

基于多点信道海图的 低能耗网络覆盖结构优化



Optimization of Low-Energy Network Coverage Structure Based on Multipoint Channel Charting

叶远青/YE Yuanqing, 张四海/ZHANG Sihai,
朱近康/ZHU Jinkang

(中国科学技术大学, 中国 合肥 230026)
(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231212.1548.008.html>

网络出版日期: 2023-12-13

收稿日期: 2023-10-15

摘要: 资源小区覆盖结构是实现超高数据密度类业务场景的关键覆盖结构之一, 其具有弹性可扩展、高能效按需覆盖的特点。依托这种覆盖结构, 研究了一种基于多点信道海图资源小区优化方法, 旨在发射功率约束下提高系统和速率。将多点信道海图感知到的相邻用户划分到同一资源小区, 通过在资源小区内分配正交资源块和在资源小区间复用正交资源块的方式, 减少系统干扰并提升系统和速率。仿真结果表明, 该方法能够有效提高系统和速率, 不需要用户位置信息和瞬时信道状态信息, 并且在相同系统和速率的情况下, 资源小区覆盖结构可以有效降低网络能耗。

关键词: 多点信道海图; 低能耗; 资源小区

Abstract: Resource cell coverage structure is one of the key coverage structures to achieve ultra-high data density scenarios, which has the characteristics of elastic scalability and high energy efficiency on-demand coverage. Relying on the above coverage structure, a multipoint channel charting-based resource cell generation method is proposed to improve sum system rate under transmit power constraint. Specifically, adjacent users on multipoint channel charting are grouped into the same resource cell to reduce system interference and improve sum system rate by allocating orthogonal resource blocks within the resource cell and multiplexing RBs between resource cells, respectively. Simulation results show that the proposed method provides significant gain in capacity without requiring user location information or instantaneous channel state information. It also indicates that the resource cell coverage structure can effectively reduce network energy consumption under the same sum system rate condition.

Keywords: multipoint channel charting; low-energy; resource cell

引用格式: 叶远青, 张四海, 朱近康. 基于多点信道海图的低能耗网络覆盖结构优化 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 3-10. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306002

Citation: YE Y Q, ZHANG S H, ZHU J K. Optimization of low-energy network coverage structure based on multipoint channel charting [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 3-10. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306002

人工智能的发展和智能设备的普及对6G移动网络提出了核心需求。6G网络将支持高速率、大容量、超密集类型的业务, 即超高数据密度业务 (uHDD)^[1]。随着数据流量的急剧增长和连接设备数量的不断增加, 无线网络的能源消耗也在快速增长。这将导致温室气体大量产生, 对环境保护和可持续发展造成重大威胁^[2]。因此, 未来移动通信和

网络技术的发展势必统筹兼顾能耗和资源, 打造绿色通信网络。

为了提高无线网络的能效, 在由分布单元 (DU)、集中单元 (CU) 与核心网构成的5G三级网络结构的基础上, 创新演进更多的无线覆盖结构, 如5G云无线接入网 (C-RAN) 覆盖结构、雾无线接入网 (Fog-RAN) 覆盖结构、无蜂窝大规模输入输出 (MIMO) 覆盖结构等。但这些传统无线覆盖结构部署方式较为固定, 只能在局部范围内进行有限的调整, 难以与业务分布不均匀的uHDD场景匹配, 降低了网络的容量覆盖能力。

基金项目: 科技部重点研发项目 (2022YFB2902302); 华为技术有限公司无线研究创新项目 (FA2019051101)

资源小区覆盖结构^[3]可消除容量覆盖漏洞，克服网络的复杂干扰，其生成方法（RCG）根据用户位置对用户进行聚类，同时根据用户位置信息和信道状态信息（CSI）调整覆盖结构以匹配业务分布，并通过贪婪启发式算法^[4]朝着系统和速率最大化的方向迭代优化资源小区。然而，用户位置信息很难获取，例如：现有的用户定位方法（如三角测量）受限于视距传播条件^[5]，根据开放系统互连分层原则，基站无法从全球导航卫星系统获取位置信息^[6]等。此外，上述方法在很大程度上依赖于可用CSI的准确性和时效性。然而，由快速衰减引起的瞬时信道状态变化导致获取的CSI总是过时的。

为了解决用户位置难获取和CSI过时的问题，我们提出了一种基于多点信道海图（MPCC）的资源小区生成方法。传统通信系统的能效最大化通常由信噪比或速率约束来保证。本文中，我们在能量消耗约束下最大化系统和速率，从长期CSI获得的二阶信道统计量中提取有效特征，然后构建MPCC，以便更有效地保持用户之间的信道相关性。MPCC上相邻用户具有很强的空间相关性，如果用户共享同一个资源块（RB），将会产生严重的干扰。因此，采用基于MPCC的RCG算法，将MPCC上相邻的用户划分为同一簇，生成资源小区，在每个资源小区内分配正交RBs，并在资源小区间进行RBs的空间复用，可以减少系统干扰，提高系统和速率。结果表明，该算法可在用户位置不可用和RCG可用CSI不完善或过时的情况下提升系统和速率。

