

基于认知的 LTE 系统动态频谱分配

刘勤* 李红霞 李钊 孔欣怡

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 传统的软频率复用(SFR)无法适应长期演进(LTE)系统中业务的动态分布,可能导致小区中心和边缘区域频谱利用率不均。针对此问题,该文提出一种基于认知的 LTE 系统动态频谱分配方法(Cog-DSA)。该方法利用基站间的相互协作获得频谱使用状态信息,从而确定可用频谱集合,并评估来自邻小区的同频干扰,最终根据可用资源块的通信质量,对重负荷小区边缘进行频谱的动态借用和服务基站的灵活选择。仿真结果表明,所提方法能够有效改善频谱利用率,减少小区间干扰,显著提升边缘用户的传输速率。

关键词: 无线通信; 频谱分配; 长期演进; 软频率复用; 认知技术

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)01-0175-07

DOI: 10.11999/JEIT140001

Dynamic Spectrum Allocation for LTE System by Exploiting Cognitive Capability

Liu Qin Li Hong-xia Li Zhao Kong Xin-yi

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Traditional Soft Frequency Reuse (SFR) can not adapt to dynamic traffic distribution in Long Term Evolution (LTE) systems, leading to imbalanced spectral efficiency in cell center and edge area. In order to solve this problem, this paper proposes a Dynamic Spectrum Allocation scheme for LTE system by exploiting Cognitive capability (Cog-DSA). By exploiting inter base station cooperation, spectrum use status is acquired. Then the available spectrum set is determined and co-channel interference from adjacent cells is evaluated. Finally, dynamic spectrum borrowing and service base station selection are implemented. Simulation results demonstrate that the proposed Cog-DSA method can effectively improve the spectrum utilization, mitigate inter-cell interference and significantly raise cell edge users' transmission rate.

Key words: Wireless communication; Spectrum allocation; Long Term Evolution (LTE); Soft Frequency Reuse (SFR); Cognitive technology

1 引言

第4代(4G)移动通信技术标准 LTE 中^[1],随着移动用户数量的增加及对速率要求的提升,现有的频谱资源难以满足未来业务发展的需要^[2]。另一方面,对于采用 MIMO 和 OFDM 技术的 LTE 系统,小区间干扰会严重影响系统性能,尤其是导致小区边缘用户服务质量的下降^[3]。因此,提高频谱资源利用率,消除或减少小区间干扰,成为 LTE 发展面临的重要问题。

软频率复用(Soft Frequency Reuse, SFR)^[4]作为

一种重要的干扰协调 (Inter-cell Interference Coordination, ICIC)^[5]技术,将系统可用频谱划分为边缘和中心两部分,并根据用户信干噪比(SINR)将用户分为边缘用户和中心用户两部分。前者只能使用边缘频谱,后者可以使用边缘用户占用以外的全部频谱。然而由于边缘用户仅能够使用预分配的固定频谱,无法适应负载动态变化。为缓解此问题,研究人员提出一系列改进方案。文献[6]允许边缘用户使用所有资源块(Resource Block, RB),改善了频谱利用率,但增加了小区间干扰。文献[7]通过弹性借用邻小区边缘频谱,用以解决小区边缘重负荷问题,但造成了邻小区同频干扰,并且不能适应信道质量的动态变化。文献[8]中过载小区对空闲 RB 最多的邻小区进行资源借用,在提高频谱利用度的时候导致了小区间同频干扰。上述工作^[6-8]无法兼顾解决业务负荷动态分布导致的频率利用不均,以及

2014-01-03 收到, 2014-05-20 改回

国家自然科学基金重点项目(61231008), 重大专项(2012ZX03003005-005), 国家自然科学基金(61102057), 高等学校引智计划(B08038), 长江学者和创新团队发展计划(IRT0852)和中央高校基本科研业务费(K5051301014)资助课题

*通信作者: 刘勤 qinliu@mail.xidian.edu.cn

邻小区边缘区域同频干扰问题，导致边缘用户的性能无法得到良好保障。此外，以上方法均采用理想正六边形小区构造网络拓扑，未考虑由无线电波实际传输引起相邻小区间重叠覆盖区域。

随着 3GPP 关于认知特性的讨论，如自组织网络 (Self-Organized Network, SON)、载波聚合 (Carrier Aggregation, CA) 和灵活带宽调整等，将认知无线电 (Cognitive Radio, CR)^[9] 和认知网络 (Cognitive Network, CN)^[10] 技术引入 LTE 或 LTE-A 成为研究热点。LTE 系统融合认知技术可以提高频谱利用率，增强网络协作能力，同构网络间的协作可以有效改善边缘用户性能，异构网络间的协作能够减小系统间干扰。目前的研究工作主要集中在异构网络场景^[11-13]，关于认知技术在 LTE 同构网络中改善边缘用户性能的研究尚不多。

本文以小区边缘用户通信性能的改善为目标，在传统 SFR 的基础上，将认知能力引入 LTE 系统，提出一种新的动态频谱分配方案。当目标小区边缘区域重负荷时，通过基站间协作获得频谱使用状态信息并评估来自邻小区的同频干扰，利用这些信息，目标小区边缘用户能够对邻小区优选频谱(等价于目标小区的非优选频谱)进行机会的借用，并根据基站的服务质量进行自适应基站选择。

