

## 基于硬件损伤的MIMO异构网络波束成形算法

徐勇军<sup>①②</sup> 谢豪<sup>①</sup> 陈前斌\*<sup>①</sup> 刘期烈<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 由于多输入多输出(MIMO)异构网络能够提高系统容量和实现更多的用户接入, 因此受到了学术界和工业界的广泛关注, 从而成为下一代通信系统的关键技术之一。然而, 由于放大器非线性、相位噪声和I/Q不平衡等因素的影响, 这类硬件损伤成为制约当前MIMO异构网络波束成形性能进一步提升的瓶颈。为了解决该问题, 该文提前将硬件损伤考虑到MIMO异构网络波束成形算法设计当中。首先, 考虑了每个基站的最大发射功率约束和每个用户的最小信干噪比约束, 建立了一个含硬件损伤参数的系统总能耗最小的资源优化问题。其次, 利用等价变换和半正定松弛方法, 将原非凸问题转化为凸优化问题进行求解。仿真结果表明, 与完美硬件条件下的波束成形算法对比, 所提算法具有较好的抗硬件损伤能力和较低的中断概率。

**关键词:** 异构网络; 多输入多输出; 硬件损伤; 波束成形; 能耗最小化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)12-3571-09

DOI: [10.11999/JEIT200776](https://doi.org/10.11999/JEIT200776)

## Beamforming Algorithm for MIMO-based Heterogeneous Networks with Hardware Impairments

XU Yongjun<sup>①②</sup> XIE Hao<sup>①</sup> CHEN Qianbin<sup>①</sup> LIU Qilie<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)-based Heterogeneous Network (HetNet) can improve system capacity and achieve more connectivity, which is dramatically concerned by academia and industry. Therefore, it becomes one of the key technologies in the next-generation communication system. However, due to the effect of factors such as amplifier nonlinearities, phase noise, and I/Q imbalance, these impairments become the bottlenecks for further improving the performance of beamforming in MIMO-based HetNets. In order to solve this problem, this paper studies the beamforming design in MIMO-based HetNets by considering hardware impairments ahead of time. Firstly, the resource allocation problem is formulated as the total transmit power minimization of the system with hardware impairments under the constraints of the maximum transmit power of each base station and the minimum signal-to-interference-plus-noise ratio of each user. Then, the original non-convex problem is transformed into an equivalent convex optimization problem by using the methods of the equivalent transformation and the semidefinite programming relaxation. Simulation results verify that the proposed algorithm has a low outage probability and can overcome the impact of hardware impairments by comparing it with the traditional beamforming algorithm with perfect hardware.

**Key words:** Heterogeneous Networks (HetNet); Multiple-Input Multiple-Output (MIMO); Hardware impairments; Beamforming; Power consumption minimization

收稿日期: 2020-09-01; 改回日期: 2021-09-22; 网络出版: 2021-10-27

\*通信作者: 陈前斌 chenqb@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61601071, 62071078), 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-xfkxX0002), 重庆研究生科研创新项目(CYS20253, CYS20251), 重庆市科技创新领军人才支持基金(CSTCCXLJRC201908), 重庆市自然科学基金重点资助项目(2019jcyj-zdxmX0008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601071, 62071078), Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2019jcyj-xfkxX0002), The Graduate Scientific Research Innovation Project of Chongqing (CYS20253, CYS20251), The Chongqing Science and Technology Innovation Leading Talent Support Program (CSTCCXLJRC201908), The Basic and Advanced Research Projects of CSTC (2019jcyj-zdxmX0008)

## 1 引言

随着第5代(The Fifth Generation, 5G)通信网络的逐渐商用,智能设备的数量呈现指数级增长,使得无线通信在系统容量和网络覆盖范围方面面临着严峻的挑战<sup>[1]</sup>。多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)和异构网络作为下一代通信网络的两种关键技术而备受关注。MIMO技术通过在基站或用户端部署大规模天线阵列,可以在同时同频的条件下服务多个用户来提高系统的频谱效率和能效。异构网络通过在宏蜂窝中部署大量的飞蜂窝来提高网络覆盖范围和解决小区边缘用户资源分配不均的问题。因此,将MIMO技术和异构网络结合所产生的新型网络(即MIMO异构网络)具有重要的理论意义和现实价值。然而,针对异构网络所带来的跨层干扰和MIMO技术引起的同频干扰,波束成形被认为是一种非常有效的技术去解决上述问题<sup>[2]</sup>。相关研究表明,波束成形算法通过灵活地调整波束成形向量来抑制跨层干扰的影响。因此,对MIMO异构网络波束成形算法的研究具有重要的意义<sup>[3]</sup>。

然而,传统的波束成形算法都是假设通信设备的硬件系统工作在理想状态,忽略了收发机残余硬件损伤对系统的影响。由于相位噪声、放大器非线性和I/Q不平衡等客观因素的影响,会导致这类设备的工作模式或工作状态发生变化<sup>[4]</sup>。例如,在大规模MIMO系统中,通信设备制造商会为了降低硬件成本而使用廉价的元器件,这将增加硬件损伤的可能。然而,目前存在的一些发射机校准方案和接收机补偿算法并不能完全消除硬件损伤对系统的影响<sup>[5,6]</sup>。因此,在MIMO异构网络中考虑硬件损伤来提高系统的鲁棒性,减少通信中断是很有必要的。

由于硬件损伤的算法设计可以提高系统性能,因此大量学者将硬件损伤考虑到无线通信网络的性能分析与算法设计当中。在单天线网络方面,基于毫米波的设备与设备通信网络,文献<sup>[7]</sup>考虑了收发机处硬件损伤噪声、不完美信道状态信息(Channel State Information, CSI)和相邻设备节点的干扰,推导系统遍历容量上界和下界的表达式。针对一个多中继的混合射频/自由空间光通信系统,文献<sup>[8]</sup>考虑了信号发射端和中继节点的硬件损伤噪声,利用数值积分法推导出系统的中断概率和遍历容量的闭式表达式。为了提高频谱利用率,针对含硬件损伤的认知多中继网络,文献<sup>[9]</sup>考虑了收发机的硬件损伤噪声,并推导出瑞利衰落信道下的部分中继方案和机会式中继方案条件下的认知用户中断概率表达式。在相同场景下,文献<sup>[10]</sup>考虑了非理想认知