1 资源小区与系统模型

1.1 资源小区

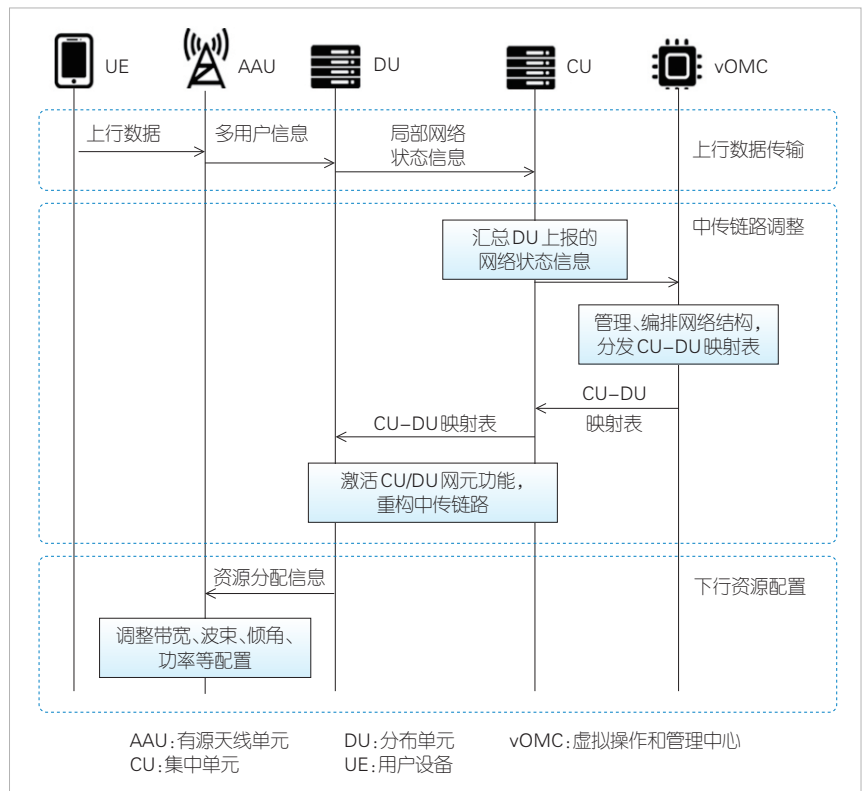
资源小区覆盖结构^[3]是通过控制/数据平面分离和系统级资源管理实现超高数据密度服务的关键覆盖结构之一。在gNodeB架构中，CU负责处理非实时协议和服务，DU负责处理实时协议和物理层协议，有源天线单元（AAU）负责射频传输以及部分物理层功能的实现。其中，CU与DU之间通过中传链路（光纤）连接。控制层实现覆盖结构灵活变动的本质在于CU-DU之间中传链路的调整，即在形成资源小区基本空间单元后，为符合现有5G gNodeB CU/DU分离的网络结构需求，每个资源小区需选择一个基站激活CU模块功能，其余基站激活DU模块功能。

在实际部署中，可由一个中央处理单元

集中控制区域内的全部基站，由区域级计算中心执行计算任务。该处理单元部署于接入网侧虚拟操作和管理中心（vOMC）。资源小区覆盖结构生成的协议流程如图1所示。基站根据用户发送的上行导频序列与信令信息进行局部区域内的网络状态（如信道状态信息、用户业务信息等）特征提取与压缩。压缩后的信息通过回程链路传递至vOMC，然后vOMC综合接收到的信息并决定资源小区内的基站集合，在所有的信息处理完毕后，将结果用统一、简单的信令表达并分发至基站。基站读取信令后调整中传链路，以形成资源小区覆盖结构。资源小区与其他传统覆盖结构的本质区别在于：资源小区既能在宏观上实现覆盖结构随业务分布变化的灵活性和适应性，又能在微观上为覆盖范围内的用户准确分配资源，实现最终的干扰管理。

1.2 系统模型

我们考虑包括 M 个基站、 N 个单天线用户和 S 个资源小区的二维平面上的超密集网络，其中基站配备 A 根天线的均匀线性阵列（ULA）。基站集合为 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ ，用户集合为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ ，资源小区集合为 $\mathcal{RC} = \{C_1, C_2, \dots, C_S\}$ ，任意资源小区内的基站集合为 $C_s^{AP} = \{1, 2, \dots, M_s\}$ ，小区内资源块集合为 $\mathcal{K}_s = \{1, 2, \dots, K\}$ ，小区内用户集合为 $C_s^{UE} =$



▲图1 资源小区覆盖结构生成的协议流程^[3]

$\{1, 2, \dots, N_s\}$ 。

小区内基站与用户之间的映射关系可表示为：

$$x_{u,i,k}^{C_s} = \begin{cases} 1, & \text{用户 } u \text{ 占用基站 } i \text{ 的资源块 } k \\ 0, & \text{用户 } u \text{ 不占用基站 } i \text{ 的资源块 } k \end{cases} \quad (1)$$

由于每个基站只有 K 个独立正交资源块，因此在一个时隙内资源小区 C_s 最多能服务的用户数不超过 $M_s \times K$ 个，其中 M_s 表示小区内的基站数，即：

$$\sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq K \cdot M_s \quad (2)$$

