



毫米波微波网络基于匹配算法的小区关联方法

杨海竹¹,孙长印¹,吴维超²,徐文军²

(1.西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710121; 2.中国移动通信集团陕西有限公司,陕西 铜川 727000)

摘要: 由于毫米波网络具有间歇性及较高的路径损耗,对于毫米波与微波基站联合组网系统,传统的小区关联方法会导致严重的负载失衡问题。为此,提出一种分布式双连接小区关联算法。该算法基于效用函数,采用匹配算法求解系统效用最大化下的最优关联,并保证产生帕累托最优和双向稳定解。同时为基站设置最小配额约束,以平衡毫米波与微波基站负载。此外,在匹配算法基础上选择边缘用户进行双连接,减少干扰并降低频繁切换导致的链路误码率。仿真结果表明,最小配额分配算法下全网和速率较传统最大信干噪比算法平均提升25.9%,双连接时全网和速率较单连接时提升明显。

关键词: 毫米波网络;双连接;最小配额分配;负载均衡;帕累托最优

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 杨海竹,孙长印,吴维超,等.毫米波微波网络基于匹配算法的小区关联方法[J].计算机工程,2021,47(8):210-215,223.

英文引用格式: YANG H Z, SUN C Y, WU W C, et al. Cell association method based on the matching algorithm for millimeter-wave networks[J]. Computer Engineering, 2021, 47(8): 210-215, 223.

Cell Association Method Based on the Matching Algorithm for Millimeter-Wave Networks

YANG Haizhu¹, SUN Changyin¹, WU Weichao², XU Wenjun²

(1.School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2.China Mobile Communications Group Shaanxi Co., Ltd., Tongchuan, Shaanxi 727000, China)

[Abstract] Millimeter-wave networks are limited by the high frequency of interrupts and the high path loss. For the network systems consisting of millimeter-wave networks and microwave base stations, the traditional cell association methods can cause serious load imbalance problems. To this end, a distributed cell association algorithm for dual-connection systems is proposed. The proposed association algorithm is based on the utility function, and the matching algorithm is used to find the optimal association that maximizes the utility of the system, so the found solutions satisfy bidirectional stability and Pareto optimality. In addition, each base station sets a minimum quota constraint, which effectively balances the loads between the millimeter wave and microwave base stations. Then based on the matching algorithm, edge users are selected for dual connection to reduce interference, decreasing the link error rate caused by frequent handovers. Simulation results show that under the minimum quota allocation algorithm, the proposed method improves the overall network sum rate by an average of 25.9% compared with the traditional maximum signal-to-interference and noise ratio (max-SINR) algorithm. Moreover, the proposed method provides a more significant increase in the overall network sum rate in the case of dual connection than single connection.

[Key words] millimeter-wave network; dual connection; minimum quota allocation; load balancing; Pareto optimality

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0058937

0 概述

随着移动通信网络高速发展,6 GHz以下频谱资源利用率已经接近饱和,为了满足用户日益增长

的流量需求,毫米波技术在5G网络中得到了广泛的应用^[1]。毫米波具有丰富的频谱资源及较高的天线增益,可以为用户提供超高网络速率。但毫米波链路具有间歇性^[2],其频段较高,波长较短,穿透性差,

基金项目: 国家自然科学基金(61801382,61871321);国家重大专项(2017ZX03001012-005);陕西省自然科学基金重点项目(2019JZ-06);陕西省重点产业链项目(2019ZDLGY07-06);西安邮电大学研究生创新基金(CXJJLY2018035)。

作者简介: 杨海竹(1989—),女,硕士研究生,主研方向为移动通信系统;孙长印,副教授;吴维超、徐文军,工程师。

收稿日期: 2020-07-14 **修回日期:** 2020-09-09 **E-mail:** 15114991129@139.com

在遇到障碍物或与用户之间距离较远时容易使用户网络连接受到影响。为提升网络的稳定性,可以采用毫米波基站与传统微波基站共存的组网方式,当毫米波网络不可行时,用户连接至微波基站,以确保网络连接的可靠性^[3]。

