统传输速率随天线数的变化

### 5 结束语

本文主要研究了复杂场景下的 H-CRAN 波束成形问题，以最大化系统的传输速率为优化目标，对 MBS 和 RRH 的波束成形向量进行联合优化。为

了解决该问题, 将原优化问题分解为 2 个子优化问题, 然后基于交替优化算法和拉格朗日对偶方法, 提出了一种新的 MBS 和 RRH 波束成形向量联合优化算法。另外, 还推导出了 2 个子优化问题解的闭式表达式, 并通过定理给出了证明。仿真实验结果证明了本文算法的收敛性, 以及在提高系统传输速率方面的性能。本文算法包含内循环和外循环, 算法的计算复杂度与迭代次数、RRH 用户和蜂窝用户个数以及天线数等有关。当采用大规模 MIMO 技术或者当 H-CRAN 网络中用户个数较多时, 算法复杂度较大。因此, 下一步工作主要研究在 H-CRAN 网络规模较大时, 如何利用大规模凸优化算法来有效解决算法复杂度较大的问题。另外, 研究如何有效地处理非凸优化问题, 将原非凸优化问题转化为易于处理的凸优化问题也是未来工作的重点。例如, 研究差分凸优化方法、加权最小均方误差方法来解决本文的非凸优化问题。

### 附录 A 定理 2 证明

**证明** 定理 2 的证明与文献[17]中命题的证明类似。

根据式(15)可知  $\mathbf{X}_j^m = \sum_{k \in \mathcal{K}_m} \frac{\text{SINR}_{m,k}^{\text{MU}} \left( \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}} \right)^{\text{H}} \mathbf{g}_{m,k}^{\text{All}}}{\chi_{m,k}^{\text{MU}} + \left| \mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \right|^2}$ , 因此,

$\mathbf{X}_j^m$  为正定矩阵。令  $\mathbf{\Gamma}_j^m = \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)}$ , 那么  $\mathbf{\Gamma}_j^m$  也为正定矩阵。又由于  $\mathbf{w}_j^m \neq 0$ , 因此  $\mathbf{\Gamma}_j^m \mathbf{w}_j^m \neq 0$ 。结合式(13)可知  $\mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \mathbf{w}_j^m \neq 0$ , 那么  $\left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}}$  与  $\mathbf{\Gamma}_j^m \mathbf{w}_j^m$  成正比, 即  $\left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}} \propto \mathbf{\Gamma}_j^m \mathbf{w}_j^m$ , 进而有  $\mathbf{w}_j^m \propto \left( \mathbf{\Gamma}_j^m \right)^{\dagger} \left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}}$ 。假设  $\mathbf{w}_j^m \propto \left( \mathbf{\Gamma}_j^m \right)^{\dagger} \left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}}$  的比例系数为  $\pi_j^m$ , 那么最优波束成形向量  $\mathbf{w}_j^m$  可定义为

$$\mathbf{w}_j^m = \pi_j^m \left( \mathbf{\Gamma}_j^m \right)^{\dagger} \left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}} \quad (25)$$

其中, 系数  $\pi_j^m \neq 0$ 。将式(17)代入式(13), 经计算可得

$$\left( \pi_j^m \right)^2 = \frac{\left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)^{\dagger} \left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}} - \chi_{m,j}^{\text{RU}} \right)^+}{\left| \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \left( \mathbf{X}_j^m + \ln 2 \alpha_{m,j} \mathbf{I}_{(N_m T_2)} \right)^{\dagger} \left( \mathbf{h}_{m,j}^{\text{All}} \right)^{\text{H}} \right|^2} \quad (26)$$

证毕。

### 附录 B 定理 3 证明

**证明** 定理 3 的证明与定理 2 的证明类似。

根据式(21)可知  $\mathbf{Y}_k^m$  为正定矩阵, 因此  $\left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_{T_1} \right)$  也为正定矩阵, 由于  $\mathbf{v}_k^m \neq 0$ , 那么  $\left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_{T_1} \right) \mathbf{v}_k^m$ 。结合

式(20)可知,  $\mathbf{g}_k^{m,m} \mathbf{v}_k^m \neq 0$ , 可知  $\left( \mathbf{g}_k^{m,m} \right)^{\text{H}} \propto \left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_{T_1} \right) \mathbf{v}_k^m$ , 假设其比例系数为  $\lambda_k^m$ , 那么最优波束成形向量  $\mathbf{v}_k^m$  有如式(27)所示形式。

$$\mathbf{v}_k^m = \lambda_k^m \left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M \right)^{\dagger} \left( \mathbf{g}_k^{m,m} \right)^{\text{H}} \quad (27)$$