资源块 k 在一个时隙内被复用的次数不会超过资源小区内的基站数 M_s ，即：

$$\sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq M_s \quad (3)$$

此外，小区内的用户在一个时隙内至多被来自不同基站的正交 M_s 个资源块所服务，即：

$$\sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq M_s \quad (4)$$

根据小区内基站与用户的映射关系，用户 u 与所关联的基站 i 在资源块 k 的信干噪比表示为：

$$\text{SINR}_{u,i,k}^{C_s} = \frac{x_{u,i,k}^{C_s} P_{u,i,k} |h_{u,i}|^2}{\sigma_0^2 + \sum_{j \in \mathcal{D}_i} (1 - x_{u,j,k}^{C_s}) P_{u,j,k} |h_{u,j}|^2} \quad (5)$$

其中， $\mathcal{D}_i = \{j | d_{ij} \leq \varepsilon\}$ 表示与用户 u 之间距离不大于 ε 的所有基站集合， $P_{u,i,k}$ 表示基站 i 在资源块 k 上为用户 u 分配的功率， $h_{u,i}$ 表示基站 i 与用户 u 之间的信道矢量， σ_0^2 为用户端的加性高斯白噪声。基于多径空间相关信道模型， $h_{u,i}$ 可以表示为：

$$h_{u,i} = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L \beta_{u,i} \alpha_{u,i,l} e(\theta_{u,i,l}) \quad (6)$$

其中， L 表示多径分量数， $\alpha_{u,i,l}$ 是用户 u 与基站 i 之间第 l 条径的信道的小尺度衰落增益，其被建模为服从零均值方差为 1 的复高斯随机分布。 $\beta_{u,i}$ 表示无线信道传播过程中的大尺度衰落，主要包括路径损耗与阴影效应，建模为：

$$\beta_{u,i} = \frac{z_{u,i}}{d_{u,i}^\gamma} \quad (7)$$

其中， $d_{u,i}$ 为用户 u 与基站 i 之间的距离， γ 表示经验衰落系数，一般取值为 3.8。另外 $z_{u,i}$ 为用户 u 与基站 i 之间的阴影衰

落，满足 $10 \log_{10}(z_{u,i})$ 服从 $\mathcal{CN}(0, \zeta^2)$ 分布， ζ 为阴影衰落系数，一般取值为 8 dB。 $e(\theta_{u,i,l})$ 是基站端 ULA 的导向矢量，天线之间的距离为 $d = \lambda/2$ ，其中 λ 为电磁波波长。导向矢量可以表示为：

$$e(\theta_{u,i,l}) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{u,i,l})}, \dots, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{u,i,l})(A-1)} \right]^T \quad (8)$$

其中， $\theta_{u,i,l}$ 为用户 u 与基站 i 间信道第 l 条径的到达角，对于任意 u 和 i 满足 $\theta_{u,i,l} \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。用户 u 和基站 i 间 L 条径的用户到达角 (AoA) 都服从均匀分布 $U(\theta_{u,i} - \sqrt{3} \sigma, \theta_{u,i} + \sqrt{3} \sigma)$ ， $\theta_{u,i}$ 表示用户 u 和基站 i 之间的入射角， σ 表示多径信道 AoA 的角度标准差。

用户端的下行速率可以表示为：

$$R_u^{C_s} = W \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^{M_s} \text{SINR}_{u,i,k}^{C_s} \right) \quad (9)$$

其中， W 为系统预先为每个资源块设定好的带宽， $R_u^{C_s}$ 需要满足最低速率要求 R_{\min} 。

对系统中的每个资源小区下的每个用户端的下行速率进行求和，得到整网下行速率：

$$R_{\text{total}} = \sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^{N_s} R_u^{C_s} \quad (10)$$

我们采用理想的网络功耗模型，即只考虑基站的发射功率^[7]。假设将基站的总发射功率平均分配给用户，以约束整个网络的总功耗。基站 i 在资源块 k 上分配给用户 u 的发射功率为：

$$P_{u,i,k} = P_{\max} / \sum_{u=1}^{N_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \quad (11)$$

其中， P_{\max} 表示基站的总发射功率。

基于上述假设条件与模型设计，可以得到整网下行速率优化模型。

$$\begin{aligned} \max_{RC, X} R_{\text{total}} &= \sum_{s=1}^S \sum_{u=1}^{N_s} R_u^{C_s} \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq K \cdot M_s, \forall C_s \in RC \\ \text{C2: } & \sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq M_s, \forall C_s \in RC, \forall k \in K \\ \text{C3: } & \sum_{i=1}^{M_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq M_s, \forall C_s \in RC, \forall u \in N_s \\ \text{C4: } & R_u^{C_s} \geq R_{\min}, \forall C_s \in RC, \forall u \in N_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C5: & x_{u,i,k}^C = \{0, 1\}, \forall C_s \in RC, \forall u \in N_s, \forall i \in M_s, \forall k \in K, \\
 C6: & \sum_{u=1}^N \sum_{k=1}^K P_{u,i,k} = P_{\max}, \forall C_s \in RC, \forall u \in N_s, \forall i \in M_s, \forall k \in K.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