然而,由于毫米波网络具有更高的路径损耗^[4],在毫米波基站与微波基站共存的系统中,传统的max-SINR^[5]等小区关联方式容易导致严重的负载失衡问题,给蜂窝网络资源管理带来了巨大挑战^[6]。对此问题,文献[7-8]通过博弈论方式,将用户和基站看作两个玩家组进行匹配,保证产生帕累托和双向稳定解。文献[9]利用基站的最小额约束,通过调整基站的最小接入用户数,保证每个基站下都有较为合理的用户接入,来达到负载均衡的目的^[10]。然而上述文献考虑的场景仅限于用户任意时刻只选择单个基站进行连接的情况,当毫米波链路不可用时用户可以切换到微波基站,但链路切换会产生时延和信令开销,同时掉话风险也会随之增加。

毫米波与微波基站双连接组网方式下的小区关联方案实现了高低频资源的动态利用,可以克服上述文献方案的缺点。双连接方案用户可同时与两个基站建立连接,最初用于异构网络,在此网络下,由于宏蜂窝基站覆盖范围远大于微蜂窝基站,宏蜂窝基站的边缘用户会对相邻小区用户产生较大的干扰,且会存在频繁切换问题。3GPP Release-14在LTE双连接技术^[11]基础上,定义了LTE和5G的双连接技术^[12],即用户可以同时关联两个基站,一个是微波基站,作为主小区,另一个是毫米波基站,为辅小区,并采用了控制面与用户面分离^[13]的思想,在控制面,用户只和主小区进行无线资源控制(Radio Resource Control, RRC)连接。在用户面,用户可以同时关联到主小区和辅小区并向核心网发送数据。这一方案可减少信令开销,为用户提供更为稳健的网络。然而,双连接方案直接应用于关联问题会导致关联算法的复杂性增加,也会影响解的稳定性。

为解决上述问题,本文提出一种新型双连接小区关联算法。基于效用函数,采用匹配算法求解系统效用最大化下的最优关联,并为基站设置最小配额约束,从而有效平衡毫米波与微波基站负载。同时,在匹配算法基础上,选择每个基站下边缘区域性能较差的用户进行双连接,减少干扰与链路失效率,从而提升系统的整体性能。

1 系统模型及问题表述

1.1 系统模型

本文蜂窝网络系统下行链路模型由 N_m 个毫米波基站、 N_μ 个微波基站及 K 个用户组成。 N_m 个毫米波基

站与 N_μ 个微波基站组成基站集合 \mathcal{N} , K 个用户组成用户集合 \mathcal{K} 。基站集合与用户集合分别定义为 $\mathcal{N} \stackrel{\text{def}}{=} \{1, 2, \dots, N\}$, $\mathcal{K} \stackrel{\text{def}}{=} \{1, 2, \dots, K\}$, 这里 N 为基站总数,如图1所示。

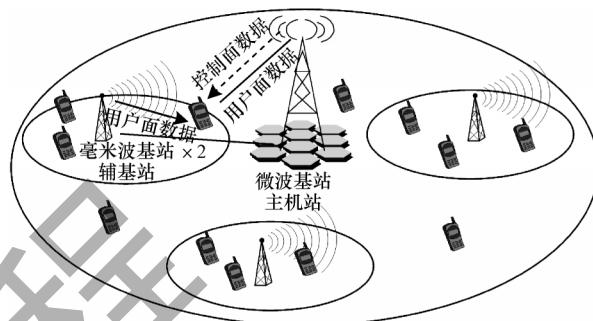


图1 系统模型

Fig.1 System model

1.2 基站传播模型

在微波网络中,当用户 k 连接至基站 n 时,网络的信干噪比如式(1)所示^[14]:

$$\text{SINR}_{kn}^{\mu m} = p_n g_{kn} / \left(\sum_{n' \neq n} p_{n'} g_{kn'} + \omega_1 N_0 \right) \quad (1)$$

其中: ω_1 是微波基站的带宽, p_n 是总功率, N_0 是系统噪声, g_{kn} 是信道增益,这里 $g_{kn} = (L_{kn}^{\mu m})^{-1}$ 。

电磁波在传播的过程中,由于传播环境不同,会产生不同的能量损耗,一般情况下微波频段的损耗采用基于距离的路径损耗公式进行估算^[15],如式(2)所示:

$$L_{kn}^{\mu m} = b_1 + a_1 10 \lg(d/d_0) + \chi, \quad (2)$$

上式是对微波频带内传播测量的最佳线性拟合,其中: a_1 表示拟合斜率; b_1 表示平均路径损耗指数; d_0 表示参考距离; d 表示用户到基站之间的距离; χ 是均值为0、方差为 ξ_1^2 的高斯随机变量。