用户引起的硬件损伤噪声和不完美CSI引起的残余干扰,推导出系统的中断概率闭式表达式。为了增加用户的接入数量,非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术被提出来去解决网络数据量越来越大的问题。文献<sup>[11]</sup>在协作NOMA和非协作NOMA场景下,分析了硬件损伤和不完美CSI对中断概率、遍历容量和系统能效的影响。与上述单天线网络场景<sup>[7-11]</sup>不同的是,文献<sup>[12]</sup>在大规模MIMO系统中将收发机硬件损伤建模为加性硬件损伤噪声,分析了该噪声对用户上行和下行传输链路吞吐量和信道估计的影响。针对通信系统存在窃听者的场景,文献<sup>[13]</sup>分析了安全多天系统系统中相位噪声对下行链路保密性能的影响。文献<sup>[14]</sup>研究了相位噪声、硬件损伤噪声和放大的热噪声对大规模MIMO系统的影响,并提出一种速率分拆鲁棒策略去提升系统性能。以上工作都是分析硬件损伤对系统性能的影响,没有从无线电资源管理或波束成形的角度来提高网络性能。为了提高通信网络的鲁棒性,针对硬件损伤下的无线供电通信网络,文献<sup>[15]</sup>研究了能耗最小化目标下的安全波束成形设计问题。

上述研究对硬件损伤领域的发展做出了巨大贡献,但是都集中在单层同构网络,并没有从多层或者多蜂窝异构网络的角度对硬件损伤进行分析。文献<sup>[16]</sup>将硬件损伤引入到MIMO异构网络中,利用随机几何理论推导出用户的覆盖概率,结果表明硬件损伤会降低系统性能,导致中断概率的提升。文献<sup>[17]</sup>针对多天线下行异构网络,考虑了导频污染、信道老化和硬件损伤的影响,研究了硬件损伤和不完美CSI对用户的覆盖概率和用户速率的影响。文献<sup>[18]</sup>在收发机硬件损伤和信道老化存在的情况下,建立了一个多层毫米波MIMO异构网络模型,推导了用户的覆盖概率表达式,并分析了上述因素对用户覆盖概率的影响。然而以上工作并没有考虑含硬件损伤参数的MIMO异构网络波束成形算法。因此,在考虑硬件损伤的基础上,研究MIMO异构网络波束成形算法具有重要意义。

为了提高系统的抗硬件损伤能力和鲁棒性,本文对含硬件损伤的MIMO异构网络波束成形问题进行研究。主要贡献:本文提前将硬件损伤考虑到资源优化问题中,并将收发机硬件损伤建模为加性硬件损伤噪声和放大热噪声;同时,考虑了基站最大发射功率约束和每个用户最小信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)约束,建立了一个多蜂窝MIMO异构网络总能耗最小化的波束成形设计问题。为了求解该问题,利用等价变换和半

正定松弛方法将原问题转化为一个凸问题，并利用凸优化工具箱进行求解。仿真结果表明，与传统算法相比，本文算法能够很好地克服硬件损伤的影响，并降低用户的中断概率。

## 2 系统模型

本文考虑一个多蜂窝MIMO异构网络下行传输场景，如图1所示。网络中有1个含 $N_M$ 根天线的宏蜂窝基站(宏基站)服务 $M$ 个单天线宏用户，有 $N$ 个飞蜂窝基站，且 $\forall m, i \in M = \{1, 2, \dots, M\}$ 和 $\forall n \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ ；任意第 $n$ 个飞蜂窝基站含 $N_F$ 根天线服务 $K_n$ 个单天线飞蜂窝用户，且 $\forall k, j \in K = \{1, 2, \dots, K_n\}$ 。假设信道为块衰落信道，飞蜂窝用户采用下垫式频谱模式共享宏用户的频谱。因此，飞蜂窝用户对任意一个宏用户接收机总的跨层干扰要不大于干扰温度门限值<sup>[16-19]</sup>。基于3GPP对异构网络的描述<sup>[19]</sup>，飞蜂窝基站通常具有较低的发射功率且飞蜂窝用户会受到很强的墙壁穿透损耗，与大多数工作相同<sup>[16-20]</sup>，假设不同飞蜂窝之间的相互干扰可以忽略不计。

### 2.1 理想信号传输模型

根据图1所示的下行传输模型，第 $m$ 个宏用户接收到的信号为

$$y_m = \mathbf{h}_m^H \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m s_m \right) + \sum_{n=1}^N \mathbf{g}_{n,m}^H \left( \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} s_{n,k} \right) + n_m^{\text{AWGN}} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{w}_m \in X^{N_M \times 1}$ 和 $s_m$ 分别表示宏基站到第 $m$ 个宏用户的波束成形向量和信息。 $\mathbf{v}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 和 $s_{n,k}$ 分别表示第 $n$ 个飞蜂窝基站到第 $k$ 个飞蜂窝用户的波束成形向量和信息，其中 $\mathbb{E}\{|s_m|^2\} = 1$ 和 $\mathbb{E}\{|s_{n,k}|^2\} = 1$ 。 $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$ 和 $\mathbf{g}_{n,m} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 分别表示宏基站和第 $n$ 个飞蜂窝基站到第 $m$ 个宏用户的

信道向量。 $n_m^{\text{AWGN}} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_m^2)$ 表示第 $m$ 个宏用户处均值为零、方差为 $\sigma_m^2$ 的加性高斯白噪声。

第 $n$ 个飞蜂窝中第 $k$ 个飞蜂窝用户接收到的信号为

$$y_{n,k} = \mathbf{h}_{n,k}^H \left( \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} s_{n,k} \right) + \mathbf{f}_{n,k}^H \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m s_m \right) + n_{n,k}^{\text{AWGN}} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{h}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 和 $\mathbf{f}_{n,k} \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$ 分别表示第 $n$ 个飞蜂窝基站和宏基站到第 $n$ 个飞蜂窝中第 $k$ 个飞蜂窝用户的信道向量。 $n_{n,k}^{\text{AWGN}} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{n,k}^2)$ 表示第 $n$ 个飞蜂窝中第 $k$ 个飞蜂窝用户处均值为零、方差为 $\sigma_{n,k}^2$ 的加性高斯白噪声。