2 基于多点信道海图的资源小区覆盖优化

针对未来无线通信系统需要满足移动用户对高速数据传输业务的需求，由于业务时空分布动态变化，缺乏适配动态业务灵活性的覆盖结构，将会导致资源的使用冲突和网络中复杂干扰，降低局部区域内的网络容量。受资源小区^[3]的启发，本文中我们提出基于多点信道海图的资源小区覆盖结构优化方法。

由于用户间干扰与不同用户信道域之间的相关性密切相关，因此本文主要思想是通过提取无线信道特征构建多点信道海图并学习不同用户信道之间的相关性，从而将相关性强的用户划分为同一簇，将其相关联的基站划分到同一个资源小区，资源小区内基站进行联合传输并给用户分配正交资源块，以降低用户间干扰，资源小区间进行资源块复用，从而提升系统和速率。基于多点信道海图的资源小区覆盖结构生成框架如图2所示。

2.1 多点信道海图生成

图2虚线部分展示了多点信道海图的构造过程。首先，每个基站（BS）从所有用户信道状态信息 $H^m \in \mathbb{C}^{N \times P}$ 中提取特征 F^m ，计算局部相异度矩阵 $D^m \in \mathbb{C}^{N \times N}$ ，其中 N 和 P 分别是用户数和 CSI 的维数。不同相异度矩阵 D^m 表示基站 m 处 CSI 的局部视图，与用户间的无线电距离有关。然后，将 D^m 上报给 vOMC 并进行数据融合，从而构建全局相异度矩阵 $D \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 。最后，通过主成分分析（PCA）^[8]、Sammon's

Mapping (SM)^[9]等流形学习方法将 D 变换成满足 $N_d \ll N$ 的低维图 $Z \in \mathbb{C}^{N \times N_d}$ 。大多数信道海图的工作将 N_d 设置为2。信道海图技术的核心思想可以表达为：在低维空间找到一组数据点 $\{z\}_{n=1}^N$ 。当 $d_p(p_i, p_j)$ 较小时，存在：

$$d_z(z_i, z_j) \approx d_p(p_i, p_j), \tag{13}$$

其中 p_i 和 p_j 为原始空间中距离较近的两个数据点的三维坐标， z_i 和 z_j 分别为 p_i 和 p_j 降维后在海图空间的二维坐标。海图空间中的坐标没有绝对的物理意义，但是可以通过 $d_z(z_i, z_j)$ 表示海图上数据点之间的差异程度。当 d_p 和 d_z 表示欧式距离计算且满足式 (13) 时，说明所构造的信道海图保留了数据点在原始空间中的局部相对位置关系。

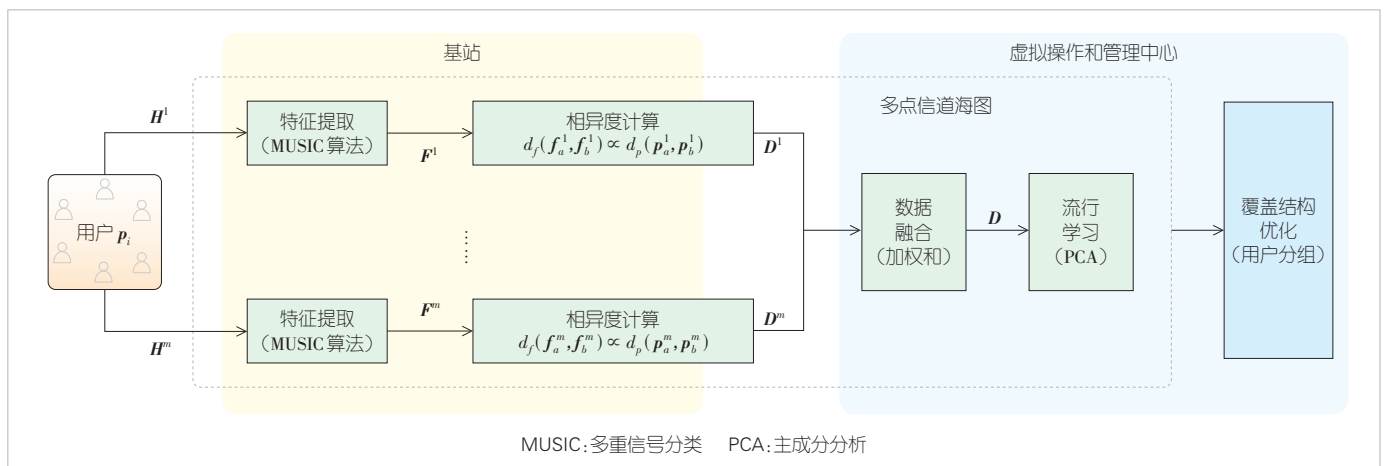
从信道状态信息中提取的特征是决定 MPCC 提供何种信息，以及其是否能有效解决通信问题的关键。由于空间几何上接近的位置会经历类似的多径分量，因此，可以从信道状态信息中挖掘多径分量的到达角 $\theta_{u,i,d}$ 和信道增益 $\beta_{u,i}$ 来构造 MPCC。本文采用多重信号分类（MUSIC）算法进行特征提取^[10]，其输入是上行链路 CSI 的协方差矩阵 $R = \mathbb{E}\{HH^H\}$ ，其携带与距离有关的大规模衰落特性的信息。在实际中，一般信道协方差矩阵计算方法为：

$$R = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} HH^H. \tag{14}$$

基于这些多径特征进行用户间的相异度度量可揭示信道图上用户间的近邻关系。在虚拟操作和管理中心融合各个基站上传的相异度矩阵，并进行降维，可实现其到信道海图的线性映射。

