

文章编号:1007-5321(2018)02-0038-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-146

基于指纹数据库与同步参考信号灵活传输的小小区发现

申 滨, 雷珍珠, 徐 浪, 黄晓舸

(重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要:针对小小区间的同频干扰与用户异频扫描的能耗问题,提出一种基于到达时间(TOA)指纹数据库与同步参考信号(PSS/SSS)灵活传输的小小区发现策略.通过减少用户大量无效异频扫描次数,以达到节能的目的.同时,网络端对小小区基站(SBSs)PSS/SSS的发送进行控制,以降低小小区间PSS/SSS的同频干扰.仿真结果表明,所提方案能有效提高小小区的检测率和用户能效.

关 键 词:小小区发现;干扰抑制;指纹数据库;异频扫描

中图分类号:TN929.53

文献标志码:A

Small Cells Discovery Based on Fingerprint Database and Synchronization Reference Signals Flexible Transmission

SHEN Bin, LEI Zhen-zhu, XU Lang, HUANG Xiao-ge

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Densely deployed small cells suffer from the problem of severe co-channel interference among the neighbouring cells and user equipments (UEs) in the network are confronted with a challenge of intensive energy consumption in inter-frequency scanning (IFS). In order to deal with the problems, a time of arrival (TOA) fingerprint database based small cell discovery strategy was proposed, where the synchronization reference signals (primary synchronization signal/secondary synchronization signal, PSS/SSS) of small cells are transmitted in a flexible scheme. The proposed method achieves the purpose of energy saving for UE by tremendously reducing the number of invalid inter-frequency detection. Meanwhile, it is capable of alleviating the co-channel interference of synchronization signals among small cells through flexible control of PSS/SSS transmission. Simulation shows that the proposed method can effectively improve the probability of detecting small cells and the energy efficiency of UEs in the network.

Key words: small cells discovery; interference cancellation; fingerprint database; inter-frequency scan

与传统网络部署场景相比,密集异构网络下的小小区发现过程主要面临2个挑战:1)用户(UE, user equipment)的异频扫描(IFS, inter-frequency scanning)能耗随着网络中小小区数目的增加而急

剧增大^[1-2];2)小小区间同步信号与参考信号的严重同频干扰^[3].针对上述问题,现有的小小区发现方案主要分为灵活的用户IFS机制和提高同步参考信号(PSS/SSS, primary synchronization signal/sec-

收稿日期:2017-07-20

基金项目:国家科技重大专项项目(2016ZX03001010-004)

作者简介:申 滨(1978—),男,教授;雷珍珠(1992—),男,硕士生, E-mail:4918044322qq.com.

ondary synchronization signal) 检测性能两类. 其中, 灵活的 IFS 机制能有效地提高 UE 的 IFS 能效^[4-6], 但存在过程复杂, 信息交互量大等问题, 且未能抑制小小区间 PSS/SSS 的同频干扰. 有关提高 PSS/SSS 检测性能的小小区发现方案可有效提高小小区正确检测率^[7-8], 但存在应用局限性与频谱资源浪费等问题.

为同时解决小小区间 PSS/SSS 的同频干扰和 UE 的 IFS 能耗过高问题, 提出一种基于 TOA (time of arrival) 指纹数据库与 PSS/SSS 灵活传输的小小区发现方案. 该方案通过对每个小小区边缘覆盖区域建立 TOA 位置指纹信息数据库与指纹匹配过程, 减少 UE 大量无效的 IFS 次数, 以达到 UE 节能目的. 与此同时, 网络端对小小区基站 (SBSs, small cell base stations) 的 PSS/SSS 发送进行控制, 当存在 UE 满足 IFS 要求时, 网络端将命令相应的 SBSs 配置并发送 PSS/SSS, 反之不发送, 从而达到降低小小区间 PSS/SSS 同频干扰的目的.