2 系统模型

研究多小区场景中边缘区域用户的下行通信问题，如图 1 所示。具有认知能力的基站(Cognitive eNB, C-eNB)位于小区中心，采用全向天线，小区覆盖区域为理想的圆形。考虑到无线电波的实际传输，相邻小区间存在一部分重叠区域。假设 C-eNB 能够准确获取终端用户的地理位置信息，C-eNB 之间能够交互所属小区的频谱使用状态、链路质量等信息。以 C-eNB₁ 所在小区 c_1 为研究对象，称为目标小区，C-eNB₂ 与 C-eNB₃ 所在小区 (c_2 和 c_3) 为对应的相邻小区。为讨论简便，仅考察相邻 3 个小区构成的系统拓扑。每个小区的半径为 R ，用户在小区内随机独立地分布。终端 j 与基站 C-eNB _{k} ($k \in \{1,2,3\}$) 的距离为 d_{kj} ，当 d_{kj} 小于某一预设门限 d_{th} 时，终端为中心用户，否则属于边缘用户。假设系统中用户业务的分布是动态且不均匀的，目标小区边缘区域重负荷，相邻小区边缘区域负荷较轻。

将系统可用频谱资源划分为 3 段大小相等且相互正交的频率集合 Ω_k ($k \in \{1,2,3\}$)， Ω_k 称为小区 c_k 的边缘用户优选频谱集合，位于小区 c_k 边缘区域的用户优先使用 Ω_k 中的频率资源，中心用户可以使用边缘用户占用之外的全部频谱，即小区 c_k 的边缘用户比中心用户对 Ω_k 具有更高的使用优先级。

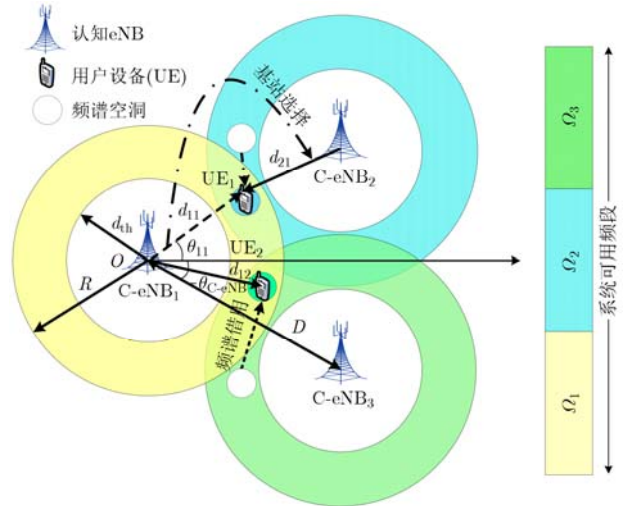


图 1 系统模型

LTE 下行通信采用 OFDMA 方式，在 3GPP LTE 标准中，定义频谱分配的最小单位为资源块 (RB)，一个 RB 由频域上 12 个连续子载波 ($12 \times 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz}$) 和时域上 1 个时隙 (0.5 ms) 构成。频域上整个传输带宽被划分为若干个 RB，每个 UE 可以使用一个或多个 RB 用于业务传输。为了便于动态资源管理，将 C-eNB _{k} 管理的任意 RB _{n} ($n \in \{1, 2, \dots, N\}$) 建模为包含 3 个特征参数的资源矢量 \mathbf{V}_{kn} ，如式(1)所示。其中， k 表示小区编号 ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$)， K 为小区总数； n 表示 RB 编号 ($n \in \{1, 2, \dots, N\}$)， N 为系统中 RB 总数； s 表示 RB 的使用状态 ($s \in \{00, 10, 11\}$)，00 表示空闲，10 表示中心用户占用，11 表示边缘用户占用； q 表示终端使用该 RB 的通信质量(用 SINR 衡量，单位为 dB)。C-eNB _{k} 针对小区 c_k 维护一个 $N \times 3$ 的频谱状态信息矩阵 \mathbf{M}_k ，如图 2 和式(2)所示， $(\cdot)^T$ 表示向量的转置。

\mathbf{M}_k		
n	s	q
1	11	$-\infty$
2	00	6.6
...
$N/3$	10	5.3
$(N/3)+1$	10	$-\infty$
...
$2N/3$	00	4.2
$(2N/3)+1$	10	$-\infty$
...
N	00	-7.7

图 2 资源状态信息矩阵

$$\mathbf{V}_{kn} \triangleq [n \ s \ q] \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_k \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{k1}^T & \mathbf{V}_{k2}^T & \cdots & \mathbf{V}_{kN}^T \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

基站初始化 \mathbf{M}_k 时, 置 $q = -\infty$, 表示当前 RB 不可分配, 在频谱分配过程中对 q 进行更新。考虑 3 小区场景, \mathbf{M}_k 中 RB 被均分为 3 份, 其中 1 份作为 c_k 的优选频谱集合, 相邻小区的优选频谱集合相互正交。

在进行资源调度时, 以一个传输时间间隔 (Transmission Time Interval, TTI) 作为基本单位。C-eNB 之间以一个 TTI, 即 0.5 ms 为间隔^[6], 通过 X2 接口实现频谱状态信息 (\mathbf{M}_k) 的交互, 假设在该时间间隔内频谱使用状态保持稳定, TTI 之间各 RB 的状态独立地随机变化。