2.2 覆盖结构优化策略

系统模型假设用户与资源小区已匹配，即：任意用户 u



▲图2 基于多点信道海图的资源小区覆盖结构优化流程

只属于一个用户集合 N_s ，且该用户集合 N_s 中的所有用户只被对应的资源小区 C_s 提供服务，因此可通过用户分组来优化资源小区覆盖结构。

用户在空间几何上的距离越近，用户之间的干扰相对较大。MPCC上用户间的距离反映用户的最近邻关系，因此两个用户在MPCC上距离越近，其发生同频干扰的可能性就越大。基于MPCC的K-means聚类后，这些用户以更大概率被分配到同一簇（定义为资源小区）。首先，通过K-means算法形成初始用户簇，其中初始用户簇数量 K_0 定义为 $\min(\lceil N/K \rceil, M)$ 。为确保每个资源小区中有足够的正交资源块用于分配，我们将 K_0 设置为 $\lceil N/K \rceil$ 。随着用户数的增加， $\lceil N/K \rceil$ 可能大于基站数量，因此将 K_0 设置为两者的最小值。在此基础上，根据用户最大参考信号接收功率（Max-RSRP）关联基站的原则，得到初始资源小区集。

为确保资源小区是完全独立的，我们需要若干验证。例如：1）当不同资源小区之间存在相同基站时，该基站被分配给所关联用户最多的资源小区；2）检查每个资源小区中的用户数量，以确保每小区中有足够的正交资源块用于分配。当资源小区中的用户数超过阈值 N_{thre} 时，就需要进行细粒度分区。具体来说，当资源小区 C_s 中的用户数量 N_s 大于 $M_s \times K$ 时，需要将该资源小区 C_s 中的所有基站划分为独立的资源小区；当 N_s 大于细粒度分区阈值 N_{thre} 但小于 $M_s \times K$ 时，资源小区 C_s 应根据用户数量 N_s 分裂为更多的资源小区。基于MPCC的资源小区生成算法的具体步骤如算法1所示。

算法1 基于多点信道海图的资源小区覆盖结构优化策略

输入：多点信道海图 $Z \in C^{N \times N_s}$

输出：资源小区集合 $RC = \{C_1, C_2, \dots, C_S\}$

- 1: 用户根据 Max-RSRP 原则关联基站，得到初始用户-基站关联对
- 2: 计算聚类的数目 $S = K_0$
- 3: 基于多点信道海图通过 K-means 聚类算法初始化用户簇
- 4: **if** 关联同一个基站的不同用户被划分到不同的用户簇 **then**
- 5: 将基站划分到其关联用户最多的簇
- 6: **end if**
- 7: 输出初始资源小区集 $RC_{spre} = \{C_1, C_2, \dots, C_S\}$
- 8: **for** 资源小区 $C_s, s=1, 2, \dots, S$ **do**
- 9: **if** $N_s \geq M_s \times K$ **then**
- 10: 将 C_s 中的所有基站都视为一个独立的资源小

区，并分别输入到资源小区集合 RC 中

- 11: **else if** $N_{thre} \leq N_s \ \&\& \ N_s < M_s \times K$ **then**
- 12: 将 C_s 中的基站关联的所有用户 MPCC 向量作为输入，执行步骤 3—7，其中 $S = \lceil N_s/K \rceil$ ，将输出的资源小区输入到资源小区集合 RC 中
- 13: **else**
- 14: 将 C_s 输入到资源小区集合 RC 中
- 15: **end if**
- 16: **end for**
- 17: 输出资源小区集合 RC

3 仿真结果分析

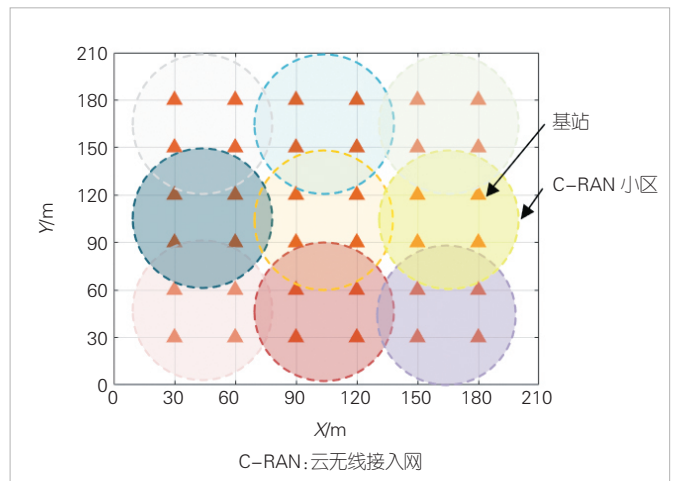
3.1 实验设置

本部分内容针对所提的基于MPCC的资源小区优化策略，在能耗约束下评估系统和速率来验证性能。为了简单而又不失一般性，我们考虑一个 210 m × 210 m 场景，其中基站均匀分布。参数汇总如表1所示。