1 系统模型

考虑小小区与宏小区异频部署的密集异构网络场景, 其中宏小区工作在低频段 (< 2.5 GHz), 小小区占用高频段 (> 3 GHz). 假设网络中存在 W 个小小区, 构成小小区 (亦即 SBSs) 集合 S , V 个宏小区, 构成宏小区集合 H . SBSs 随机部署在网络覆盖区域, 令 UE 集合为 U , 且 UE 在网络中的物理位置服从空间泊松点过程. UE k 在 t 时刻对应于小小区为 $S(i)$ 的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 定义为

$$Y_{k,i,t} = \frac{P_i G_{k,i}}{\sum_{j \in S_t^a \setminus i} P_j G_{k,j} + N_0 B_s} \quad (1)$$

其中: $G_{k,i}$ 为 SBS i 与 UE k 间的信道增益, S_t^a 为时刻 t 发送 PSS/SSS 的小小区集合, $S_t^a \setminus i$ 表示将集合 S_t^a 中第 i 个元素删除, N_0 为噪声功率谱密度, B_s 为小小区的带宽值. UE 完成一次 IFS 的能耗包括信道测量 (E_m) 与解码广播信号 (E_d) 所消耗的能量, 则一次 IFS 的总能耗 E_{tot} 为^[4]

$$E_{\text{tot}} = E_m + E_d \quad (2)$$

为了能很好地分析问题, 假设小小区的覆盖区域为半径为 R_s 的圆形区域. 定义 UE 位置指纹信息匹配误差限度 $\beta = 2r/v_1$, 其中: v_1 为电磁波传播速度, r 表示网络端进行指纹匹配时所能容忍的误差

范围所对应的圆形地理区域半径^[5].

2 基于 TOA 指纹数据库与同步参考信号灵活传输的小小区发现

2.1 指纹数据库的建立

利用宏小区特殊参考信号 (CRS, cell specific reference signal) 到达 UE 时间 (亦即 TOA) 构建指纹数据库, 并进行 UE 位置信息的获取. CRS 在 LTE 体系中的作用为接收信号质量测量与同步追踪, UE 可以利用其同步追踪过程提取宏小区对应 CRS 的 TOA 值. 因此, UE 可在不增加系统额外开销情况下获取 TOA 指纹信息. 根据网络部署情况, 预先建立一个空指纹数据库 F , 其包含 W 个指纹数据块, 每个指纹数据块是由一个小小区所有指纹点对应的指纹信息数据构成. 表 1 展示了指纹数据块结构, 其中, $N(3 \leq N \leq V)$ 表示作为定位参考的宏基站数目. $F\{i\}$ ($i = 1, 2, \dots, W$) 表示小小区 i 对应的指纹数据块 B_i . 每个指纹数据块分别以相应的小区 ID 进行标识, 且每个指纹数据块包含 M 条指纹信息, 分别对应 M 个指纹点. 在每个小小区边缘区域均匀地选取 M 个指纹点. 离线阶段, 在每个指纹点进行位置指纹信息测量, 将所测量的指纹信息根据指纹点所在的小区 ID, 将其保存至指纹数据相应的指纹数据块中, 进而形成一个包含 W 个指纹数据块的指纹信息数据库.

$$F = \{B_1, B_2, \dots, B_W\} \quad (3)$$

$$B_i = \{f_1, f_2, \dots, f_M\} \quad (4)$$

表 1 指纹数据块 $\text{FPb}_i(\text{ID}_i)$

f_1	f_2	...	f_M
MID 1	MID 1	...	MID 1
TOA 11	TOA 21	...	TOA M1
MID 2	MID 2	...	MID 2
TOA 12	TOA 22	...	TOA M2
\vdots	\vdots		\vdots
MID N	MID N	...	MID N
TOA 1 N	TOA 2 N	...	TOA M N

2.2 小小区发现机制

假设网络中每个 SBS 的 PSS/SSS 配置与发送均受网络端控制, 即当 SBSs 收到网络端的指令时才配置并发送 PSS/SSS; 否则不发送. SBSs 每次发送 PSS/SSS 的时长为 t_s , 其可保证 UE 完成一次小小区发现过程. UE 在位与小小区建立连接时, 以 T 为周