### 2.2 含硬件损伤的信号传输模型

式(1)和式(2)是一种经典的信号接收模型，并没有考虑硬件损伤对收发信号的影响。在实际系统中，由于相位噪声和I/Q不平衡等因素的影响，基站或用户设备都可能受到残余硬件损伤的影响，该残余硬件损伤会扭曲期望的接收信号。考虑残余硬件损伤和热噪声的影响，第 $m$ 个宏用户接收机信号为

$$\begin{aligned} \bar{y}_m = & \mathbf{h}_m^H \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m s_m + \boldsymbol{\eta}_M^t \right) \\ & + \sum_{n=1}^N \mathbf{g}_{n,m}^H \left( \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} s_{n,k} + \boldsymbol{\eta}_n^t \right) + \eta_m^r + n_m \end{aligned} \quad (3)$$

与式(1)对比，式(3)含有加性硬件损伤噪声项 $\boldsymbol{\eta}_M^t$ ， $\boldsymbol{\eta}_n^t$ 和 $\eta_m^r$ 。 $\boldsymbol{\eta}_M^t \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$ ， $\boldsymbol{\eta}_n^t \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 和 $\eta_m^r \sim \mathcal{CN}\{0, (\delta_m^r)^2\}$ 分别为宏基站、第 $n$ 个飞蜂窝基站和第 $m$ 个宏用户的加性硬件损伤噪声<sup>[6]</sup>。其中， $(\delta_m^r)^2$ 表示第 $m$ 个宏用户接收机硬件损伤噪声的方差。 $n_m \sim \mathcal{CN}(0, \delta_m^2)$ 表示在第 $m$ 个宏用户处均值为零、方差为 $\delta_m^2$ 的热噪声<sup>[4]</sup>。基于式(3)，第 $m$ 个宏用户的SINR为

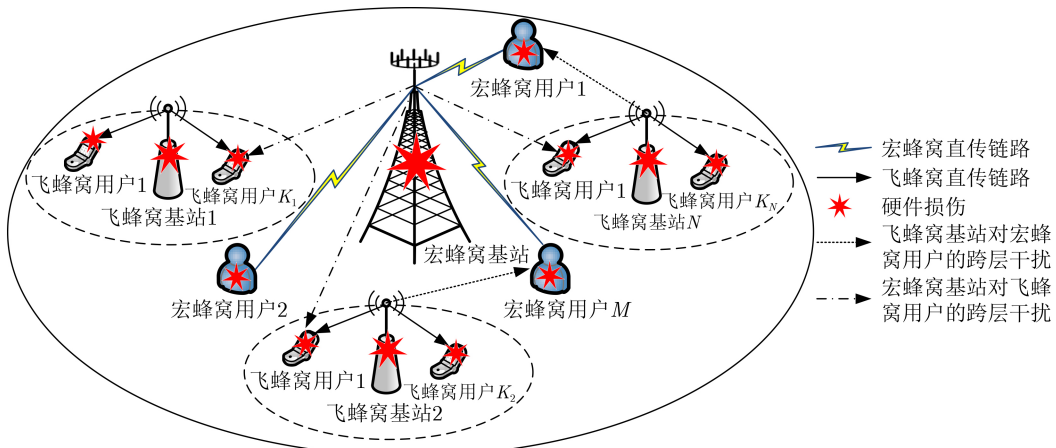


图1 硬件损伤条件下的两层MIMO异构网络

$$\gamma_m = \frac{|h_m^H \mathbf{w}_m|^2}{\sum_{i \neq m} |h_m^H \mathbf{w}_i|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} |g_{n,m}^H \mathbf{v}_{n,k}|^2 + D_m + \delta_m^2} \quad (4)$$

其中,  $D_m = |h_m^H \boldsymbol{\eta}_M^t|^2 + \sum_{n=1}^N |g_{n,m}^H \boldsymbol{\eta}_n^t|^2 + (\delta_m^r)^2$  表示来自宏基站、所有飞蜂窝基站和第 $m$ 个宏用户的硬件损伤噪声功率之和。

同理, 第 $n$ 个飞蜂窝基站到第 $k$ 个飞蜂窝用户的信号为

$$\bar{y}_{n,k} = h_{n,k}^H \left( \sum_{k=1}^{K_n} v_{n,k} s_{n,k} + \boldsymbol{\eta}_n^t \right) + f_{n,k}^H \left( \sum_{m=1}^M w_m s_m + \boldsymbol{\eta}_M^t \right) + \eta_{n,k}^r + n_{n,k} \quad (5)$$

其中,  $\eta_{n,k}^r \sim \mathcal{CN}\{0, (\delta_{n,k}^r)^2\}$  表示第 $n$ 个飞蜂窝中用户 $k$ 处均值为零、方差为 $(\delta_{n,k}^r)^2$ 的加性硬件损伤噪声。 $n_{n,k} \sim \mathcal{CN}(0, \delta_{n,k}^2)$  为对应接收机处放大的热噪声。基于式(5), 第 $n$ 个飞蜂窝中用户 $k$ 的SINR为

$$\gamma_{n,k} = \frac{|h_{n,k}^H \mathbf{v}_{n,k}|^2}{\sum_{j \neq k} |h_{n,k}^H \mathbf{v}_{n,j}|^2 + \sum_{m=1}^M |f_{n,k}^H \mathbf{w}_m|^2 + D_{n,k} + \delta_{n,k}^2} \quad (6)$$

其中,  $D_{n,k} = |h_{n,k}^H \boldsymbol{\eta}_n^t|^2 + |f_{n,k}^H \boldsymbol{\eta}_M^t|^2 + (\delta_{n,k}^r)^2$  表示第 $n$ 个飞蜂窝基站、宏基站和第 $n$ 个飞蜂窝中用户 $k$ 的硬件损伤噪声功率之和。

因此, 宏蜂窝和所有飞蜂窝的总功率消耗为

$$P^{\text{SUM}} = \zeta \left( \sum_{m=1}^M \|\mathbf{w}_m\|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \|\mathbf{v}_{n,k}\|^2 + \|\boldsymbol{\eta}_M^t\|^2 + \sum_{n=1}^N \|\boldsymbol{\eta}_n^t\|^2 \right) + P_C \quad (7)$$

其中,  $\|\cdot\|$  表示欧几里得范数,  $\zeta \geq 1$  表示功率放大系数,  $P_C$  是宏蜂窝和所有飞蜂窝的电路功率消耗<sup>[21]</sup>。