依据香农公式可以计算出每条链路的可实现速率,但用户连接到基站时会产生干扰,将该因素纳入考虑后,用户 k 连接微波基站 n 时的可实现速率如式(3)所示:

$$R_{kn}^{\mu m} = \omega_1 \lg(1 + \text{SINR}_{kn}^{\mu m}) \quad (3)$$

毫米波频段还需要考虑天线的增益,当用户 k 连接基站 n 时,网络的信干噪比如式(4)所示:

$$\text{SINR}_{kn}^{\text{mmw}} = p_n \psi_{kn} g_{kn} / \left(\sum_{n' \neq n} p_{n'} g_{kn'} + \omega_2 N_0 \right) \quad (4)$$

其中: ψ_{kn} 是用户 k 到基站 n 的天线增益; ω_2 是毫米波基站的带宽。

毫米波频段路径损耗模型如式(5)所示:

$$L_{kn}^{\text{mmw}} = b_2 + a_2 10 \lg(d/d_0) + \chi \quad (5)$$

这里路径损耗模型中 a_2 、 b_2 参数含义与式(2)中相同。

用户关联到微波基站每带宽可实现速率如式(6)所示:

$$R_{kn}^{\text{mmW}} = \omega_2 \lg(1 + \text{SINR}_{kn}^{\text{mmW}}) \quad (6)$$

1.3 问题描述

本文制定的优化问题,使用资源分配变量 x_{kn} 表示用户与基站的连接情况,在满足所有基站最大额与最小额连接用户数及用户最大连接基站数的约束条件下,实现全网效用的最大化。这里用户 k 的可实现速率为 R_k ,获得效用为 $U_k(R_k)$,其中函数 $U_k(\cdot)$ 是连续可微、单调递增且严格凹的效用函数,通过求解优化问题,最大化总可实现速率。本文优化问题如式(7)所示^[17]:

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{maximize}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{kn} U(R_{kn}) \\ & \text{s.t.} \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{kn} \leq 2, \forall k \in \mathcal{K}, \\ & k_n \leq q_n^{\max}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & k_n \geq q_n^{\min}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & x_{kn} \in \{0, 1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (7)$$

上式中,用户 k 连接基站 n 时表示为 $x_{k,n} = 1$,否则表示为 $x_{k,n} = 0$,基站 n 的连接用户数如式(8)所示:

$$k_n = \sum_{k=1}^K x_{k,n} \quad (8)$$

q_n^{\max} 表示基站 n 连接用户数的最大配额, q_n^{\min} 表示基站 n 连接用户数的最小配额。在这里 $0 \leq q_n^{\min} \leq q_n^{\max}$, 总用户数如式(9)所示:

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} q_n^{\max} \leq K \leq \sum_{n \in \mathcal{N}} q_n^{\min} \quad (9)$$

当 $q_n^{\min} = 0$, $q_n^{\max} = K$ 时,小区关联问题不能体现出负载均衡。

式7中的约束表示用户可以同时连接两个基站。因此,式7描述的问题是一个多对多匹配问题,难以通过最小额匹配获得可行解。为了解决此问题,本文首先将式(7)所述的双连接问题简化为单连接问题,即将约束条件7b每个用户的最大连接基站数变为1。在此基础上,第2步选择部分用户实现双连接。

单连接问题制定如式(10)所示^[18]:

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{maximize}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{kn} U(R_{kn}) \\ & \text{s.t.} \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{kn} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \\ & k_n \leq q_n^{\max}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & k_n \geq q_n^{\min}, \forall n \in \mathcal{N} \\ & x_{kn} \in \{0, 1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (10)$$

2 小区关联及负载均衡算法

2.1 小区关联匹配游戏

本文下行链路关联问题是用于将用户分配给基

站的整数规划问题,其不具有封闭式解并且具有指数复杂性。对于这样的小区关联问题,传统的穷举搜索不能适应动态的密集蜂窝网络。

在关联算法结构方面,考虑到集中式小区关联方案要求基站将网络信息发送到网络控制器(如 Radio Network Controller, RNC),由 RNC 在相对较长的时间尺度上更新执行。为了规避集中式方案的缺点,本文提出针对毫米波与微波小区关联问题的分布式解决方案。