期进行同频检测,检测内容包括宏小区 ID 和与之相应 CRS 的 TOA 值. 令指纹数据库保存在网络端, UE 周期性地同频检测结果 f_u 上报至网络端, 并与事先建立的指纹数据库 F 进行指纹匹配, 如

$$(i^*, j^*) = \arg \min_{\substack{i \in (1, 2, \dots, W) \\ j \in (1, 2, \dots, M)}} \sqrt{\sum_{n=1}^N (f_u(n) - F\{i, j\}(n))^2} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N (f_u(n) - F\{i^*, j^*\}(n))^2} < \beta \quad (6)$$

其中: $F\{i^*, j^*\}$ 为指纹数据块 B_{i^*} 中第 j^* 条指纹, $f_u(n)$ 表示 UE 当前指纹信息第 n 个指纹特征值, $F\{i^*, j^*\}(n)$ 为指纹块 B_{i^*} 中第 j^* 条指纹的第 n 个指纹特征值.

若 $F\{i^*, j^*\}$ 满足式(6), 则意味着 f_u 与指纹数据库中的指纹项匹配成功; 反之匹配失败. 在 UE 匹配成功的情况下, 网络端根据与之匹配的指纹项所在指纹数据块 B_{i^*} 确定该 UE 当前的目标小区 ID. 接着, 网络端发送指令至相应的 SBS, 通知其配置并发送 PSS/SSS, 与此同时, 触发该 UE 进行 IFS. UE 在与小小区建立连接后将不再进行低频检测, 当 UE 与小小区断开连接时, 则继续进行低频检测与上报过程.

2.3 PSS/SSS 干扰抑制

在传统的 LTE 系统机制中, 每个 SBS 均以一定周期持续发送 PSS/SSS. 然而, 在小小区密集部署的情况下, 传统的 PSS/SSS 传输机制显然会导致小小区间 PSS/SSS 的严重同频干扰. 在所提方案中, 网络系统中所有 SBSs 的 PSS/SSS 发送均受到网络端控制, 且采用灵活的传输方式, 因此在某一时间段, 网络中只有小部分 SBSs 会同时发送 PSS/SSS. 下面对某个 UE 在同频检测周期内, 同时发送 PSS/SSS 的 SBSs 数目进行数学建模与分析.

假设 UE 的位置服从强度为 λ^u 的空间泊松点过程. 如图 1 所示, 令网络的覆盖区域为 Q_n , 面积为 $|Q_n|$. 定义小小区 b 对应的触发 UE 进行 IFS 的地

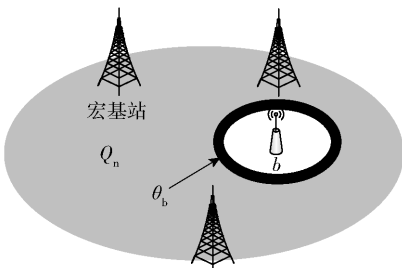


图 1 概率模型示意图

理区域为 θ_b ($\theta_b \subset Q_n, b = 1, 2, \dots, W$), 如图 1 中的黑色圆环区域. 假设 UE 位置指纹信息匹配误差控制在半径为 r 的圆内, 则 θ_b 对应的面积 $|\theta_b|$ 可近似为

$$|\theta_b| = (R_s^2 - (R_s - \sqrt{3}r)^2) \pi \quad (7)$$

其中 R_s 为小小区的覆盖半径. 令 $A(\theta_b)$ 表示位于小小区 b 边缘覆盖区域 θ_b 内的 UE 数目, 假设网络中的 UE 数目不限. 由上述分析可得, 对于任意 θ_b , $\theta_b \subset Q_n$ 有

$$A(\theta_b) \sim \text{Poisson}(\lambda^u |\theta_b|) \quad (8)$$

根据泊松点过程性质有

$$P(A(\theta_b) \geq 1) = \lambda^u |\theta_b| + o(|\theta_b|) \quad (9)$$

$$P(A(\theta_b) = \chi) = \frac{e^{-\lambda^u |\theta_b|} (\lambda^u |\theta_b|)^{\chi}}{\chi!} \quad (10)$$