我们以图3所示 C-RAN 静态覆盖结构为基准，采用基

▼表1 仿真实验参数表

参数	值
基站数目	36
单个资源块带宽	0.36 MHz
资源块数目	100
噪声功率	-174 dBm/Hz
多径数目	3
基站天线数目	16
蒙特卡洛次数	10



▲图3 传统C-RAN静态覆盖结构

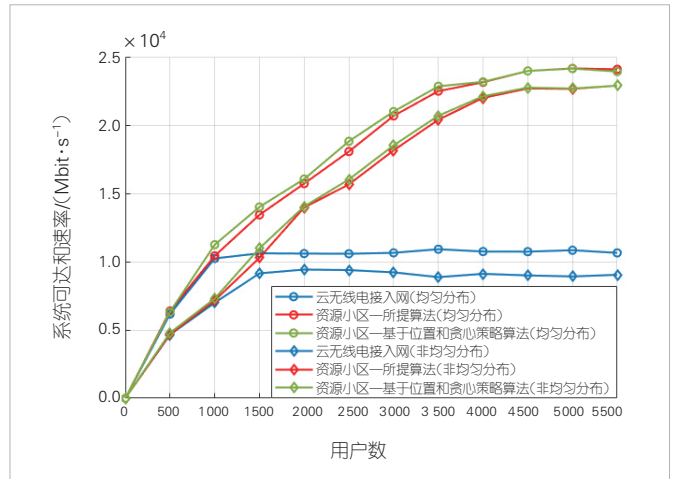
于位置和贪心策略的优化方法^[3]作为对比,下文中将其称为LG算法。LG方法使用基于用户地理位置的K-means算法形成用户初始簇,基于用户地理位置通过K-means算法进行用户分簇形成初始用户簇,在此基础上进行贪心迭代形成资源小区,使系统和速率达到最大。

3.2 实验结果及分析

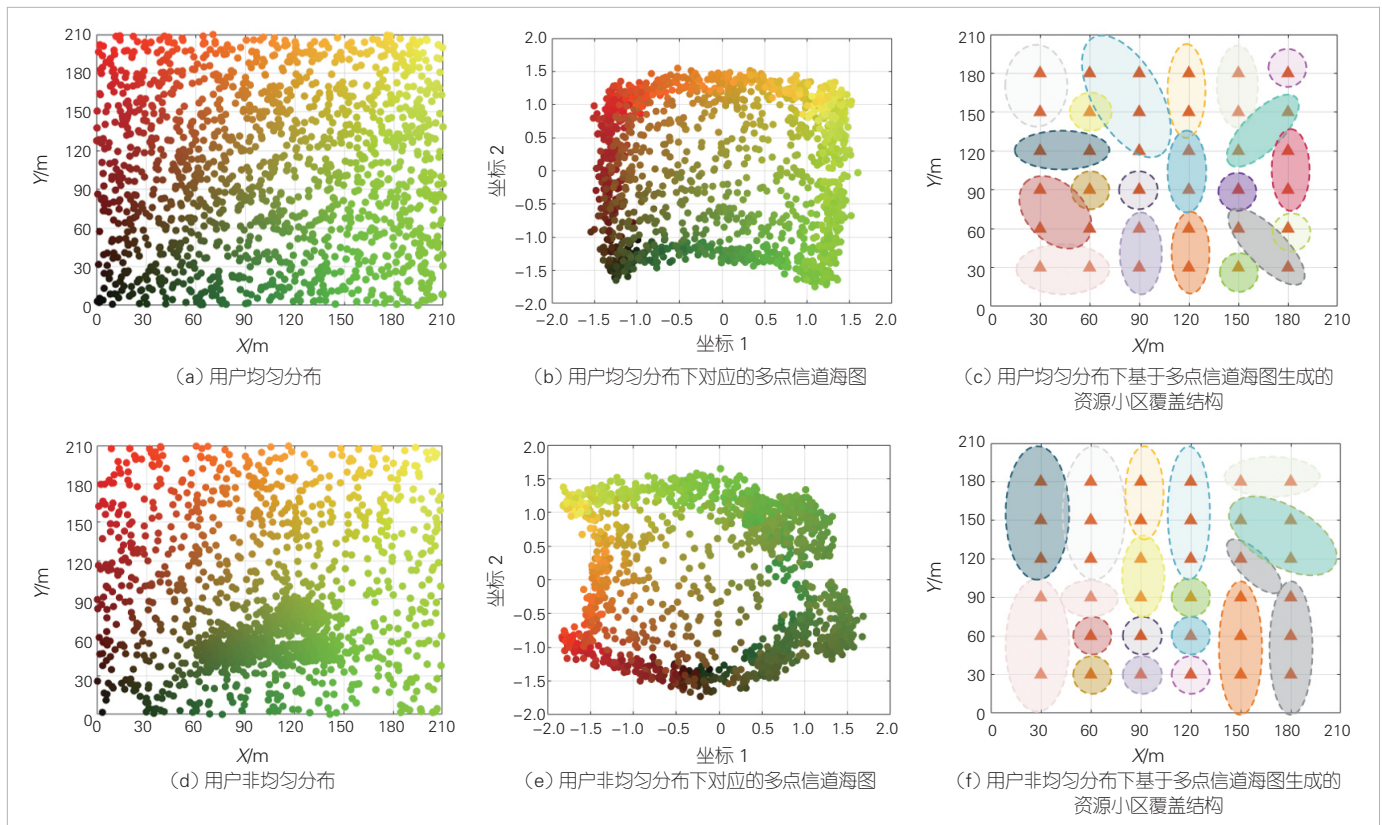
图4为资源小区生成示意图,其中用户数为1500。图4(a)展示了用户均匀分布情况,其中用户根据均匀点过程独立生成。不同颜色的点代表不同空间位置的用户,用户间标记的颜色越相似,其在通信系统中的实际物理距离就越近。图4(b)多点信道海图显示,用户在海图上的位置分布形状与原始位置相似,证明MPCC可有效保持信道域中用户之间的最近邻关系。图4(c)中展示了基于多点信道海图的资源小区优化算法得到的资源小区覆盖结构,其中不同的颜色分别代表不同的资源小区。图4(d)和图4(e)分别为用户非均匀分布情况和对应的多点信道海图。其中,600个用户是由泊松点过程独立生成,其余用户均服从均匀分布。从直观上看,虽然MPCC中用户的空间位置分布与原始位置相比发生了变化,但海图转换后用户的颜色标记并没有出现