### 2.3 硬件损伤噪声模型

通常, 硬件损伤能够通过发射机校正方案或接收机补偿算法得到部分缓解, 但是发射机和接收机仍然存在一部分残余硬件损伤<sup>[5]</sup>, 将该残余硬件损伤建模成具有高斯随机过程的加性硬件损伤噪声, 其描述了多种残余硬件损伤的综合效应<sup>[12]</sup>, 这种方法广泛地应用到性能分析问题中<sup>[6,16-18]</sup>。因此, 收发机的硬件损伤噪声可以建模为  $\boldsymbol{\eta}_M^t \sim \mathcal{CN}(0, \boldsymbol{\psi})$ ,  $\boldsymbol{\eta}_n^t \sim \mathcal{CN}(0, \boldsymbol{\Phi}_n)$ ,  $\eta_m^r \sim \mathcal{CN}\{0, (\delta_m^r)^2\}$ ,  $\eta_{n,k}^r \sim \mathcal{CN}\{0, (\delta_{n,k}^r)^2\}$ , 其中,  $\boldsymbol{\psi}$  表示宏基站处加性硬件损伤

噪声的协方差矩阵,  $\boldsymbol{\Phi}_n$  表示第 $n$ 个飞蜂窝基站处硬件损伤噪声的协方差矩阵, 则

$$\boldsymbol{\psi} = (\kappa_M^t)^2 \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_{N_M}) \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_n = (\kappa_n^t)^2 \text{diag}(q_{n,1}, q_{n,2}, \dots, q_{n,N_F}) \quad (9)$$

$$(\delta_m^r)^2 = (\kappa_m^r)^2 \text{Tr} \left( \mathbf{H}_m \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H + \mathbf{G}_{n,m} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} \mathbf{v}_{n,k}^H \right) \quad (10)$$

$$(\delta_{n,k}^r)^2 = (\kappa_{n,k}^r)^2 \text{Tr} \left( \mathbf{H}_{n,k} \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} \mathbf{v}_{n,k}^H + \mathbf{F}_{n,k} \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H \right) \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{H}_m = \mathbf{h}_m \mathbf{h}_m^H$ ,  $\mathbf{H}_{n,k} = \mathbf{h}_{n,k} \mathbf{h}_{n,k}^H$ ,  $\mathbf{G}_{n,m} = \mathbf{g}_{n,m} \mathbf{g}_{n,m}^H$ ,  $\mathbf{F}_{n,k} = \mathbf{f}_{n,k} \mathbf{f}_{n,k}^H$ 。  $(\kappa_M^t)^2$ ,  $(\kappa_n^t)^2$ ,  $(\kappa_m^r)^2$  和  $(\kappa_{n,k}^r)^2$  分别描述了发射机和接收机硬件损伤程度<sup>[14]</sup>。同时, 宏基站和第 $n$ 个飞蜂窝基站发射信号向量的协方差矩阵可以表述为

$$\mathbf{P} = \mathbb{E} \left\{ \left\| \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m s_m \right\|^2 \right\} = \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H \quad (12)$$

$$\mathbf{Q}_n = \mathbb{E} \left\{ \left\| \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} s_{n,k} \right\|^2 \right\} = \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{v}_{n,k} \mathbf{v}_{n,k}^H \quad (13)$$

其中, 矩阵  $\mathbf{P}$  的主对角元素为  $p_1, p_2, \dots, p_{N_M}$ , 矩阵  $\mathbf{Q}_n$  的主对角元素为  $q_{n,1}, q_{n,2}, \dots, q_{n,N_F}$ 。

### 2.4 资源分配问题

考虑宏基站和飞蜂窝基站的发射功率约束, 宏用户的服务质量(Quality of Service, QoS)约束以及飞蜂窝用户的最小SINR约束, 建立式(14)所示系统总能耗最小化的波束成形优化问题

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \min_{\mathbf{w}_m, \mathbf{v}_{n,k}} \zeta \left( \sum_{m=1}^M \|\mathbf{w}_m\|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \|\mathbf{v}_{n,k}\|^2 \right. \\ & \left. + \|\boldsymbol{\eta}_M^t\|^2 + \sum_{n=1}^N \|\boldsymbol{\eta}_n^t\|^2 \right) + P_C \\ \text{s.t. } & \text{C}_1: \sum_{m=1}^M \|\mathbf{w}_m\|^2 \leq P^{\text{max}}, \\ & \text{C}_2: \sum_{k=1}^{K_n} \|\mathbf{v}_{n,k}\|^2 \leq P_n^{\text{max}}, \\ & \text{C}_3: \gamma_{n,k} \geq \gamma_{n,k}^{\text{min}}, \\ & \text{C}_4: \gamma_m \geq \gamma_m^{\text{min}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $\text{C}_1$  和  $\text{C}_2$  分别表示宏基站和第 $n$ 个飞蜂窝基站的发射功率约束,  $P^{\text{max}}$  和  $P_n^{\text{max}}$  分别表示宏基站

和第 $n$ 个飞蜂窝基站的最大发射功率阈值； $C_3$ 保证飞蜂窝用户的QoS， $\gamma_{n,k}^{\min}$ 表示第 $n$ 个飞蜂窝中用户 $k$ 的最小SINR阈值； $C_4$ 表示宏用户 $m$ 的最小SINR约束， $\gamma_m^{\min}$ 表示宏用户 $m$ 的最小SINR阈值。

### 3 资源分配算法

#### 3.1 波束成形算法

P1是一个非凸优化问题，为了使该问题容易处理，定义 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H$ ， $\mathbf{V}_{n,k} = \mathbf{v}_{n,k} \mathbf{v}_{n,k}^H$ 。则

$$\bar{\gamma}_m = \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_m \mathbf{W}_m)}{\text{Tr} \left( \sum_{i \neq m}^M \mathbf{H}_m \mathbf{W}_i \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{G}_{n,m} \mathbf{V}_{n,k} \right) + \bar{D}_m + \delta_m^2} \quad (15)$$

$$\bar{\gamma}_{n,k} = \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_{n,k} \mathbf{V}_{n,k})}{\text{Tr} \left( \sum_{j \neq k}^{K_n} \mathbf{H}_{n,k} \mathbf{V}_{n,j} \right) + \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{F}_{n,k} \mathbf{W}_m \right) + \bar{D}_{n,k} + \delta_{n,k}^2} \quad (16)$$