3 用户位置及信干噪比计算

根据系统模型部分的假设, 用户在小区内随机独立分布, 用户在某一 RB 上获得的 SINR 与其距离基站的远近有关, 本节描述了终端与基站的空间关系模型, 并在此基础上给出用户使用不同 RB 获得 SINR 的计算方法, 为下一节具体的频谱分配方法设计提供依据。

如图 1 所示, 以目标小区中心为原点建立极坐标系, 边缘用户 j 的位置信息 (d_{1j}, θ_{1j}) 满足 $d_{th} \leq d_{1j} \leq R$, $-\pi/3 \leq \theta_{1j} \leq \pi/3$ 。虽然系统模型中小区数为 3, 并且研究 $\theta_{1j} \in [-\pi/3, \pi/3]$ 的情况, 但通过将当前 3 小区模型以原点为中心分别旋转 $2\pi/3$ 和 $-2\pi/3$ 进行复制, 可灵活扩展至 7 小区场景, 因此本文的研究不失一般性。

基站间距离为 D , 相邻小区基站的坐标分别为 (D, θ_{C-eNB}) 和 $(D, -\theta_{C-eNB})$, 不难得出, $\theta_{C-eNB} = \pi/6$ 。可以计算出坐标为 (d_{1j}, θ_{1j}) 的用户与小区 c_k ($k \in \{1, 2, 3\}$) 基站 C-eNB $_k$ 之间的距离 d_{kj} 为

$$d_{kj} = \begin{cases} d_{1j}, & k = 1 \\ \sqrt{d_{1j}^2 + D^2 - 2d_{1j}D \cdot \cos(\theta_{1j} - \theta_{C-eNB})}, & k = 2 \\ \sqrt{d_{1j}^2 + D^2 - 2d_{1j}D \cdot \cos(\theta_{1j} + \theta_{C-eNB})}, & k = 3 \end{cases} \quad (3)$$

对归属于小区 c_k 的边缘用户 j , 定义其可用频谱指示向量为 $\mathbf{A}_{kj} = [a_{kj}^{(1)} \ a_{kj}^{(2)} \ \cdots \ a_{kj}^{(N)}]$, $a_{kj}^{(n)} \in \{0, 1\}$, $a_{kj}^{(n)}$ 为 1 表示 RB $_n$ 可分配给边缘用户 j , 为 0 表示 RB $_n$ 不可分配。对于传统 SFR, 不属于 Ω_k 的 RB 对应 $a_{kj}^{(n)} = 0$, 即边缘用户不可使用非优选 RB。对于不同小区的边缘用户, 式 $\sum_{k=1}^K a_{kj}^{(n)} \in \{0, 1\}$ 成立, 即一个 RB 至多分配给系统内的一个边缘用户。

用户 j 在 RB $_n$ 上接收到的来自 C-eNB $_k$ 的有用信号功率为

$$S_{kj}^{(n)} = a_{kj}^{(n)} P_T G_{kj}^{(n)} \quad (4)$$

其中, P_T 表示基站发射功率, $G_{kj}^{(n)}$ 表示服务基站 C-eNB $_k$ 使用 RB $_n$ 向用户 j 传输的链路增益。考虑到路径损耗和阴影衰落, $G_{kj}^{(n)}$ 的计算公式为

$$G_{kj}^{(n)} = L(d_{kj}) \cdot 10^{\varphi_{kj}^{(n)}/10} \quad (5)$$

其中, d_{kj} 表示终端 j 与 C-eNB $_k$ 之间的距离, $L(d_{kj})$ 是自由空间路径损耗, $10^{\varphi_{kj}^{(n)}/10}$ 是 C-eNB $_k$ 到用户的对数正态阴影衰落, $\varphi_{kj}^{(n)}$ 为高斯随机变量, $\varphi_{kj}^{(n)} \sim N(0, \sigma^2)$, 本文选取基站信号的标准方差为 8 dB^[14]。

定义 c_k 的频谱分配向量 $\mathbf{U}_k = [u_k^{(1)} \ u_k^{(2)} \ \cdots \ u_k^{(N)}]$, $u_k^{(n)} \in \{0, 1\}$, $u_k^{(n)}$ 为 1 表示 RB $_n$ 在小区 c_k 中被使用, 为 0 表示 c_k 中 RB $_n$ 空闲。 \mathbf{U}_k 可由 \mathbf{M}_k 唯一确定, 若 $s_k^{(n)} = 00$, $u_k^{(n)} = 0$; 否则, $u_k^{(n)} = 1$ 。C-eNB $_k$ 根据 \mathbf{A}_{kj} 和邻小区基站 C-eNB $_{\tilde{k}}$ ($\tilde{k} \neq k$) 的频谱状态信息 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$, 可以估计边缘用户 j 在 c_k 使用 RB $_n$ 时受到来自邻小区基站 C-eNB $_{\tilde{k}}$ 的干扰。

$$I_{kj}^{(n)} = \sum_{\tilde{k} \in \{1, 2, \dots, K\}, \tilde{k} \neq k} u_{\tilde{k}}^{(n)} P_T G_{\tilde{k}j}^{(n)} \quad (6)$$

其中, $G_{\tilde{k}j}^{(n)}$ 表示干扰基站 C-eNB $_{\tilde{k}}$ 对用户 j 在 RB $_n$ 上的干扰链路增益。 $I_{kj}^{(n)} = 0$ 说明该 RB $_n$ 未被邻小区占用。