其中, 系数  $\lambda_k^m \neq 0$ 。将式(23)代入式(21), 经计算可得

$$\left( \lambda_k^m \right)^2 = \frac{\left( \mathbf{g}_k^{m,m} \left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M \right)^{\dagger} \left( \mathbf{g}_k^{m,m} \right)^{\text{H}} - \chi_{m,k}^{\text{MU}} \right)^+}{\left| \mathbf{g}_k^{m,m} \left( \mathbf{Y}_k^m + \ln 2 \beta_m \mathbf{I}_M \right)^{\dagger} \left( \mathbf{g}_k^{m,m} \right)^{\text{H}} \right|^2} \quad (28)$$

证毕。

### 参考文献:

- [1] GAO Z G, CHEN D J, CAI S B, et.al. OptDynLim: an optimal algorithm for the one-dimensional RSU deployment problem with non-uniform profit density[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 11(4):1-10.
- [2] GAO Z G, CHEN D J, CAI S B, et.al. Optimal and greedy algorithms for the one-dimensional RSU deployment problem with new model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8):7643-7657.
- [3] 阎少宏, 吴宇航, 龚佃选. 基于蜂窝通信系统的中继器分布优化研究[J]. 通信学报, 2016, 37(Z1):72-77.
- YAN S H, WU Y H, GONG D X. Research on decision making of optimal communication system based on user[J]. Journal on Communications, 2016, 37(Z1):72-77.
- [4] ALIMI I A, TEXIXEIRA A L, PEREIRA P. Toward on efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: a tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1):708-769.
- [5] 邵雯娟, 沈庆国. 软件定义的 D2D 和 V2X 通信研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(4):179-194.
- SHAO W J, SHEN Q G. Survey of software defined D2D and V2X communication[J]. Journal on Communications, 2019, 40(4):179-194.
- [6] ZHOU Z Y, MUMTAZ S, HUQ K M, et.al. Cloud miracles: heterogeneous cloud RAN for fair coexistence of LET-U and Wi-Fi in ultra dense 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6):64-71.
- [7] GAO Z G, CHEN D J, SUN P, et.al. KM-based efficient algorithms for optimal packet scheduling problem in cellular/infestation integrated networks[J]. Ad Hoc Networks, 2018(77): 84-94.
- [8] PENG M G, LI Y, ZHAO Z Y, et.al. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Networks, 2015, 29(2):6-14.
- [9] PENG M G, XIANG H Y, CHEN Y Y, et.al. Inter-tier interference suppression in heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Access, 2015(3):2441-2455.
- [10] CHENG Y Y, YAN S, ZHOU J H, et.al. Average bit error rate and sum capacity in heterogeneous cloud radio access networks[C]// IEEE Vehicular Technology Conference. IEEE, 2015:1-5.

- [11] PENG M G, YU Y L, XIANG H Y, et.al. Energy-efficient resource allocation optimization for multimedia heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(5): 879-892.
- [12] WANG L F, WONG K K, ELKASHLAM M, et.al. Secrecy and energy efficiency in massive MIMO aided heterogeneous C-RAN: a new look at interference[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(8):1375-1389.
- [13] XIA W C, ZHANG J, TONY Q S, et.al. Joint optimization of fronthaul compression and bandwidth allocation in heterogeneous CRAN[C]//IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017: 1-6.
- [14] CHEN N, RONG B, ZHANG X R, et.al. Scalable and flexible massive MIMO precoding for 5G H-CRAN[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1):46-52.
- [15] WANG K W, ZHOU W Y, MAO S W. On joint BBU/RRH resource allocation in heterogeneous Cloud-RANs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(3):749-759.
- [16] SIDAN D, HUANG F J, WANG S W. Power allocation for orthogonal frequency division multiplexing-based cognitive radio networks with cooperative relays[J]. IET Communications, 2014, 8(6):921-929.
- [17] VENTURINO L, PRASAD N, WANG X D. Coordinated linear beamforming in downlink multi-cell wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1451-1461.
- [18] FANG F, CHENG J L, DING Z G. Joint energy efficient subchannel and power optimization for a downlink NOMA heterogeneous

network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1351-1364.

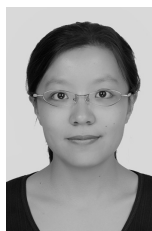
#### [作者简介]



左加阔（1985- ），男，山东枣庄人，博士，南京邮电大学讲师，主要研究方向为云无线接入网络资源管理、无线通信网络能效优化等。



杨龙祥（1966- ），男，江苏盐城人，博士，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为网络编码与协调通信、泛在网络与物联网技术、移动通信系统设计与优化等。



鲍楠（1985- ），女，江苏镇江人，博士，南京邮电大学讲师，主要研究方向为异构网络资源优化和干扰抑制等。