其中， $\bar{D}_m = \text{Tr}(\mathbf{H}_m \boldsymbol{\psi}) + \sum_{n=1}^N \text{Tr}(\mathbf{G}_{n,m} \boldsymbol{\Phi}_n) + (\delta_m^r)^2$ ， $\bar{D}_{n,k} = \text{Tr}(\mathbf{H}_{n,k} \boldsymbol{\Phi}_n) + \text{Tr}(\mathbf{F}_{n,k} \boldsymbol{\psi}) + (\delta_{n,k}^r)^2$ 。

同时，宏蜂窝和所有飞蜂窝的总能耗转化为

$$\bar{P}^{\text{SUM}} = \zeta \left( \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\Phi}_n \right) + \text{Tr}(\boldsymbol{\psi}) \right) + P_C \quad (17)$$

根据式(15)，式(16)和式(17)，P1转化为

$$\left. \begin{aligned} \text{P2: } & \min_{\mathbf{W}_m, \mathbf{V}_{n,k}} \zeta \left( \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\Phi}_n \right) + \text{Tr}(\boldsymbol{\psi}) \right) + P_C \\ \text{s.t. } & \bar{C}_1: \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right) \leq P^{\max}, \quad \bar{C}_2: \text{Tr} \left( \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} \right) \leq P_n^{\max}, \quad \bar{C}_3: \bar{\gamma}_{n,k} \geq \gamma_{n,k}^{\min}, \\ & \bar{C}_4: \bar{\gamma}_m \geq \gamma_m^{\min}, \quad C_5: \mathbf{W}_m \succeq 0, \mathbf{V}_{n,k} \succeq 0, \quad C_6: \text{Rank}(\mathbf{W}_m) = \text{Rank}(\mathbf{V}_{n,k}) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$\bar{C}_3$ 和 $\bar{C}_4$ 中优化变量的耦合关系，导致这类约束是非凸的。为了将P2转化为凸优化问题，引入辅助矩阵 $\mathbf{S}_t$ 和 $\mathbf{S}_l$ ，P2可以等价转化为

$$\left. \begin{aligned} \text{P3: } & \min_{\mathbf{W}_m, \mathbf{V}_{n,k}} \zeta \left( \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} \right) + A \right) + P_C \\ \text{s.t. } & \bar{C}_1, \bar{C}_2, C_5, C_6, \tilde{C}_3: \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_{n,k} \mathbf{V}_{n,k})}{\text{Tr} \left( \sum_{j \neq k}^{K_n} \mathbf{H}_{n,k} \mathbf{V}_{n,j} \right) + \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M \mathbf{F}_{n,k} \mathbf{W}_m \right) + \tilde{D}_{n,k} + \delta_{n,k}^2} \geq \gamma_{n,k}^{\min}, \\ & \tilde{C}_4: \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_m \mathbf{W}_m)}{\text{Tr} \left( \sum_{i \neq m}^M \mathbf{H}_m \mathbf{W}_i \right) + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{G}_{n,m} \mathbf{V}_{n,k} \right) + \tilde{D}_m + \delta_m^2} \geq \gamma_m^{\min} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中， $\mathbf{S}_t$ 和 $\mathbf{S}_l$ 分别表示第 $t$ 个和第 $l$ 个对角元素为1其余元素全为0的矩阵。 $A = \sum_{n=1}^N (\kappa_n^t)^2 \sum_{t=1}^{N_F} \text{Tr}(\mathbf{S}_t \mathbf{Q}_n) + (\kappa_M^t)^2 \sum_{l=1}^{N_M} \text{Tr}(\mathbf{S}_l \mathbf{P})$ ， $\tilde{D}_{n,k} = (\kappa_n^t)^2 \sum_{t=1}^{N_F} \text{Tr}(\mathbf{H}_{n,k} \mathbf{S}_t \mathbf{Q}_n) + (\kappa_M^t)^2 \sum_{l=1}^{N_M} \text{Tr}(\mathbf{F}_{n,k} \mathbf{S}_l \mathbf{P}) + (\kappa_{n,k}^r)^2 \text{Tr} \left( \mathbf{H}_{n,k} \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} + \mathbf{F}_{n,k} \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m \right)$ ， $\tilde{D}_m = (\kappa_M^t)^2 \sum_{l=1}^{N_M} \text{Tr}(\mathbf{H}_m \mathbf{S}_l \mathbf{P}) + \sum_{n=1}^N (\kappa_n^t)^2 \sum_{t=1}^{N_F} \text{Tr}(\mathbf{G}_{n,m} \mathbf{S}_t \mathbf{Q}_n) + (\kappa_m^r)^2 \text{Tr} \left( \mathbf{H}_m \sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m + \mathbf{G}_{n,m} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} \mathbf{V}_{n,k} \right)$ 。

在P3中，目标函数被转化为一个凸函数。然而，由于 $\tilde{C}_3$ 和 $\tilde{C}_4$ 中优化变量相互耦合，P3仍然是一个非凸优化问题。因此，将 $\tilde{C}_3$ 和 $\tilde{C}_4$ 分别等价转化为以下约束

$$\begin{aligned} & \text{Tr}(H_{n,k}V_{n,k}) - \gamma_{n,k}^{\min} \left( \text{Tr} \left( \sum_{j \neq k}^{K_n} H_{n,k}V_{n,j} \right) \right) \\ & + \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M F_{n,k}W_m \right) + \tilde{D}_{n,k} + \delta_{n,k}^2 \geq 0 \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tr}(H_m W_m) - \gamma_m^{\min} \left( \text{Tr} \left( \sum_{i \neq m}^M H_m W_i \right) \right) \\ & + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} G_{n,m}V_{n,k} \right) + \tilde{D}_m + \delta_m^2 \geq 0 \quad (21) \end{aligned}$$

根据式(20)和式(21), P3可以转化为

$$\begin{aligned} \text{P4: } & \min_{W_m, V_{n,k}} \zeta \left( \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M W_m \right) \right) \\ & + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} V_{n,k} \right) + A + P_C \\ \text{s.t. } & \bar{C}_1, \bar{C}_2, C_5, C_6, \hat{C}_3: \text{Tr}(H_{n,k}V_{n,k}) \\ & - \gamma_{n,k}^{\min} \left( \text{Tr} \left( \sum_{j \neq k}^{K_n} H_{n,k}V_{n,j} \right) \right) \\ & + \text{Tr} \left( \sum_{m=1}^M F_{n,k}W_m \right) + \tilde{D}_{n,k} + \delta_{n,k}^2 \geq 0, \\ & \hat{C}_4: \text{Tr}(H_m W_m) - \gamma_m^{\min} \left( \text{Tr} \left( \sum_{i \neq m}^M H_m W_i \right) \right) \\ & + \text{Tr} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} G_{n,m}V_{n,k} \right) + \tilde{D}_m + \delta_m^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