C-eNB $_k$ 服务的边缘用户 j 在 RB $_n$ 上的 SINR 由式(7)给出:

$$\gamma_{kj}^{(n)} = \frac{a_{kj}^{(n)} P_T G_{kj}^{(n)}}{N_0 + \sum_{\tilde{k} \in \{1, 2, \dots, K\}, \tilde{k} \neq k} u_{\tilde{k}}^{(n)} P_T G_{\tilde{k}j}^{(n)}} \quad (7)$$

其中, N_0 表示信道中的噪声功率。定义 $\mathbf{U}_{kj} = [u_{kj}^{(1)} \ u_{kj}^{(2)} \ \cdots \ u_{kj}^{(N)}]$ 为用户 j 由 C-eNB $_k$ 服务时的频谱分配向量, $u_{kj}^{(n)} \in \{0, 1\}$, $u_{kj}^{(n)}$ 为 1, 表示 c_k 中 RB $_n$ 分配给用户 j , 为 0 表示未分配。用户 j 可以由多个基站同时服务, 其带宽归一化吞吐率(单位 bit/(s·Hz)) 为

$$r_{kj} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N u_{kj}^{(n)} \log_2(1 + \gamma_{kj}^{(n)}) \quad (8)$$

4 基于认知的 LTE 动态频谱分配

本节给出基于认知的 LTE 动态频谱分配方法 (Cog-DSA)。对于目标小区 c_k , 中心用户频谱分配方式与传统 SFR 相同, 边缘用户优先使用优选频谱集合 Ω_k 中的资源。当边缘区域重负荷导致 Ω_k 中无空闲 RB 时, 采用传统 SFR, 用户将无法获得服务。本文采用认知技术中机会频谱借用的思想, 目标 C-eNB $_k$ 通过与相邻 C-eNB $_{\tilde{k}}$ ($\tilde{k} \neq k$) 信息交互获得频谱使用状态矩阵 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$, 根据 c_k 自身频谱使用状态确定边缘用户 j (属于 c_k) 的可用频谱指示向量 \mathbf{A}_{kj} , 并通过评估可用 RB 的 SINR, 实现对相邻小区优选

集合 $\Omega_k (\tilde{k} \neq k)$ 中可用且质量较好的资源块动态借用。为了抑制小区间同频干扰, 必须保证借用过程中相邻小区边缘区域的 RB 正交。

若邻小区 $c_{\tilde{k}}$ 优选资源被借用后的某个时刻, $c_{\tilde{k}}$ 边缘用户要求使用该 RB, 因其具有更高优先级, 相应 RB 将被收回。因此, 目标小区边缘用户在进行资源分配时, 可能需要针对邻小区边缘用户的出现采取退避措施。对于小区 c_k 的边缘用户, 可以通过 C-eNB_k 与 C-eNB _{\tilde{k}} 之间协商完成对邻小区 $\Omega_{\tilde{k}}$ 中的空闲 RB 的借用, 服务该用户的基站是 C-eNB_k。由于相邻小区间存在重叠覆盖区域, 若 C-eNB _{\tilde{k}} 对用户的服务质量优于 C-eNB_k 并且超过一定门限, 系统将引导用户切换至 C-eNB _{\tilde{k}} 以获得更好的服务。频谱借用是目标小区边缘用户借用邻小区优选资源集中的空闲 RB; 切换是目标小区边缘用户切换至相邻小区基站, 使用切换后小区的优选 RB。本质而言, 两种情况使用的资源块相同。如图 1 所示, 边缘用户 UE₁ 选择了从基站 C-eNB₁ 向邻基站 C-eNB₂ 切换, UE₂ 则选择借用邻小区 c_3 的边缘优选集合 Ω_3 中的空闲频谱。

以目标小区 c_k 中任意用户 j 为研究对象, 基于认知的 LTE 系统资源分配(Cog-DSA)步骤如下:

步骤 1 系统初始化。认知基站 C-eNB_k 生成资源信息矩阵 $\mathbf{M}_k (k \in \{1, 2, \dots, K\})$, 并通过 X2 接口与邻基站 C-eNB _{\tilde{k}} ($\tilde{k} \in \{1, 2, \dots, K\}$ 且 $k \neq \tilde{k}$) 进行信息交互, 获得 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$ 。

步骤 2 若目标小区 c_k 有新用户 j 到达, 用户需求的 RB 个数为 μ_j , 分别初始化用户 j 的可用频谱指示向量 $\mathbf{A}_{kj} = \mathbf{0}_{N \times 1}$ 和频谱分配向量 $\mathbf{U}_{kj} = \mathbf{0}_{N \times 1}$, $\mathbf{0}_{N \times 1}$ 表示 $N \times 1$ 零向量, 执行步骤 3; 否则等待, 并在新的 TTI 开始时再次执行步骤 2。

步骤 3 用户 j 向 C-eNB_k 报告位置信息, C-eNB_k 根据式(3)计算用户 j 与 C-eNB_k 之间距离 d_{kj} 。若 $d_{kj} \leq d_{th}$, 用户 j 属于中心区域, 按照传统 SFR 方式进行频谱分配; 否则, 用户 j 属于边缘区域, 执行步骤 4。