其中: $P(C)$ 表示事件 C 发生的概率值大小, χ 为处于区域 θ_b 内的 UE 数目. 对任意 $\theta_b, \theta_b \subset Q_n$ 有

$$P(A(\theta_b) = 1 | A(Q_n) = 1) = \frac{|\theta_b|}{|Q_n|} \quad (11)$$

其中: $P(*|*)$ 为条件概率表达形式, $A(Q_n)$ 表示网络范围内总的 UE 数目. 证明过程如下:

$$\begin{aligned} P\left(\frac{A(\theta_b) = 1}{A(Q_n) = 1}\right) &= \frac{P(A(\theta_b) = 1, A(Q_n) = 1)}{A(Q_n) = 1} = \\ &= \frac{P(A(\theta_b) = 1, A(Q_n \setminus \theta_b) = 0)}{A(Q_n) = 1} = \\ &= \frac{e^{-\lambda^u |\theta_b|} \lambda^u |\theta_b| e^{-\lambda^u |Q_n \setminus \theta_b|}}{e^{-\lambda^u |Q_n|} \lambda^u |Q_n|} = \frac{|\theta_b|}{|Q_n|} \end{aligned} \quad (12)$$

进而可知, 在 $A(Q_n) = K$ 的情况下, 对 $A(\theta_b) = \chi$, 且 $\chi = 0, 1, 2, \dots, K$ 有

$$P\left(\frac{A(\theta_b) = \chi}{A(Q_n) = K}\right) = \binom{K}{\chi} \left(\frac{|\theta_b|}{|Q_n|}\right)^{\chi} \left(1 - \frac{|\theta_b|}{|Q_n|}\right)^{K-\chi} \quad (13)$$

其中: $\binom{\chi}{K} = C_K^{\chi} = \frac{K!}{(K-\chi)! \chi!}$. 由式(13)可得

$$\Gamma_b \sim B\left(K, \frac{|\theta_b|}{|Q_n|}\right) \quad (14)$$

其中, Γ_b 表示事件: 在 $A(Q_n) = K$ 的条件下 $A(\theta_b) = \chi$, 且 Γ_b 服从式(13)所示的二项分布. 基于上述分析, 在网络 UE 数为 K 的条件下, 对于区域 θ_b 存在 UE 的理论概率值为

$$P\left(\frac{1 \leq \chi \leq K}{A(Q_n) = K}\right) = \sum_{1 \leq \chi \leq K} \binom{K}{\chi} \left(\frac{|\theta_b|}{|Q_n|}\right)^{\chi} \left(1 - \frac{|\theta_b|}{|Q_n|}\right)^{K-\chi} \quad (15)$$

令网络中不同区域 θ_b 的面积大小均相等, 即 $|\theta_1| = |\theta_2| = \dots = |\theta_W| = D$, 则有

$$P(\Omega_1) = P(\Omega_2) = \cdots = P(\Omega_W) = P_K \quad (16)$$

$$P_K = \sum_{1 \leq \chi \leq K} \binom{\chi}{K} \left(\frac{D}{|Q_n|} \right)^\chi \left(1 - \frac{D}{|Q_n|} \right)^{K-\chi} < 1 \quad (17)$$

其中, Ω_b 表示事件:在 $A(Q_n) = K$ 的条件下,区域 θ_b 存在 UE,即 $A(\theta_b) = \chi > 0$. 由于不同小小区 b 之间对应的事件 Ω_b 是相互独立的,根据所提方案中 SBSs 的 PSS/SSS 配置与发送机制可知,在小小区数目为 W ,UE 数为 K 的条件下,某一时刻发送 PSS/SSS 的 SBSs 个数 φ 可近似为 $\varphi = P_K W < W$.

由上述分析可知,在 UE 某一同频检测周期内,所提方案中发送 PSS/SSS 的 SBSs 数小于网络中的 SBSs 总数,进而可知,所提方案能有效抑制小小区间 PSS/SSS 的同频干扰.

