



基于 TOA 指纹数据库的小小区发现

陈杨¹, 雷珍珠², 申滨²

(1. 四川通信科研规划设计有限责任公司, 四川 成都 610000;

2. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 在小小区大量部署的网络场景下, 用户进行异频扫描所检测的载波数相比传统网络部署场景会大量增加, 因此用户能耗也会相应增加。基于此, 提出了一种基于宏小区参考信号到达时间 (TOA) 指纹数据库的小小区发现策略, 通过减少用户不必要的异频检测操作, 进而减少用户能量消耗, 以解决用户在进行小小区发现时可能存在的能耗过高问题。仿真表明, 该方案相比现有的基于参考信号接收功率 (RSSI) 指纹数据库方案, 受噪声影响程度低, 小小区发现准确率高。同时, 该方案能有效地限制处于高速移动状态的用户进行异频检测, 从而增大了用户与小小区连接的成功率。

关键词: 小小区发现; TOA; 指纹数据库; 异频检测; 能效

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017221

Small cell discovery based on TOA fingerprint database

CHEN Yang¹, LEI Zhenzhu², SHEN Bin²

1. Sichuan Communication Research and Design Co., Ltd., Chengdu 610000, China

2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In the scenario that a large number of small cells are deployed in the mobile communication network, the number of carriers to be detected by the user equipment (UE) in inter-frequency scanning is considerably larger than that in the conventional network deployment scenarios. This procedure may consume tremendous amounts of UEs' energy. In order to solve this problem, a small cell discovery (SCD) scheme based on TOA fingerprint database to alleviate intensive energy consumption was proposed when the UEs try to find their potential serving small cells. The proposed scheme reduces the energy consumption of the UE by decreasing the number of unnecessary inter-frequency detection. The simulation results verify that the proposed scheme, compared with the existing SCD strategy using received signal strength (RSSI) based radio maps, has better anti-noise performance and higher accuracy. In addition, it can effectively help the high-speed UE avoid performing inter-frequency detection, and hence increase the rate of the UE being successfully connected to the appropriate small cell.

Key words: small cell discovery, TOA, fingerprint database, inter-frequency detection, energy efficiency

收稿日期: 2017-03-23; 修回日期: 2017-07-06

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2016ZX03001010-004)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project(No.2016ZX03001010-004)



1 引言

近年来,越来越多的智能终端出现在日常生活的方方面面,并带来了各种各样的通信业务。在各种业务中,移动数据业务占绝大部分且其呈爆发式增长趋势,因此对数据速率和网络系统容量提出了更高的挑战。为解决通信速率和网络系统容量问题,业界提出了许多解决方案与新技术,如大规模 MIMO、毫米波、小小区等技术^[1-3]等。其中,小小区技术是解决系统容量和信息速率的最直接有效的方法之一,也是未来 5G 系统及网络的关键使能技术之一。通过在热点地区或业务压力较大的区域大量部署低发射功率的小小区设备,比如小基站、微基站、家庭基站或中继节点,可以实现小小区对宏基站业务的分流,提高整个网络的系统容量^[4]。

小小区的大量部署能够有效地提高系统容量和信息速率,但是也带来了诸多技术挑战,如小小区之间的干扰^[5]、小小区基站能耗问题^[6]、小小区的频繁切换以及小小区之间的协同运行等^[7]。随着小小区数量的增多,用户设备 (user equipment, UE) 在进行小小区搜索过程时,需要检测的载波数目也随之增大,这将耗费 UE 大量的能量^[8]。因此,在新型的蜂窝异构网络中,如何减少 UE 在进行小小区发现和切换过程中的能耗,是非常重要的也是非常实际的问题^[9]。近来,3GPP 对 UE 在异构网中的移动性增强非常重视,快速而有效地发现分布在不同载波的小小区,从而达到业务分流的目的,成为了小小区研究的焦点,也是急需解决的问题。为此,业界提出了许多解决方案,如基于网络辅助的小小区发现方案和新的发现信号的设计等^[10,11]。已同步的小小区以较长的周期传输含有小区标识信息的发现信号。由于 UE 在进行小区发现前已经与提供服务的小区(例如宏小区)建立了连接,所以网络可以向 UE 提供辅助信息。该方案能有效地提高 UE 小小区

发现的时效性,同时提高小小区的检测概率。发现信号的设计应实现短时间内可靠地检测出 UE 附近存在的小小区,并且应具有良好的顽健性来应对宏小区与小小区之间时间和频率的偏移。

针对用户 IFS (inter-frequency scanning, 异频扫描) 能耗问题,参考文献[12]提出了一种基于 UE 运动状态评估的小小区发现方案。当 UE 与宏基站相连时,UE 设备不进行周期性的 IFS 过程,只有当 UE 接收到来自宏基站的命令时,才进行 IFS 过程。宏基站对 UE 的运动状态进行实时估计与预测,具体监测 UE 的位置信息、到达某个小小区覆盖边缘的时间以及该 UE 将与小小区连接的时间。宏基站通过这些信息来判定该 UE 何时何地需进行 IFS 操作。该方案不但有效地减少了 UE 能耗,并且还能对 UE 移动性进行管控,避免那些高速移动的 UE 进行 IFS 操作。但是,该方案的实施过程较为复杂,且需消耗大量的信令。