步骤 4 C-eNB_k 扫描其优选频谱集合 Ω_k 中的 RB, 根据 Ω_k 中空闲 RB 的编号 ($s_k^{(n)} \in \{00\}$), 将 \mathbf{A}_{kj} 中对应元素置 1, 计算 \mathbf{A}_{kj} 更新后的 1 范数 $\|\mathbf{A}_{kj}\|_1 = \sum_{n=1}^N |a_{kj}^{(n)}|$ 。若 $\|\mathbf{A}_{kj}\|_1 = 0$, 执行步骤 5。若 $0 < \|\mathbf{A}_{kj}\|_1 < \mu_j$, 将可用 RB 全部分配, 置 \mathbf{M}_k 中 $s_k^{(n)} = 11, u_{kj}^{(n)} = 1$, 执行步骤 5。若 $\|\mathbf{A}_{kj}\|_1 \geq \mu_j$, 即 Ω_k 中空闲 RB 能够满足用户 j 需求, 根据式(7)分别计算用户 j 在各空闲 RB 上获得的信干噪比 $\gamma_{kj}^{(n)}$, 并更新 $q_{kj}^{(n)}$, 选取 $q_{kj}^{(n)}$ 最大的 μ_j 个 RB 分配, 分别置其在 \mathbf{M}_k

中的使用状态 $s_k^{(n)} = 11$, 置 $u_{kj}^{(n)} = 1$, 执行步骤 6。

步骤 5 计算剩余资源需求 $\bar{\mu}_j = \mu_j - \|\mathbf{A}_{kj}\|_1$, 用矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_{kj}$ 保存 \mathbf{A}_{kj} 的当前状态, 记为 $\hat{\mathbf{A}}_{kj} = \mathbf{A}_{kj}$ 。扫描优选频谱资源集合 Ω_k 中的 RB, C-eNB_k 检索其在 \mathbf{M}_k 中的使用状态, 若 $s_k^{(n)} = 10$, 则将 \mathbf{A}_{kj} 中对应元素置 1。计算 $\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}$, 其非零元素对应的 RB 表示可以通过退避中心用户得到的资源块(边缘用户 j 对 Ω_k 中的 RB 具有更高的使用优先级)。若 $\|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1 = 0$, 执行步骤 6。若 $0 < \|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1 < \bar{\mu}_j$, 将所有新增可用 RB 全部分配, 置对应的 $s_k^{(n)} = 11, u_{kj}^{(n)} = 1$ 。若 $\|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1 \geq \bar{\mu}_j$, 计算用户 j 在 $\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}$ 非零元素对应的各 RB 上获得的信干噪比 $\gamma_{kj}^{(n)}$, 更新 $q_{kj}^{(n)}$, 选取 $q_{kj}^{(n)}$ 最大的 $\bar{\mu}_j$ 个 RB 分配, 并置其使用状态 $s_k^{(n)} = 11$, 置 $u_{kj}^{(n)} = 1$ 。

步骤 6 对步骤 4、步骤 5 已分配 RB, 检索其在 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$ 中的使用状态, 若 $s_{\tilde{k}}^{(n)} = 11$, 即邻小区 $c_{\tilde{k}}$ 边缘用户借用目标小区优选 RB_n, 则 C-eNB_k 收回该资源, $c_{\tilde{k}}$ 中边缘用户退避并更新 $s_{\tilde{k}}^{(n)} = 00$ 。若步骤 4 中 $\|\mathbf{A}_{kj}\|_1 \geq \mu_j$ 或步骤 5 中 $\|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1 \geq \bar{\mu}_j$, Ω_k 中可用 RB 能够满足用户资源请求, 算法结束; 否则执行步骤 7。

步骤 7 计算剩余资源需求 $\bar{\mu}_j = \mu_j - \|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1$, 更新 $\hat{\mathbf{A}}_{kj} = \mathbf{A}_{kj}$ 。根据 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$ 和 \mathbf{M}_k , C-eNB_k 对属于 $\Omega_{\tilde{k}}$ 的 RB_n 在 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$ 和 \mathbf{M}_k 中的使用状态逐一进行检索。若对于 C-eNB _{\tilde{k}} , $s_{\tilde{k}}^{(n)} = 11$, 即邻小区 $c_{\tilde{k}}$ 的优选 RB_n 未被其边缘用户使用; 并且对于 C-eNB_k, $s_k^{(n)} = 00$, 即目标小区 c_k 对应的非优选 RB_n 空闲, 则将 \mathbf{A}_{kj} 中与 RB_n 对应的元素置 1, 表明该资源块可被借用。计算当前 $\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}$, 若为零向量, 表示无 RB 可以借用, 算法结束; 否则, $\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}$ 中非零元素对应的 RB_n 为新增可借用资源块, 计算用户 j 在可借用 RB_n 上获得的信干噪比 $\gamma_{kj}^{(n)}$ 和 $\gamma_{\tilde{k}j}^{(n)}$, 更新 $q_{kj}^{(n)}$ 和 $q_{\tilde{k}j}^{(n)}$ 。

步骤 8 遍历新增的可借用 RB_n, 若 $\|\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}\|_1 \geq \bar{\mu}_j$, 选择 $\bar{\mu}_j$ 个具有最佳 $\max(q_{kj}^{(n)}, q_{\tilde{k}j}^{(n)})$ 的 RB 分配给用户 j ; 否则, 将 $\mathbf{A}_{kj} - \hat{\mathbf{A}}_{kj}$ 中非零元素对应的所有 RB 分配给用户 j , $\|\mathbf{A}_{kj}\|_1$ 为用户实际获得的 RB 个数, 超出的需求 (RB_n) 将被阻塞。按照步骤 9 进行频谱借用和基站切换的选择。