3 仿真验证与分析

3.1 仿真场景与参数设置

仿真场景为密集异构网络,包含 3 个宏小区,在整个网络覆盖范围内随机分布 40~180 个 SBSs. 宏小区与小小区对应的路径损耗模型分别为^[5]

$$L_1 = 128.1 + 37.6 \lg(R) \quad (18)$$

$$L_2 = 140.1 + 36.7 \lg(R) \quad (19)$$

其中: R 为收发两端的距离,单位为 km,详细的系统参数如表 2 所示^[4-5]. 根据文献[4], E_m 和 E_d 的大小设为 1.5 mJ 与 0.75 mJ,且 UE 位置指纹信息匹配误差控制在半径 $r = 5$ m 的圆内^[5].

表 2 仿真参数

参数	宏小区	小小区
站点最小间距/m	2 000	200
发送能量/dBm	46	30
阴影衰落/dB	8	8
IFS 周期/ms	80、1 000	
同频扫描周期/ms	200	
Time-To-Trigger/ms	480	
切换时延/ms	160	
发送时长(t_s)/ms	50	
指纹长度	3	
指纹匹配周期(T)/s	1	
带宽/MHz	20	
噪声密度(N_0)/(dBm·Hz ⁻¹)	-174	

3.2 性能仿真分析

为方便仿真结果的分析说明,做如下设置.

方案 1 传统的小区发现机制.

方案 2 基于 TOA 指纹数据库的小小区发现方案. 该方案利用 TOA 建立数据库,UE 在未与小小区建立有效连接时,周期性进行同频检测与上报过程,网络端通过指纹匹配过程触发 UE 进行 IFS,其中,SBSs 持续周期性发送 PSS/SSS.

方案 3 笔者所提方案.

3 种小小区发现方案对应 UE 的 IFS 能耗对比如图 2 所示.

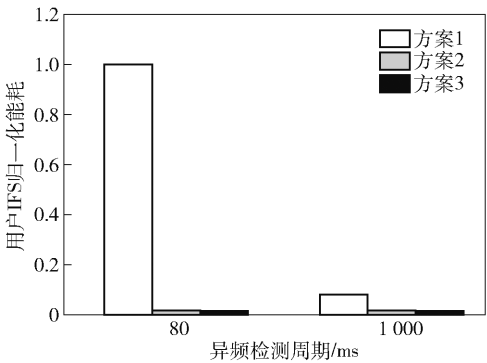


图 2 3 种小小区发现方案对应 UE 的 IFS 能耗对比

从图 2 可看出,方案 2 和方案 3 相比于方案 1 能大幅度降低 UE 的 IFS 能耗. 特别地,当 IFS 周期为 80 ms 时,方案 2 和方案 3 对应 UE 的 IFS 能耗不足方案 1 的 2%. 由图 3 可知,方案 3 中发送 PSS/SSS 的 SBSs 数目随着 UE 数目的增加而增大,且其实际统计值与理论值大小基本保持一致. 其原因在于,随着 UE 数目的增大,网络中每个 SBS 发送 PSS/SSS 的概率值 P_K 也随之增大. 从图 3 亦可看出,随着 SBSs 数目的增加,发送 PSS/SSS 的 SBSs 数目也随之增加. 从图 4 可见,随着 UE 数目的增加,网络中发送 PSS/SSS 的 SBSs 比率也随之增大,且在 UE 数目较小的情况下(< 600),网络中发送 PSS/SSS 的 SBSs 所占比例不足 50%. 由此可知,所提方