明显的混叠现象。为了更直观地反映资源小区的覆盖效果,图4(f)展示了所提算法优化得到的资源小区。可以看出,在用户密集分布的区域,资源小区尽可能分裂出更多的资源小区,而在用户稀疏分布时,尽可能多地合并接入点,从而发挥BS协作的优势。

图5展示系统下行和速率与用户数的关系。随着用户数量的增加,可实现的系统下行和速率在初始阶段呈上升趋势



▲图5 系统可达和速率随用户数的变化趋势(P_{max} = 10 W)



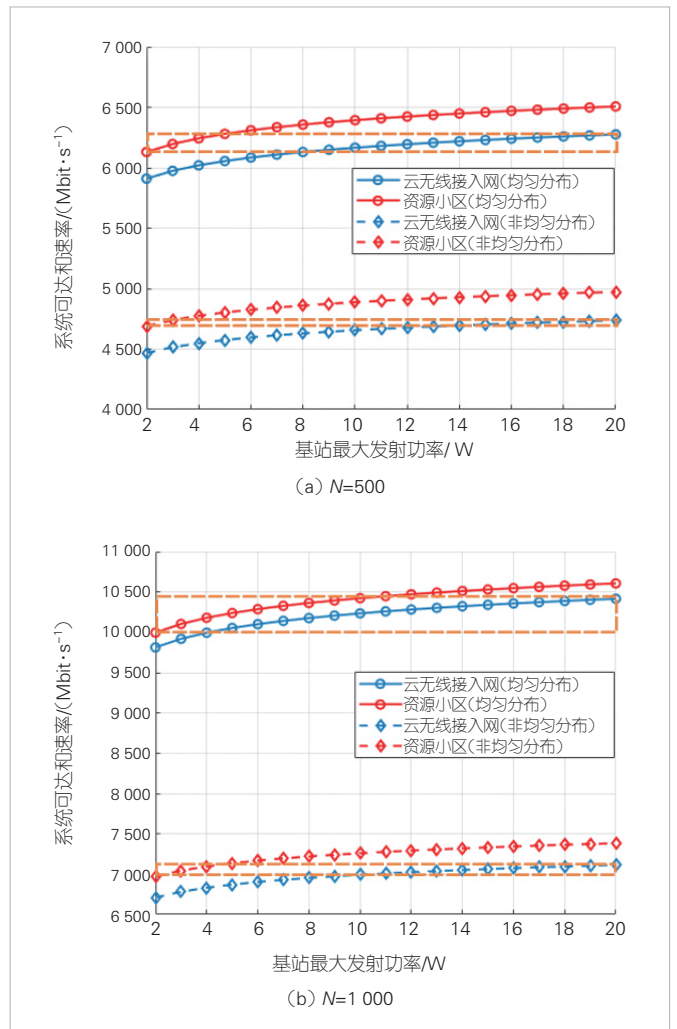
▲图4 资源小区生成示意图(N=1500)

势，随后逐渐趋于稳定。值得注意的是，随着用户数增多，用户速率需求也在变化，即分为两种业务场景：用户连接数少但速率需求高，用户连接数多但速率需求低。9个小区的C-RAN静态覆盖结构中，由于正交资源块数量的限制，全网最大接入用户数为 $9 \times 100 = 900$ 。因此，在用户均匀分布的情况下，接入用户数超过1 000个时，C-RAN静态覆盖结构的网络承载能力将达到上限，而用户非均匀分布时，在超过用户数1 500的情况下C-RAN静态覆盖结构不再有增益。对于资源小区这种弹性覆盖结构，小区的数量随用户数量的增加而灵活变化。当用户数量不断增加时，原始小区开始分裂为更多的资源小区，以确保允许更多的用户访问，直到超过4 500个用户时接近承载能力的上限。绿色实线代表基于瞬时CSI的LG方法的性能，红色实线代表我们所提的利用平均CSI基于MPCC的算法。可以看出，本文算法性能略差或相当于基于位置的贪心策略的优化方法，但都优于C-RAN静态覆盖结构（蓝色实线）。在用户均匀分布的情况下，本文方法与LG方法性能相比降低最大为7.8%，此时用户数为1 000，其相比于C-RAN性能提升1.84%；当用户数为5 500时，本文算法和LG算法性能相当，相比于C-RAN系统和速率分布提升126.27%。在用户非均匀分布情况下，用户数为1 500时，本文方法与LG方法性能相差最大为6.35%，此时，其相比于C-RAN性能提升12.45%；当用户数为5 500时，本文算法和LG算法性能相当，相比于C-RAN系统和速率提升153.23%。