步骤 9 对步骤 8 分配的 RB_n, 计算 $q_{kj}^{(n)} - q_{\tilde{k}j}^{(n)}$ 并与预设切换门限 η 进行比较。若小于 η , 由 C-eNB_k 通过 RB_n 向用户 j 提供服务, 置 \mathbf{M}_k 中的 $s_k^{(n)} = 11$, 置 $u_{kj}^{(n)} = 1$, 表明用户 j 对 \mathbf{M}_k 中空闲的优选 RB(等价于 c_k 中空闲的非优选 RB) 进行借用; 若大于 η , 由 C-eNB _{\tilde{k}} 通过 RB_n 向用户 j 提供服务, 置 $\mathbf{M}_{\tilde{k}}$ 中的 $s_{\tilde{k}}^{(n)} = 11$, 置 $u_{\tilde{k}j}^{(n)} = 1$, 即用户 j 切换至 $c_{\tilde{k}}$ 并使用其

空闲的优选 RB。算法结束。

根据算法描述，边缘用户频谱分配过程主要分为 3 个阶段：分配优选集合 Ω_k 中的空闲 RB(步骤 4 和步骤 6)，分配 Ω_k 中由中心用户退避获得的 RB(步骤 5 和步骤 6)，以及对通过机会频谱借用或基站切换获得的 Ω_k 中 RB 进行分配(步骤 7、步骤 8、步骤 9)，只有在当前阶段所获 RB 不能满足用户需求的情况下，才会进入下一阶段频谱分配。

需要注意的是，采用本文提出的动态频谱分配方法，用户 j 可以由多个基站(C-eNB_k 和 C-eNB_k)同时服务，其对应的频谱分配矢量分别为 \mathbf{U}_{kj} 及 \mathbf{U}_{kj} ，即为执行频谱分配算法的最终输出结果。

5 仿真结果

本节采取如图 1 所示的多蜂窝下行通信场景，以目标小区任一边缘用户为研究对象，对 SFR 和本文提出的 Cog-DSA 性能进行仿真。随机出现在目标小区边缘区域的某一用户对 RB 的需求量为 $\mu \in \{1, 2, \dots, N\}$, $N = 15$ 表示系统可用 RB 的总数。定义边缘用户对 RB 的相对需求度 $\alpha = \mu/N$ ，用户满意度 $\rho = \kappa/\mu$ ，其中 κ 表示用户实际获得的 RB 数。仿真条件及参数为：各基站发射功率相同，均为 43 dBm，系统带宽为 3 MHz，基站间距 $D = 1732$ m，小区半径 $R = 1000$ m, $d_{th} = 0.62R$ ^[15]，热噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz，考虑标准方差 $\sigma = 8$ dB 的对数正态阴影衰落。为了使边缘用户获得最佳的服务质量，选取切换门限 $\eta = 0$ 。

根据上文中对 Cog-DSA 机制的叙述，目标小区边缘用户进行频谱借用或小区切换，受到目标小区边缘业务负荷，以及目标小区中心频段和邻小区边缘频段使用状态的影响。定义目标小区 RB 使用状态概率向量 $\mathbf{p}_t = [p_t^i|_{s=0} \ p_t^{oc}|_{s=10} \ p_t^{oc}|_{s=11}]$; $p_t^i|_{s=0}$, $p_t^{oc}|_{s=10}$ 及 $p_t^{oc}|_{s=11}$ 分别表示 RB 空闲、被中心用户占用及被边缘用户占用的概率，满足 $p_t^i|_{s=0} + p_t^{oc}|_{s=10} + p_t^{oc}|_{s=11} = 1$ 。 \mathbf{p}_t 可以进一步划分为边缘区域和中心区域 RB 使用状态概率向量 \mathbf{p}_t^e 及 \mathbf{p}_t^c 。类似地，相邻小区 RB 使用状态概率向量用 $\mathbf{p}_a = [p_a^i|_{s=0} \ p_a^{oc}|_{s=10} \ p_a^{oc}|_{s=11}]$ 表示，其中心和边缘区域的 RB 状态概率向量分别为 \mathbf{p}_a^c 和 \mathbf{p}_a^e 。各个 RB 的忙闲状态相互独立。

图 3 给出 $\mathbf{p}_a = [0.35 \ 0.35 \ 0.30]$, $\mathbf{p}_t^c = [0.30 \ 0.56 \ 0.14]$, \mathbf{p}_t^e 取不同值时，边缘用户的归一化吞吐率和满意度与相对需求度 α 的关系。 \mathbf{p}_t^e 中与频谱使用状态 $s = 11$ 对应的元素取值反映了目标小区边缘区域业务负荷的轻重。可以发现，SFR 与 Cog-DSA 的性能均随着边缘区域业务负荷的降低而改善。边缘区域负荷越重，用户从优选频谱集合获得可用 RB