由于秩一约束 $C_6$ , P4仍是一个非凸优化问题。基于半正定松弛法, 舍弃秩一约束 $C_6$ <sup>[15]</sup>。因此, P4是一个凸优化问题, 可以通过凸优化工具箱直接求解<sup>[22]</sup>。另外, 如果P4的最优解满足秩一约束, 则最优波束成形向量 $\mathbf{w}_m^*$ 和 $\mathbf{v}_{n,k}^*$ 可以通过特征值分解法获得。否则, 利用高斯随机法可以获得近似解<sup>[23]</sup>。

### 3.2 算法复杂度分析

定义 $\varepsilon$ 为解的精度, 根据文献<sup>[24]</sup>, 可以获得经典内点法的计算复杂度为 $O\{\sqrt{\beta(\bar{\kappa})}L \ln(1/\varepsilon)\}$ 。 $\beta(\bar{\kappa})$ 表示障碍参数;  $L$ 表示每一次迭代的开销。其具体表达式为:  $\beta(\bar{\kappa}) = \sum_{x=1}^u c_x + 2(d-u)$ , 其中,  $u$ 表示半正定约束数量,  $d-u$ 表示2阶锥约束的数量,  $c_x$ 表示第 $x$ 个半正定约束的维数;  $L = y \sum_{x=1}^u (c_x)^3 + y^2 \sum_{x=1}^u (c_x)^2 + y \sum_{x=u+1}^d (\lambda_x)^2 + y^3$ , 其中,  $\lambda_x$ 表示第 $x$ 个2阶锥约束的维数,  $y$ 表示优化变量的数量。基于上述定义, 本文所提算法的复杂度可以表示为 $O\{\sqrt{\beta(\bar{\kappa})}\bar{L} \ln(1/\varepsilon)\}$ 。其中,  $\bar{\varepsilon}$ 为本文算法解的

精度,  $\bar{\beta}(\bar{\kappa})$ 表示本文算法的障碍参数,  $\bar{L}$ 表示本文算法每一次迭代的开销。其具体表达式为

$$\bar{\beta}(\bar{\kappa}) = N_M M + N_F \sum_{n=1}^N K_n + M + \sum_{n=1}^N K_n + 2 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \bar{L} = & \bar{y} N_M^2 M (N_M + \bar{y}) + \bar{y} N_F^2 \sum_{n=1}^N K_n (N_F + \bar{y}) \\ & + (\bar{y}^2 + \bar{y}) \left( M + \sum_{n=1}^N K_n + 2 \right) + \bar{y}^3 \quad (24) \end{aligned}$$

其中,  $\bar{y} = N_M^2 M + N_F^2 \sum_{n=1}^N K_n$ 表示本文算法优化变量的数量。

## 4 仿真结果与分析

本小节将通过数值仿真来验证算法的有效性。假设系统中有一个宏蜂窝和两个飞蜂窝, 其覆盖半径分别为500 m和20 m, 飞蜂窝之间的最小距离为40 m。宏蜂窝中有两个宏用户, 每个飞蜂窝中有两个飞蜂窝用户。假设基站天线数为4, 信道衰落由大尺度衰落和小尺度衰落组成<sup>[25]</sup>; 大尺度衰落为 $D = A_0(d/d_0)^{-\alpha}$ , 其中 $d$ 表示收发机之间的距离, 参考距离 $d_0$ 为20 m,  $\alpha = 3$ 为路损指数。小尺度衰落系数 $A_0$ 遵循均值为0、方差为1的复高斯分布。假设收发机处的噪声方差都相等 $\delta^2 = \delta_m^2 = \delta_{n,k}^2, \forall m, n, k$ , 硬件损伤因子 $\kappa_M^t = \kappa_n^t = \kappa^t, \kappa_m^r = \kappa_{n,k}^r = \kappa^r$ 在区间 $[0, 0.3]$ 内取值。为验证本文算法有效性, 与传统算法进行对比, 传统算法为理想的收发机设备( $\kappa^t = \kappa^r = 0$ ), 其他参数如表1所示。

图2给出了系统总能耗与硬件损伤参数的关系。从图中可以看出, 当 $\kappa^r$ 不变时, 随着 $\kappa^t$ 增大, 系统总能耗逐渐增大。另外, 在相同 $\kappa^t$ 下, 随着 $\kappa^r$ 增大, 系统总能耗增大。其原因是, 基于 $C_3$ 和 $C_4$ , 硬件损伤参数增大意味着用户的硬件损伤噪声增加, 用户SINR降低; 为了保证最小SINR约束, 基站分配更多的功率来保证用户的通信质量。

图3给出了不同算法下系统总能耗与用户SINR阈值的关系。不失一般性, 定义 $\gamma_{n,k}^{\min} = \gamma_{\text{F0}}^{\min}, \forall n, k$ 和 $\gamma_m^{\min} = \gamma_{\text{M0}}^{\min}, \forall m$ , 从图中可以看出, 随着用户

表1 仿真参数

参数	值	参数	值
$P_n^{\max}$ (W)	10	$P_n^{\max}$ (W)	0.1
$P_C$ (mW)	1	$\gamma_m^{\min}$	1
$\gamma_{n,k}^{\min}$	1	$\zeta$	5
$\delta^2$ (W)	$10^{-8}$	$M$	2
$N$	2	$K_1, K_2$	2

SINR阈值( $\gamma_{MU}^{min}$ 或 $\gamma_{FE}^{min}$ )增加,系统总能耗增大。因为提高用户SINR阈值,基站需要分配更多的功率用于信息传输来满足 $C_3$ 和 $C_4$ ,从而导致系统总能耗的增大。另外,在相同SINR阈值下,本文算法的系统总能耗要高于传统算法。因为传统算法没有考虑硬件损伤对收发机的影响。而本文算法为了减少通信中断事件的发生,基站将会分配更多的功率来克服硬件损伤参数对用户SINR的影响,防止用户产生中断。

图4给出了不同算法下系统总能耗与飞蜂窝基站天线数量的关系。从图中可以看出,在相同 $\kappa^t$ 和 $\kappa^r$ 下,随着飞蜂窝基站天线数量的增加,系统总能耗