1) 预定义

为解决小区关联问题,文档[19]提出了一种基于匹配理论的复杂度可处理的分布式解决方案。在偏好关系中,匹配游戏实际上是两个不相交的玩家组之间的双向分配问题。本文定义两组匹配游戏玩家:基站组集合 \mathcal{N} 和用户组集合 \mathcal{K} , 其中 $n \in \mathcal{N}$, $k \in \mathcal{K}$ 。定义偏好关系 $n \succ_k n'$, 表示用户 k 认为基站 n 优先于基站 n' 。同样 $k \succ_n k'$, 表示基站 n 认为用户 k 优先于用户 k' 。

2) 匹配过程

为计算偏好关系,在每个基站与用户之间引入了效用函数,它基于本地平均可实现速率的对数关系,对所有基站与用户之间的效用进行排名,通过偏好关系来最大化全网和效用。基于匹配的小区关联关系,适当地调整小区的配额,以达到小区负载均衡的目的。

小区关联策略 π 决定了一个用户子集到基站的分配,因此这个问题可以定义为一对多的关系:

定义 1 给定两个不相交的有限玩家集合 \mathcal{K} 和 \mathcal{N} , 小区关联策略 π 可以定义为一对多的匹配关系, $\mathcal{K} \rightarrow \mathcal{N}$ 满足: 1) $\forall n \in \mathcal{N}, \pi(n) \subseteq \mathcal{K}$; 2) $\forall k \in \mathcal{K}, \pi(k) \in \mathcal{N}$; 3) 当且仅当 $k \in \pi(n)$ 时, $\pi(k) = n$ 。

实际上 $\pi(k) = n$ 表示 $x_{k,n} = 1$, 否则表示为 $x_{k,n} = 0$ 。在问题制定的限制条件中, π 满足 $q_n^{\min} \leq \kappa_n = |\pi(n)| \leq q_n^{\max}$ 。

3) 基站与用户之间的效用及偏好关系

使用线性效用函数时,每个基站只服务其 SINR 最大的用户,虽然全网吞吐量达到最优,但因为毫米波与微波网络传播特性不同而容易导致负载严重失衡,不仅降低网络质量,也会造成资源浪费。因此,需要寻求一种能够自然地实现负载平衡和用户之间某种程度公平性的效用函数。对数效用函数是凹形函数,收益递减,这一属性可以实现负载平衡。对数效用的目标函数如式(11)所示:

$$U_k(n) = \lg(R_{kn}) \quad (11)$$

当用户 k 优选 n 基站超过 n' 基站时,等效为 $n \succ_k n' \Leftrightarrow U_k(n) \geq U_k(n')$ 。

考虑到为了满足最小配额,部分用户将分配给等级较低不满足最小配额的基站。为此,定义所有基站

将共同使用的偏好关系,称为主列表(ML),主列表偏好关系表示为 \succ_{ML} ,且定义为: $\succ_n \equiv \succ_{ML}, \forall n, n' \in \mathcal{N}$,如式(12)所示:

$$k \succ_{ML} k' \Leftrightarrow U_{ML}(k) \geq U_{ML}(k') \quad (12)$$

当基站给了用户 k 更高的优先级,使它可以选择自己所偏好的基站时,偏好关系可用式(13)表示:

$$U_{ML}(k) = \{U_k(n') \mid U_k(n') \geq U_k(n), \forall n \in \mathcal{N}\} \quad (13)$$

2.2 帕累托最优和双向稳定解

帕累托最优(Pareto optimality, PO):它是博弈论中重要概念,是一种资源分配的理想状态,即:1)对于所有的用户 $k \in \mathcal{K}$,没有另一个策略 π' 优于策略 π 。2)对于部分用户 $k \in \mathcal{K}$ 严格的优于策略 π ,即 $\pi' \succ_k \pi$ 。PO是分布式机制中广泛采用的效率概念,其中每个实体(这里是每个用户)的目标是最大化其自身的效用。此外,用户和基站之间的双向稳定匹配的概念定义如下:

双向稳定解:一个用户基站对 $(k, n) \notin \pi$,当且仅当 $k \succ_n k', n \succ_k \pi(k)$ 在策略 π 中称为阻塞对。在不存在阻塞对时,策略 π 稳定。