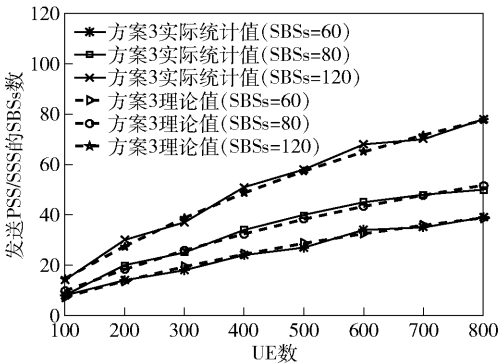


图 3 发送 PSS/SSS 的 SBSs 数

案能有效抑制小小区间 PSS/SSS 的同频干扰。

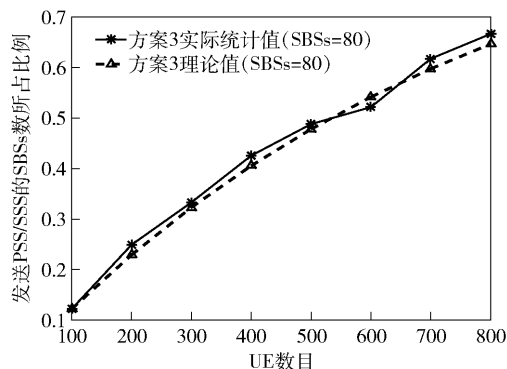


图4 发送 PSS/SSS 的 SBSs 所占比例

由图5可知,方案3在不同UE数情况下,UE对应的SINR值均高于方案2。在方案3中,由于SBSs是采用灵活的PSS/SSS传输机制,在同一时间段,只有很小部分SBSs会发送PSS/SSS,因此能有效降低小小区间的PSS/SSS干扰。相反,在方案2中,SBSs是持续周期性地发送PSS/SSS,在任意时间段内所有小小区间都会产生PSS/SSS同频干扰。图6表明,在方案2与方案3中,随着小小区数目的增加,小小区间的同频干扰会更加严重,致使UE接收PSS/SSS的SINR值均有所下降。特别地,在UE数一定的情况下,随着小小区数目的增加,方案3中发送PSS/SSS的小小区数目也随着增加,从而造成其性能有所下降。在相同小小区数目情况下,方案3对应的SINR值明显高于方案2,进而说明方案3可有效抑制小小区间PSS/SSS的干扰。

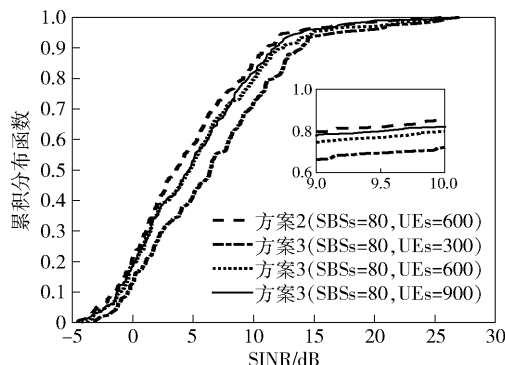


图5 小小区数目一定,UE接收PSS/SSS的SINR

由图7可知,相比于方案2,方案3能明显提高小小区的正确检测率,且在UE数较少的情况下,其优势更加明显。此外,方案3的小小区正确检测率随UE数目的增加而减小,反观方案2,其对应的小小区正确检测率与UE数目无关。因为在方案3中,