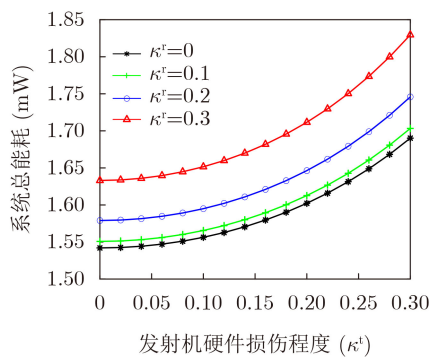


图2 系统总能耗与硬件损伤参数的关系

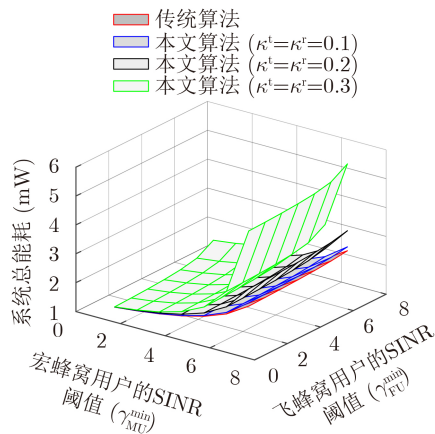


图3 系统总能耗与用户SINR阈值的关系

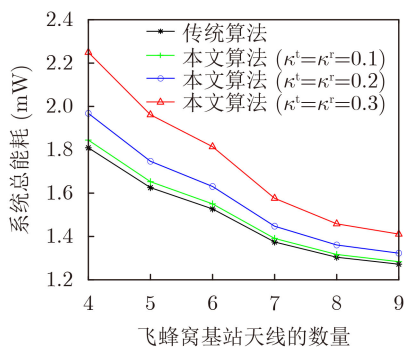


图4 系统总能耗与飞蜂窝基站天线数量的关系

耗减小。因为增加飞蜂窝基站的天线数量可以提供额外的自由度,使得飞蜂窝网络可以有效地减小功率消耗。此外,随着飞蜂窝基站天线数量的增加,不同曲线之间的间距越来越小。因为更低的发射功率和更精准的波束成形减小了收发机中硬件损伤对系统性能的影响。此外,本文算法的系统总能耗随着硬件损伤参数增加而增大。因为硬件损伤参数的增加意味着系统考虑了更严重的硬件损伤,为了克服该因素的影响,系统会分配更多的功率给用户来防止用户产生中断。

图5给出了不同算法下系统总能耗与宏基站天线数量的关系。在相同 $\kappa^t$ 和 $\kappa^r$ 下,随着宏基站天线数量增加,系统总能耗减小。因为增加宏基站的天线数量可以提供额外的自由度,从而系统可以实现更有效的资源分配。另外,系统总能耗随着硬件损伤参数的增加而增大,但是系统总能耗之间的差距并不是成倍增加的。因为 $\kappa^t$ 和 $\kappa^r$ 增大,用户SINR中的相互干扰功率会增大,从而导致系统需要消耗更多的功率来克服该干扰功率的影响。

图6给出了不同算法下宏用户平均中断概率与SINR阈值 $\gamma_{MU}^{min}$ 的关系。从图中可以看出,随着 $\gamma_{MU}^{min}$ 增加,宏用户的平均中断概率逐渐增大。因为, $\gamma_{MU}^{min}$ 越大会使得宏用户的SINR约束 $C_4$ 越难以满足,从而使得宏用户的中断概率增大。另外,本文算法和传统算法相比,平均中断概率降低了大约8.1%。

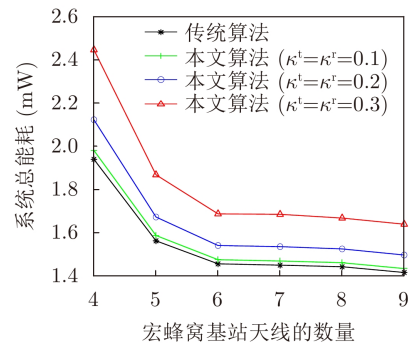


图5 系统总能耗与宏基站天线数量的关系

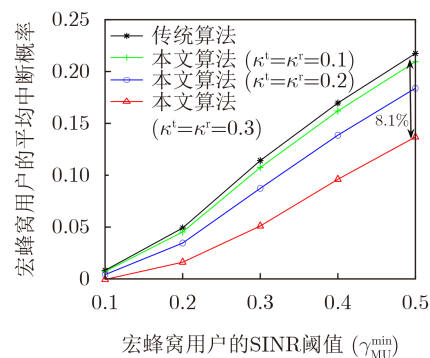


图6 平均中断概率与 $\gamma_{MU}^{min}$ 的关系

为本文算法为了克服硬件损伤的影响,通过分配更多的功率给用户来满足 $C_4$ 约束,从而使得系统总能耗增加。当硬件损伤参数增大时,本文算法具有更强的抗硬件损伤能力。当收发机出现更严重的硬件损伤时,系统仍然能够保证用户的通信质量。

图7给出了不同算法下飞蜂窝用户平均中断概率与SINR阈值 $\gamma_{FU}^{\min}$ 的关系。从图中可以看出,随着 $\gamma_{FU}^{\min}$ 增大,飞蜂窝用户的平均中断概率逐渐增加。因为, $\gamma_{FU}^{\min}$ 越大会使得飞蜂窝用户的SINR约束越来越难满足,从而使得飞蜂窝用户的中断概率增大。另外,本文算法飞蜂窝用户的平均中断概率比传统算法降低了大约6.6%。这进一步验证了本文算法具有较强的抗硬件损伤能力。