基站关联需要考虑公平性,如果用户 k 羡慕用户 k' 的分配,则相对于用户 k ,用户 k' 一定被基站 $\pi(k')$ 基站所偏好,当 $\succ_n \equiv \succ_{ML}, \forall n \in \mathcal{N}$ 时,双向稳定策略 π 被认为是ML公平匹配。

2.3 最小额匹配算法下双连接方案

在微波与毫米波基站联合的网络环境中,由于用户连接至毫米波基站时干扰较少,并且毫米波网络采用了定向传输的方式,传统的max-SINR方案会将大部分用户分配给毫米波基站,这样容易导致网络负载严重不均,为了提升全网的可实现速率,并且保证网络的信号质量,本文提出了最小额匹配算法,该算法应用了偏好关系来实现网络速率的最大化,同时通过控制每个基站的最小及最大接入用户数来达到负载均衡的目的。

在最小额匹配算法下,一些边缘用户的信号质量仍然较差,为提升全网的质量及可实现的速率,在毫米波与微波基站共存的场景下,基于效用函数 $U_n(k)$,选取所有基站下效用值较低的 m 个边缘用户,让他们分别选出一个除本身关联的基站外效用最高基站 $n', n' \neq n$ 进行双连接,用户所关联的两个基站一个作为主小区,另一个作为辅小区。这种方案采用控制面与用户面分离的思想^[20],在控制面,用户只和主小区进行RRC连接;在用户面,用户可以同时关联到主小区和辅小区,向核心网发送数据。这样可以减少频繁切换的概率,同时提升全网的和速率。

算法步骤如算法1所示。

算法1 最小额匹配算法下双连接方案

输入 $\succ_{ML}, q_n^{\min}, q_n^{\max}, \forall k \in K, \forall n \in N, m$

输出 π, x

1. 初始化 $\pi(k) = \emptyset, \forall k \in K, K' = K$

2. 对ML中用户的优先级进行排序

3. 选择在ML具有最高优先级的用户 $k^* \in K'$, $k^* \succ_{ML} k, \forall k \in K'$ 。

4. 让 $\pi(k^*) = n$, n 基站的选择基于 \succ_{k^*} ,这里要求 $\kappa_n \leq q_n^{\min}$,将用户 k^* 加入 $\pi(n)$,并将用户从列表 K' 中移除。

5. 重复3到4步骤

6. 直到所有基站的最小连接用户数 $\kappa_n = q_n^{\min}$

7. while $K' = \emptyset$, do

8. 选择在ML具有最高优先级的用户 $k^* \in K'$, 即 $k^* \succ_{ML} k, \forall k \in K'$ 。

9. 让 $\pi(k^*) = n$, n 基站的选择基于 \succ_{k^*} ,这里要求 $\sum_{n \in N} \kappa_n \leq q_n^{\max}$,将用户 k^* 加入 $\pi(n)$,并将用户从列表 K' 中移除。

10. end while

11. for 所有基站

12. 依据偏好关系 $k \succ_n k'$, 即 $U_n(k) \geq U_n(k')$, 升序排列基站下所有用户效用,挑出效用较差的 m 个用户进行双连接。

13. end for

算法关键步骤描述如下:步骤2依据 $k \succ_{ML} k' \Leftrightarrow U_{ML}(k) \geq U_{ML}(k')$ 确定ML中用户的优先级;步骤3~步骤4选出其中优先级最高的用户,让他优先选择自己偏好的基站,即用户选择 $n, \forall n \in \mathcal{N}$ 基站时效用最高,这时将该用户加入策略 $\pi(n)$;步骤5重复步骤3~步骤4;步骤6当某基站下连接用户数 κ_n 达到最小配额 q_n^{\min} ,删除该站,让其他基站参与选择,直到所有的基站都达到最小配额 q_n^{\min} 。步骤7继续循环列表 $K' = \emptyset$;步骤8选出其中优先级最高的用户;步骤9让他去选择自己偏好的基站,即用户选择基站 $n, \forall n \in \mathcal{N}$ 时效用最高,这时将该用户加入策略 $\pi(n)$,直到所有基站连接用户数达到所有基站的最高配额;步骤11循环所有的基站。

步骤12首先根据ML的偏好关系 $k \succ_n k'$, 即 $U_n(k) \geq U_n(k')$,对基站下用户效用升序排序,其次挑选出效用较差的 m 个用户,让他们进行双连接。这样可以减少边缘区域用户频繁切换次数,改善这些用户的性能,进而提升全网的和速率。