的概率越低，由于 Cog-DSA 可以实现边缘用户对频谱的动态使用，因此吞吐率和用户满意度均优于 SFR。随着 α 的增大，Cog-DSA 相对于 SFR 的吞吐率改善相应增加，同样受益于 Cog-DSA 对资源的动态利用。对于 SFR，边缘用户获得可用 RB 的概率由 \mathbf{p}_t^e 决定；对于 Cog-DSA，这一概率受到 \mathbf{p}_t^e , \mathbf{p}_t^c 和 \mathbf{p}_a^e 的共同制约。因此，当 α 增大到一定程度(临界点)时，全部可用 RB 都被用户获得，用户的吞吐率性能达到饱和，不再随 α 的增加而增大，并且 SFR 的临界点先于 Cog-DSA。对于用户满意度 ρ ，当 α 到达临界点并继续增大时，由于增加的用户需求持续得不到满足， ρ 继续减小。

图 4 给出 $\mathbf{p}_t^e = [0.4 \ 0.1 \ 0.5]$, $\mathbf{p}_a^c = [0.35 \ 0.35 \ 0.30]$, $\mathbf{p}_t^c = [0.5 \ 0.4 \ 0.1]$, \mathbf{p}_a^e 取不同值时，边缘用户归一化吞吐率和满意度与相对需求度 α 的关系。 \mathbf{p}_a^e 中与频谱使用状态 $s = 11$ 对应的元素取值反映了邻小区边缘区域业务负荷的轻重。由图可见， \mathbf{p}_a^e 对 SFR 的吞吐率和用户满意度均没有影响。对于 Cog-DSA，邻小区边缘区域业务负荷越轻，邻小区优选频谱可被借用的概率越大，因此 Cog-DSA 性能随着边缘区域业务负荷的降低而改善。关于 α 增大(包括临界点)对吞吐率和 ρ 的影响的讨论与图 3 类似，不再赘述。

图 5 给出 $\mathbf{p}_t^e = [0.4 \ 0.1 \ 0.5]$, $\mathbf{p}_a = [0.35 \ 0.35 \ 0.30]$, \mathbf{p}_t^c 取不同值时，边缘用户的归一化吞吐率和满意度与相对需求度 α 的关系。 \mathbf{p}_t^c 中与频谱使用状态 $s = 00$ 对应的元素取值反映了目标区中心区域 RB 空闲的程度。由图可见， \mathbf{p}_t^c 对 SFR 的吞吐率性能和用户满意度均没有影响。对于 Cog-DSA，目标小区中心区域 RB 空闲程度越高，频谱可被借用的概率越大，因此 Cog-DSA 的性能随着目标小区中心区域 RB 空闲程度的增加而改善。关于 α 增大(包括临界点)对吞吐率和 ρ 的影响的讨论与图 3 类似。

相比于传统 SFR，Cog-DSA 显著提升了目标小区边缘用户的服务质量，特别是在目标小区边缘重负荷、目标小区中心及邻小区边缘轻负荷的情况下，Cog-DSA 对 SFR 的优势更为明显。该算法计算复杂度为 $O(JKN)$ ，即与用户数、基站数和 RB 数成正比关系。虽然 Cog-DSA 需要基于基站间的信息交互实现频谱分配和小区选择，在一定程度上增加了系统开销，但凭借 LTE 系统强大的功能特性^[16]，以及与终端侧相比，基站侧较宽松的硬件和成本约束，本文所提算法具有较好的可实现性。