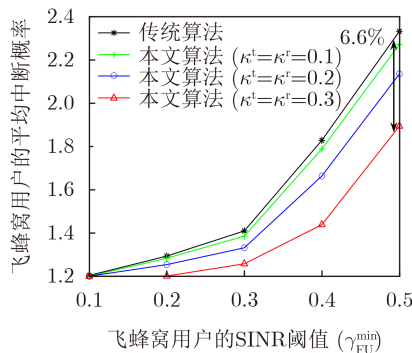


图7 平均中断概率与 $\gamma_{FU}^{\min}$ 的关系

## 5 结论

本文针对含硬件损伤参数的MIMO异构网络波束成形设计问题展开研究。考虑收发机处硬件损伤的影响以及每个基站的最大发射功率约束和每个用户的最小SINR约束,建立了一个多蜂窝多用户系统总能耗最小的波束成形优化问题。针对该非凸优化问题,利用等价变换和半正定松弛方法将其转化为等价的凸优化问题进行求解。仿真结果表明本文算法具有较好的抗硬件损伤能力和鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 徐勇军, 彭瑶, 余晓磊, 等. 面向5G协作通信系统的资源分配技术综述[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2019, 31(2): 143–157. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2019.02.001.
- [2] XU Yongjun, PENG Yao, YU Xiaolei, et al. Survey on resource allocation techniques for 5G cooperative communication networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2019, 31(2): 143–157. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.2019.02.001.
- [3] 李国权, 徐勇军, 陈前斌. 基于干扰效率多蜂窝异构无线网络最优基站选择及功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4): 957–964. doi: 10.11999/JEIT190419.
- [4] LI Guoquan, XU Yongjun, and CHEN Qianbin. Interference efficiency-based base station selection and power allocation algorithm for multi-cell heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(4): 957–964. doi: 10.11999/JEIT190419.
- [5] NGUYEN L D, TUAN H, DUONG T Q, et al. Downlink beamforming for energy-efficient heterogeneous networks with massive MIMO and small cells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(5): 3386–3400. doi: 10.1109/TWC.2018.2811472.
- [6] XU Yongjun, GUI Guan, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668–695. doi: 10.1109/COMST.2021.3059896.
- [7] STUDER C, WENK M, and BURG A. MIMO transmission with residual transmit-RF impairments[C]. Proceedings of 2010 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Bremen, Germany, 2010: 189–196.
- [8] ZHANG Jiayi, XUE Xipeng, BJÖRNSON E, et al. Spectral efficiency of multipair massive MIMO two-way relaying with hardware impairments[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(1): 14–17. doi: 10.1109/LWC.2017.2750162.
- [9] TLEBALDIYEVA L, MAHAM B, and TSIFTISIS T A. Capacity analysis of device-to-device mmWave networks under transceiver distortion noise and imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5): 5707–5712. doi: 10.1109/TVT.2020.2983417.
- [10] BALLTI E, GUIZANI M, HAMDAROU B, et al. Aggregate hardware impairments over mixed RF/FSO relaying systems with outdated CSI[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(3): 1110–1123. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2776261.
- [11] SHARMA P K and UPADHYAY P K. Cognitive relaying with transceiver hardware impairments under interference constraints[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(4): 820–823. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2533500.
- [12] SOLANKI S, UPADHYAY P, DA COSTA D B, et al. Joint impact of RF hardware impairments and channel estimation errors in spectrum sharing multiple-relay networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 3809–3824. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2832623.
- [13] LI Xingwang, LI Jingjing, LIU Yuanwei, et al. Residual transceiver hardware impairments on cooperative NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 680–695. doi: 10.1109/TWC.2019.2947670.
- [14] BJÖRNSON E, HOYDIS J, KOUNTOURIS M, et al. Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy

- efficiency, estimation, and capacity limits[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(11): 7112–7139. doi: [10.1109/TIT.2014.2354403](https://doi.org/10.1109/TIT.2014.2354403).
- [13] ZHU Jun, NG D W K, WANG Ning, *et al.* Analysis and design of secure massive MIMO systems in the presence of hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 2001–2016. doi: [10.1109/TWC.2017.2659724](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2659724).
- [14] PAPAFAFEIROPOULOS A, CLERCKX B, and RATNARAJAH T. Rate-splitting to mitigate residual transceiver hardware impairments in massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8196–8211. doi: [10.1109/TVT.2017.2691014](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2691014).
- [15] BOSHKOVSKA E, NG D W K, DAI Linglong, *et al.* Power-efficient and secure WPCNs with hardware impairments and non-linear EH circuit[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(6): 2642–2657. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2783628](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2783628).
- [16] PAPAFAFEIROPOULOS A K and RATNARAJAH T. Downlink MIMO HCNs with residual transceiver hardware impairments[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(10): 2023–2026. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2593480](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2593480).
- [17] PAPAFAFEIROPOULOS A and RATNARAJAH T. Toward a realistic assessment of multiple antenna HCNs: Residual additive transceiver hardware impairments and channel aging[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 9061–9073. doi: [10.1109/TVT.2017.2710188](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2710188).
- [18] PAPAFAFEIROPOULOS A, RATNARAJAH T, KOURTESSIS P, *et al.* Nuts and bolts of a realistic stochastic geometric analysis of mmWave HetNets: Hardware impairments and channel aging[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5657–5671. doi: [10.1109/TVT.2019.2908044](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2908044).
- [19] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Yongbin *et al.* A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 10–21. doi: [10.1109/MWC.2011.5876496](https://doi.org/10.1109/MWC.2011.5876496).
- [20] FANG Fang, CHENG Julian, and DING Zhiguo. Joint energy efficient subchannel and power optimization for a downlink NOMA heterogeneous network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1351–1364. doi: [10.1109/TVT.2018.2881314](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2881314).
- [21] SHENG Min, WANG Liang, WANG Xijun, *et al.* Energy efficient beamforming in MISO heterogeneous cellular networks with wireless information and power transfer[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 954–968. doi: [10.1109/JSAC.2016.2544538](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2544538).
- [22] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [23] LUO Zhiqian, MA W K, SO A M C, *et al.* Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20–34. doi: [10.1109/MSP.2010.936019](https://doi.org/10.1109/MSP.2010.936019).
- [24] WANG Kunyu, SO A M C, CHANG T H, *et al.* Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: Tractable approximations by conic optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(21): 5690–5705. doi: [10.1109/TSP.2014.2354312](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2354312).
- [25] CHU Zheng, ZHU Zhengyu, JOHNSTON M, *et al.* Simultaneous wireless information power transfer for MISO secrecy channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 6913–6925. doi: [10.1109/TVT.2015.2499439](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2499439).
- 徐勇军：男，1986年生，副教授，硕士生导师，研究方向为资源分配、异构无线网络、硬件损伤通信。
- 谢豪：男，1997年生，硕士生，研究方向为硬件损伤通信、异构网络资源分配。
- 陈前斌：男，1967年生，教授，博士生导师，研究方向为无线通信、多媒体信息传输与处理。
- 刘期烈：男，1974年生，教授，硕士生导师，研究方向为无线传感器网络、卫星通信。

责任编辑：陈倩