3 方案仿真与性能分析

3.1 仿真环境

为了验证本文所提出的小区关联算法,采用MATLAB软件进行系统仿真,仿真参数如表1所示。本文通过对比单连接时最小额分配算法与max-SINR算法的全网和速率,来验证最小额分配算法的有效性,再改变边缘双连接用户数对比单双连接时全网的可实现速率,来验证双连接用户数变化带来的可实现速率变化。在本文场景,4个微波基站以田字形分布,站间距为200 m,12个毫米波基站则均匀分布在微波基站覆盖范围内,800个用户随机分布在基站覆盖区域内。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	值
传输功率 p_n/dBm	30
带宽 $\omega_1, \omega_2/(\text{GHz} \cdot \text{MHz}^{-1})$	10/1
路径损耗指数 a_1, a_2	3.76, 4
平均路径损耗 $b_1, b_2/\text{dB}$	34.6, 70
路径损耗标准差 ξ_1, ξ_2	10, 7.2
天线增益 ψ/dBi	18
噪声功率频谱密度 $N_0/(\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-173.9
微波基站覆盖半径 r_μ/m	100
毫米波基站覆盖半径 r_m/m	25
微波基站数 $N_\mu/\text{个}$	4
毫米波基站数 $N_m/\text{个}$	12
用户数 $K/\text{个}$	800
基站最小配额 $q_n^{\min}/\text{个}$	40
基站最大配额 $q_n^{\max}/\text{个}$	60

3.2 仿真结果及分析

使用最小额分配算法,首先对主列表中的800个用户进行排序,让优先级较高的用户在16个基站之间进行选择,当每个基站连接用户数达到最小配额40时,进行第2轮选择,第1轮总开销为 $16 \times 40 \times 16$ 。第2轮让主列表中剩余的160个用户选择自己偏好的基站,总开销为 160×16 。

max-SINR与最小额分配算法下用户和速率对比如图2所示。

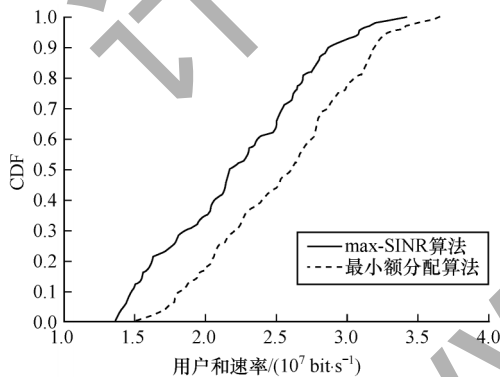


图2 max-SINR算法与最小额分配算法用户和速率

Fig.2 The sum-rate of the max-SINR and the minimum quota algorithm

由图2可知,使用最小额分配算法后,全网和速率整体优于使用max-SINR时的全网和速率。使用max-SINR分配算法时,由于微波基站与毫米波基站传播特性的差异,导致毫米波基站与微波基站负载严重不均。最小额分配算法通过调整全网基站连接用户,有效的平衡了基站的负载,保证每个基站下都有较为合理的用户连接。通过最小额分配算法与max-SINR算法性能对比,发现各阶段性性能平均提升了25.9%,如图3所示。

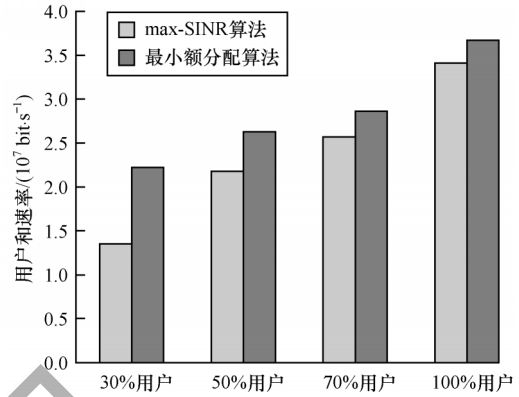


图3 max-SINR与最小额分配算法性能

Fig.3 Performance comparison of the max-SINR and the minimum quota algorithm

每个基站下双连接用户数为 $m=10$ 时,在最小额算法的基础之上,对每个基站下的用户进行排序,算法的复杂度为 $O(N)$,对每个基站下的用户效用进行排序,挑出信号质量较差的10个用户进行双连接,开销为 $16 \times 10 \times 2$ 。