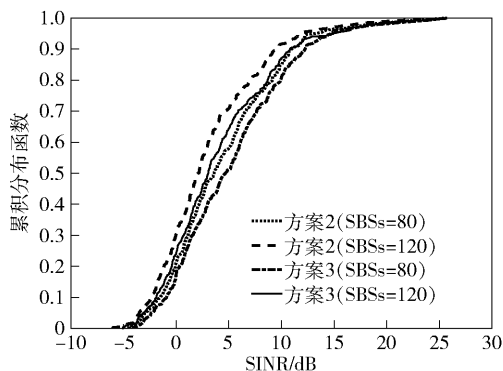


图6 网络UE数一定,UE接收PSS/SSS的SINR

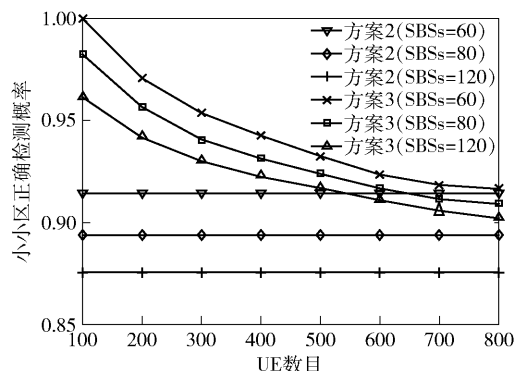


图7 小小区正确检测率与UE数的关系

随着UE数的增加,发送PSS/SSS的小小区也将随之增加,小小区间PSS/SSS的同频干扰强度变大,导致小小区的正确检测率下降。然而,在方案2中,由于每个小小区的PSS/SSS是连续发送,小小区间PSS/SSS的干扰与UE数目无关。

图8表明,在不同UE数的情况下,方案3对应的小小区正确检测率均高于方案2。其原因在于,方案3有效地抑制了小小区间PSS/SSS干扰。特别地,在方案3中,发送PSS/SSS的SBSs数目会随着小小区数目的增加而增加,进而导致小小区间PSS/SSS干扰增大。从图8亦可看出,在小小区数目较大

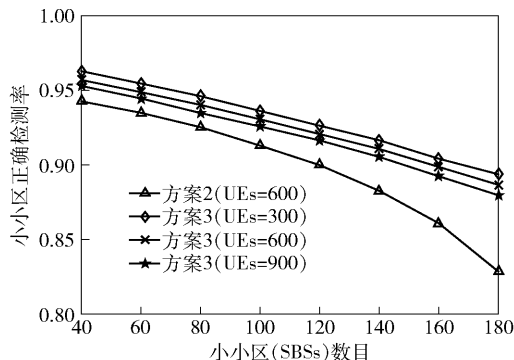


图8 小小区正确检测率与小小区数目的关系

的情况下,方案3较方案2优势更加明显。

4 结束语

为解决由小小区大量部署而带来的小小区间严重的 PSS/SSS 干扰与 UE 小小区发现能耗问题,提出一种基于 TOA 指纹数据库与 PSS/SSS 灵活传输的小小区发现方法。该方案利 TOA 位置信息来控制 UE 的 IFS 过程与 SBSs 的 PSS/SSS 发送,从而避免 UE 执行大量无效的 IFS 操作,同时降低同一时间段网络中发送 PSS/SSS 的 SBSs 数目,以达到 UE 节能与小小区间 PSS/SSS 干扰抑制的目的。仿真表明,所提方案较单纯的基于指纹数据库方案,不但能有效减少 UE 能耗,还能显著降低小小区之间的 PSS/SSS 干扰,提高小小区的正确检测率。

参考文献:

- [1] Onireti O, Imran A, Imran M A, et al. On energy efficient inter-frequency small cell discovery in heterogeneous networks[C] // 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London: IEEE, 2015: 13-18.
- [2] Onireti O, Imran A, Imran M A, et al. Energy efficient inter-frequency small cell discovery in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7122-7135.
- [3] Lopez V F, Pedersen K, Soret B, et al. Improving dense network performance through centralized scheduling and interference coordination [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(5): 4371-4382.
- [4] Hong Y T, Xu X D, Tao M L. Predictive connection time based small cell discovery strategy for LTE-advanced and beyond[C] // 2014 Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Istanbul: IEEE, 2014: 2061-2066.
- [5] Prasad A, Lunden P, Tirkkonen O, et al. Energy efficient small-cell discovery using received signal strength based radio maps[C] // Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden: IEEE, 2013: 1-5.
- [6] Mahbas A. Double spectrum small cell (DSSC) for discovering inter-frequency small cell in HetNet[C] // 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London: IEEE, 2015: 3454-3459.
- [7] Peng S, Tong E, Jiang H, et al. An improved graph coloring based small cell discovery scheme in LTE hyperdense networks[C] // Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). New Orleans: IEEE, 2015: 17-22.
- [8] Ji X, Zhang Y, Zhang Z, et al. An efficient synchronization signal design for neighboring cell search[C] // Vehicular Technology Conference. Seoul: IEEE, 2014: 1-5.