6 结束语

本文以小区边缘用户通信性能的改善为目标，在传统 SFR 的基础上，将认知能力引入 LTE 系统，

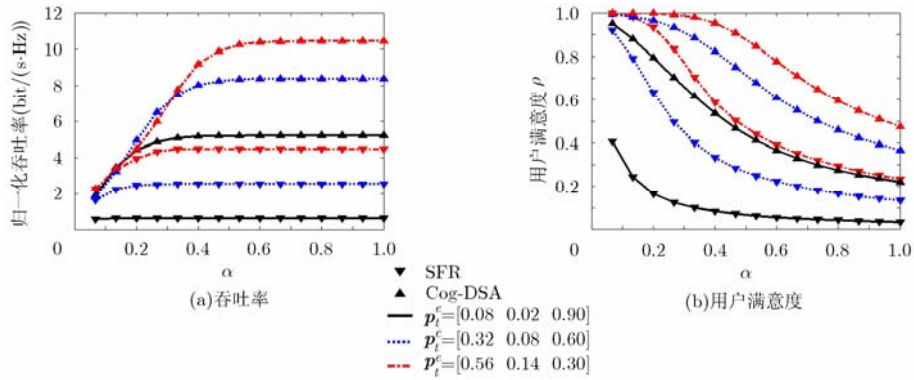


图 3 p_i^e 对归一化吞吐率和 ρ 的影响

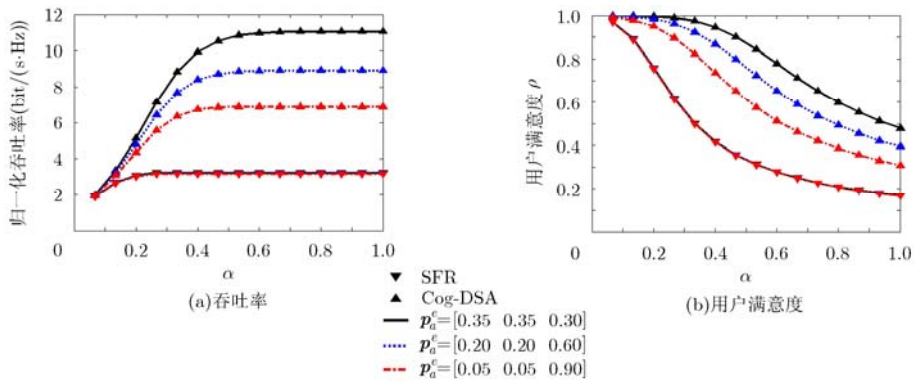


图 4 p_a^e 对归一化吞吐率和 ρ 的影响

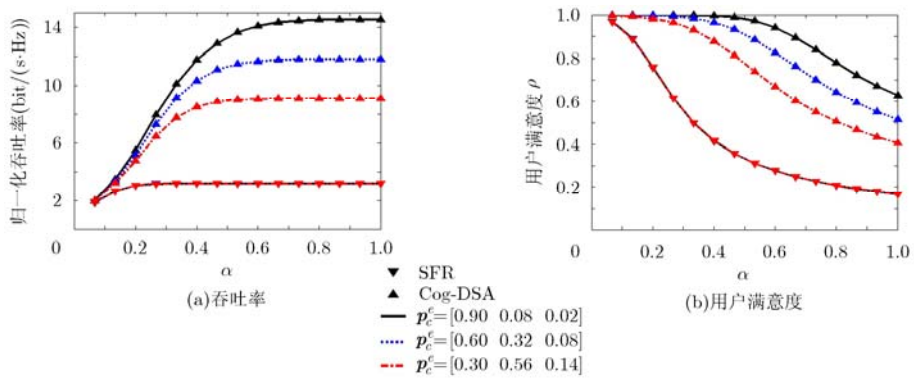


图 5 p_i^e 对归一化吞吐率和 ρ 的影响

提出一种动态频谱分配方法(Cog-DSA)，利用基站间的相互协作获得频谱使用状态信息，从而确定可用资源集合并评估来自邻小区的同频干扰，最后根据资源块的通信质量，完成频谱的动态借用和服务基站的灵活选择。所提方案改变了传统 SFR 对边缘用户可用频率集合的约束，能够提升频谱利用效率，改善边缘用户的传输速率。本文研究的重点是在不增加额外频谱资源的情况下，提高系统频谱效率，即针对 LTE 系统的频谱进行共享机制设计。若按照传统的认知思想，通过感知获取新的频谱资源，由于这部分资源具有随机动态的特性，无法进行相对

固定的规划，因此与本文研究的频谱存在本质的区别，可以将本文方法与频谱动态借用相结合进行新的设计。

参考文献

[1] 3GPP TS 36.101 V11.4.0. User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception[S]. 2013.
 [2] Xiao J, Hu R Q, Qian Y, et al.. Expanding LTE network spectrum with cognitive radios: from concept to implementation[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(2): 12-19.
 [3] Hamza A, Khalifa S, Hamza H, et al.. A survey on inter-cell

- interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1642–1670.
- [4] 3GPP, R1-050507. Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE[S]. 2005.
- [5] Lee D, Li G Y, and Tang S. Inter-cell interference coordination for LTE systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4408–4420.
- [6] Zhang X, He C, Jiang L, *et al.* Inter-cell interference coordination based on softer frequency reuse in OFDMA cellular systems[C]. Proceedings of International Conference on Neural Networks and Signal Processing, Nanjing, China, 2008: 270–275.
- [7] 3GPP, R1-051341. Flexible Fractional Frequency Reuse Approach[S]. 2005.
- [8] Mao X, Maaref A, and Teo K H. Adaptive soft frequency reuse for inter-cell interference coordination in SC-FDMA based 3GPP LTE uplinks[C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), New Orleans, American, 2008: 1–6.
- [9] Mitola J and Maguire G Q. Cognitive radios: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13–18.
- [10] Thomas R W, Friend D H, DaSilva L A, *et al.* Cognitive Networks[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2007: 17–41.
- [11] Huang J W and Krishnamurthy V. Cognitive base stations in LTE/3GPP femtocells: a correlated equilibrium game-theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(12): 3485–3493.
- [12] Naranjo J, Viering I, and Friederichs K J. A cognitive radio based dynamic spectrum access scheme for LTE heterogeneous networks[C]. Proceedings of Wireless Telecommunications Symposium (WTS), London, UK, 2012: 1–7.
- [13] Wang W, Yu G, and Huang A. Cognitive radio enhanced interference coordination for femtocell networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6): 37–43.
- [14] Qian M, Handjawana W, Li Y, *et al.* Inter-cell interference coordination through adaptive soft frequency reuse in LTE networks[C]. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China, 2012: 1618–1623.
- [15] Amer M. Optimal configuration of fractional frequency reuse system for LTE cellular networks[C]. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Quebec City, Canada, 2012: 1–5.
- [16] Pateromichelakis E, Shariat M, Quddus A, *et al.* On the evolution of multi-cell scheduling in 3GPP LTE/LTE-A[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(2): 701–717.
- 刘 勤： 男，1976年生，博士，副教授，研究方向为无线通信、认知无线电。
- 李红霞： 女，1988年生，硕士生，研究方向为无线资源分配、认知无线电。
- 李 钊： 男，1981年生，博士，副教授，研究方向为 MIMO 无线通信、认知无线电。