单、双连接用户和速率CDF曲线如图4所示。

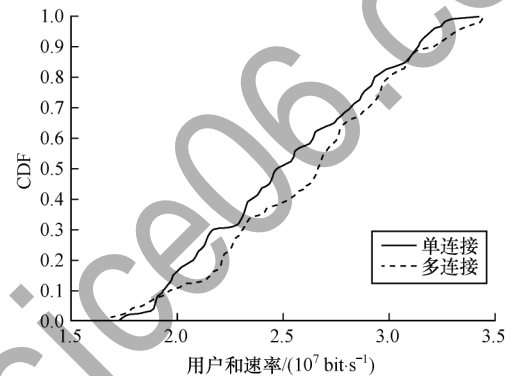


图4 10个用户下两种方案全网和速率

Fig.4 Full network sum-rate of two schemes under 10 users

每个基站下双连接用户数为10时,单、双连接不同类型用户吞吐量性能对比如图5所示。

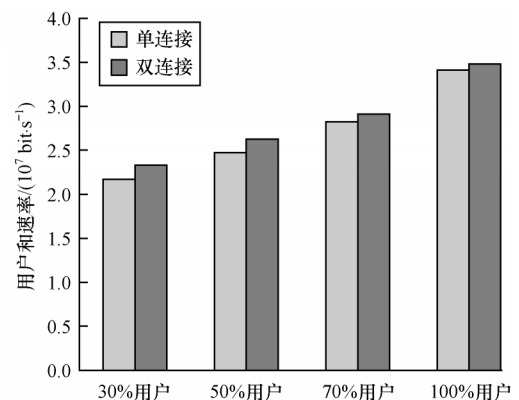


图5 10个用户下单双连接性能对比

Fig.5 Performance comparison of single and dual connection under 10 users

单连接时,由于受到干扰的影响,处于边缘区域的用户(对应于CDF分布30%以下)性能较差,且存在频繁切换问题,当用户采用双连接时,网络的鲁棒性得到了有效保障,边缘用户连接稳定性提升,进而提升了网络和速率。

由图4可以看出,总体而言,双连接时用户和速率比单连接时提升。图5通过对比不同类型用户最小额分配算法下单双连接时的和速率数据,发现双连接比单连接时性能提升了4.8%。