通过提高基站总发射功率可以提高系统和速率，图6给出了 $N=500$ 和 $N=1\ 000$ 时系统可达和速率与基站最大发射功率对应关系。对于两种覆盖结构可达的系统速率区间（橙色虚线框），资源小区的某个系统和速率 R_{RC} 对应的基站最大发射功率为 P_{RC} ，找到 $R_{RC} \pm 5$ 范围内的 R_{C-RAN} ，其对应的基站最大发射功率为 P_{C-RAN} ，然后再按照公式 $\eta = \frac{P_{C-RAN} - P_{RC}}{P_{C-RAN}} \times 100\%$ 进行计算，可以得到资源小区相比于C-RAN达到相同系统和速率的能耗降低百分比 η 。 $N=500$ 时，在用户均匀分布情况下，资源小区相比于C-RAN达到相同系统和速率的能耗约为75.66%；在用户非均匀分布情况下，能耗降低约为85.46%。 $N=1\ 000$ 时，资源小区的能耗降低百分比在用户均匀分布和分均匀分布两种情况下分别为69.05%和77.90%。

4 结束语

针对日益增长的用户速率需求，我们提出基于多点信道海图的资源小区覆盖结构优化策略，通过构建信道海图来感



▲图6 系统可达和速率与基站最大发射功率对应关系

知用户空间分布，将信道特征相关性强的用户划分到同一资源小区。资源小区内基站对用户进行联合传输并分配正交资源块，以减少干扰，提升用户速率。资源小区间通过正交资源块复用以提升系统和速率。仿真结果表明，在相同基站总发射功率约束下，所提方法优化得到的资源小区弹性覆盖结构对比静态C-RAN覆盖结构有效提升了系统和速率。在能耗方面，在系统达到相同系统和速率的情况下，资源小区弹性覆盖结构有效降低了所需的基站发射功率。本文所提算法能够解决现有基于贪婪的资源小区覆盖结构优化算法中用户位置很难获取、瞬时信道状态信息不完美的问题，对网络覆盖结构优化具有重要参考价值。

致谢

感谢中国科学技术大学陈玥删、张佳杰同学对本论文做出的贡献！

参考文献

- [1] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2021, 64(1): 110301. DOI: 10.1007/s11432-020-2955-6
- [2] CHEN Y, ZHANG S Q, XU S G, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks [J]. IEEE communications magazine, 2011, 49(6): 30-37. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5783982
- [3] 张夏雨, 李建东, 刘俊宇, 等. 资源小区: 面向下一代超密集网络的无线覆盖结构 [J]. 物联网学报, 2023, 7(1): 1-17. DOI: 10.11959/j. issn. 2096-3750.2023.00336
- [4] COLORNI A, DORIGO M, MAFFIOLI F, et al. Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems [J]. International transactions in operational research, 1996, 3(1): 1-21. DOI: 10.1111/j. 1475-3995.1996.tb00032.x
- [5] GARCIA N, WYMEERSCH H, LARSSON E G, et al. Direct localization for massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2017, 65(10): 2475-2487. DOI: 10.1109/TSP.2017.2666779
- [6] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKÖLD J. Background of lte [M]//4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1-15. DOI: 10.1016/b978-0-12-419985-9.00001-5
- [7] KARL P. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. The london, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science, 1901, 2(11): 559-572. DOI: 10.1080/14786440109462720
- [8] SAMMON J W. A nonlinear mapping for data structure analysis [J]. IEEE transactions on computers, 1969, C-18(5): 401-409. DOI: 10.1109/T-C.1969.222678
- [9] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1986, 34(3): 276-280. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830
- [10] HAN S Q, YANG C Y, MOLISCH A F. Traffic-aware base station doze in cooperative multicell systems [C]//Proceedings of 2013 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing. IEEE, 2013: 394-398. DOI: 10.1109/ChinaSIP.2013.6625368

作者简介



叶远青, 中国科学技术大学在读硕士研究生; 主要研究领域为无线通信网络和资源管理。



张四海, 中国科学技术大学副教授; 主要研究领域为无线大数据、机器学习和IC工艺优化等; 先后主持和参加项目10余项, 已发表论文80余篇。



朱近康, 中国科学技术大学教授; 主要研究领域为无线移动通信与网络、通信信号处理及未来无线技术研究; 先后主持和参加项目20余项, 出版4本专著, 已发表论文150余篇。