每个基站下双连接用户数变为30时,开销为 $16 \times 30 \times 2$ 。单、双连接用户和速率PDF曲线如图6所示。

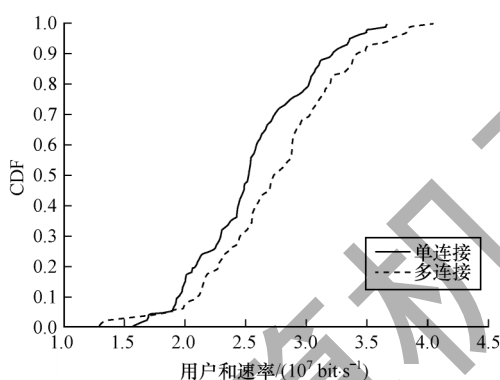


图6 30个用户下两种方案的全网和速率

Fig.6 Full network sum-rate of single and dual connection under 30 users

每个基站下双连接用户数变为30时,单、双连接不同类型用户吞吐量性能对比如图7所示。

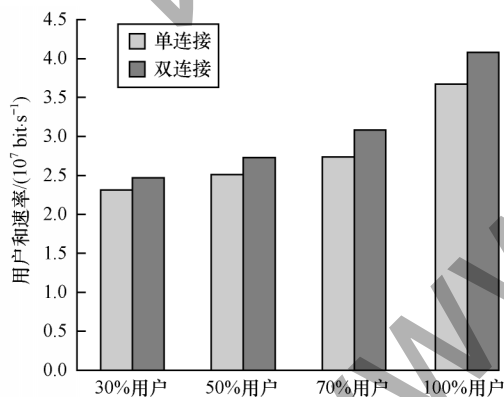


图7 30个用户下单双连接性能对比

Fig.7 Performance comparison of single and dual connection under 30 users

从图6对比结果可以看出,双连接时用户和速率比单连接时提升明显。而从图7对比结果发现双连接比单连接时性能提升了9.8%。

上述实验结果验证发现进行双连接的用户越多,系统性能越好。这是因为无论边缘还是中心用户双连接下,干扰降低,从而提升了全网和速率。

综上所述,最小额分配算法与双连接技术结合可以有效提升网络性能,进而实现全网和速率的大幅提升。

4 结束语

本文针对毫米波、微波基站联合组网系统中传统小区关联方法导致的负载失衡问题,提出了一种基于匹配算法的新型小区关联方法。通过使用最小额分配算法,设定每个基站的最小接入用户数,保证每个基站下都有一定的用户接入,然后根据用户的偏好关系选择效用较好的基站进行接入,在保证资源得到合理利用的同时提升了网络和速率。此外,本文结合了双连接的思想,在原有最小额分配算法分配结果的基础上,选定每个基站下边缘区域性能较差的用户进行双连接,提升边缘用户的信号质量,减少频繁切换的概率,进一步优化了网络质量。仿真实验结果表明使用最小额分配算法后,全网和速率提升25.9%,结合双连接技术后,网络性能提升了4.8%。下一步将结合机器学习的思想,探索智能化设定参数的方法,在提升网络和速率的同时保证用户的通信质量,从而改善系统的整体性能。

参考文献

- [1] WANG H, HONG W, CHEN J, et al. IEEE 802.11aj (45GHz): a new very high throughput millimeter-wave WLAN system[J]. China Communications, 2014, 11(6): 51-62.
- [2] RAPPAPORT T S, GUTIERREZ F, BEN-DOR E, et al. Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1850-1859.
- [3] MLIKA Z, DRIOUCH E, AJIB W. User association and scheduling with hard deadlines in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12): 2698-2701.
- [4] RAGHAVAN V, PARTYKA A, AKHOONDZADEH-ASL A, et al. Millimeter wave channel measurements and implications for PHY layer design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6521-6533.
- [5] LI C G, HE C, JIANG L G, et al. Robust beamforming design for max-min SINR in MIMO interference channels[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(4): 724-727.
- [6] ZHAO H, ZHAO L Q, LIANG K, et al. Radio access network slicing based on C/U plane separation[J]. China Communications, 2017, 14(12): 134-141.
- [7] ATHANASIOU G, WEERADDANA P C, FISCHIONE C, et al. Optimizing client association for load balancing and fairness in millimeterwave wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(3): 836-850.
- [8] SEMIARI O, SAAD W, VALENTIN S, et al. Context aware small cell networks: how social metrics improve wireless resource allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 5927-5940.

(下转第223页)

(上接第 215 页)

- [9] MUHAMMAD F, ABBAS Z H, LI F Y. Cell association with load balancing in nonuniform heterogeneous cellular networks: coverage probability and rate analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 5241-5255.
- [10] QIAN L P, WU Y, ZHANG S L, et al. Pareto optimal power control via bisection searching in wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(4): 709-712.
- [11] YUAN D N, YANG X T, JIANG Y P, et al. An energy-delay trade-off in wireless visual sensor networks based on two-sided matching[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 10099-10110.
- [12] ELHATTAB M K, ELMESALAWY M M, SALEM F M, et al. Device-aware cell association in heterogeneous cellular networks: a matching game approach[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2019, 3(1): 57-66.
- [13] YE Q Y, RONG B Y, CHEN Y D, et al. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(6): 2706-2716.
- [14] MOISEEV S N, KONDAKOV M S. Prediction of the SINR RMS in the IEEE 802.16 OFDMA system[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(8): 2903-2907.
- [15] ZHANG P Z, LI J, WANG H B, et al. Indoor small-scale spatiotemporal propagation characteristics at multiple millimeter-wave bands[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(12): 2250-2254.
- [16] WANG H M, ZHANG P Z, LI J, et al. Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems[J]. China Communications, 2019, 16(5): 1-18.
- [17] ZHOU T Q, LIU Z X, ZHAO J H, et al. Joint user association and power control for load balancing in downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2582-2593.
- [18] NIE G F, TIAN H, REN C S. Energy efficient cell selection in small cell networks with constrained backhaul links[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 1199-1202.
- [19] ANANY M, ELMESALAWY M M, EL-HALEEM A M A. Matching game-based cell association in multi-RAT HetNet considering device requirements[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9774-9782.
- [20] SONG H, FANG X M, YAN L. Handover scheme for 5G C/U plane split heterogeneous network in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4633-4646.

编辑 卞颖颖