在实际网络中,UE 在不同的物理位置,接收到的来自各个宏基站的信号强度一般皆有所不同,即 UE 在每个物理位置都会有一组相应的来自不同宏基站的接收信号强度与之对应。参考文献[13,14]提出了一种基于射频指纹数据库的小小区发现策略,该数据库的每条射频指纹包含多个宏小区标识及与之相对应的 UE 接收信号强度。当 UE 在进行小小区发现时,首先周期性地测量并上报所在位置的射频指纹信息,然后将测量结果与指纹数据库中的每一条指纹进行逐一匹配搜索,当测量值与指纹数据库中的某一条指纹的误差小于预先设定的范围时,UE 才进行 IFS 操作;反之,则不触发 IFS 动作。该方案有效地避免了 UE 大量的、多余无效的 IFS 操作次数,从而大大减少了 UE 的能耗。然而,该方案对噪声影响和多径衰落非常敏感,因此存在较大的小小区发现准确度问题。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于 TOA (time of arrival, 到达时间) 指纹数据库的小

小区发现方案。这里的 TOA 是指宏小区下行参考信号到达 UE 的时间（即传播时延）。由于 UE 在与小小区建立连接之前是与宏小区连接的，且期间 UE 会利用宏小区下行参考信号进行同步跟踪及 RSRP（reference signal received power，参考信号接收功率）测量等操作，因此 UE 可以利用该特性测量多个宏小区的下行参考信号 TOA。具体地，本方案利用不同宏小区下行参考信号到达 UE 的时间值建立 TOA 指纹数据库。数据库中的每条指纹包含多个宏小区 ID 及对应的下行参考信号 TOA。UE 在进行 IFS 之前，首先周期性地检测宏基站的参考信号，并将检测结果（即 UE 在当前位置上获取的 TOA 指纹）与指纹数据中的每条指纹进行匹配搜索。当且仅当 TOA 指纹匹配成功时，系统才触发 UE 的 IFS 过程。与传统方案相比，本方案能将 UE 的 IFS 动作触发区域控制在一个很小的范围，大量减少 IFS 次数，从而解决 UE 在小小区发现过程中的高能耗问题，同时还能大大提高小小区发现的有效性与准确性。相比于参考文献[13,14]的小小区发现方案，本方案具有很好的抗噪性能，即使在低信噪比环境下，也能保持良好的小小区发现性能。由于采用了宏小区

参考信号作为测量对象，本方案还保证了网络系统的前后兼容性。

2 系统模型

2.1 网络模型

考虑小小区与宏小区异频部署的蜂窝异构网，宏小区工作在低频段并提供大范围网络覆盖；小小区占用高频段，主要改善系统容量，如图 1 所示。

UE 在网络覆盖范围内活动，在宏小区边缘地带，由于信号质量差，有时不能满足通信要求；或者在热点地区，网络负载大，UE 需尽可能发现小小区并与之建立连接，从而将业务从宏小区分流到小小区。假设在网络系统中，宏小区集合为 $\mathbf{M}_l(n)(n=1,2,\dots,V)$ ，且满足： $\|\mathbf{M}_l\|_0 = V$ 。小小区集合为 $\mathbf{S}$ ，且满足： $\|\mathbf{S}\|_0 = W$ 。UE 集合为 $\mathbf{U}$ ，且有 $\|\mathbf{U}\|_0 = K$ ，这里 $\|\cdot\|_0$ 为向量的零范数。

在传统的小小区发现机制中，UE 需周期性地 IFS 异频检测，以发现小小区，UE 的 IFS 过程主要是 UE 对小小区发送的异频信号进行测量，并且该测量过程是无条件的周期进行的。实际上，在网络覆盖范围内的每个物理位置上，UE 接收到

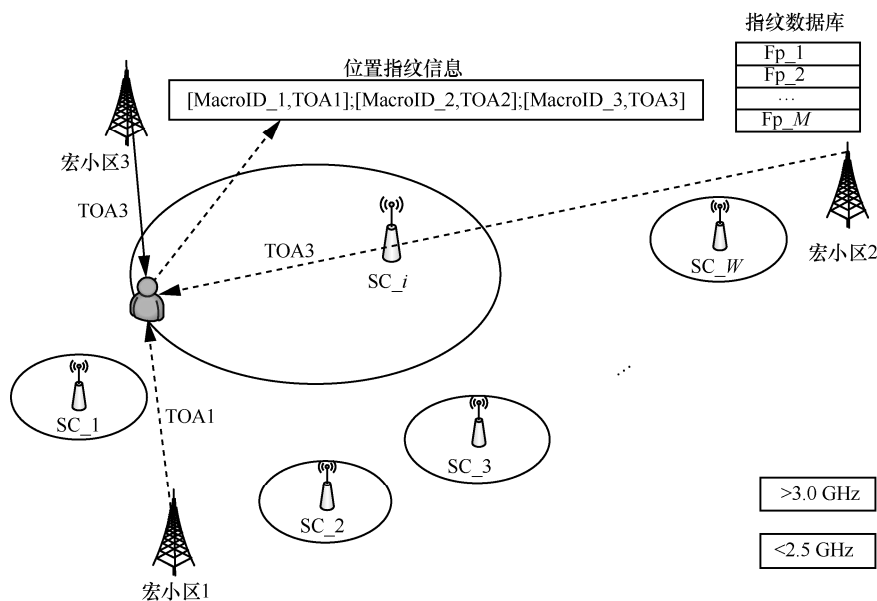


图 1 网络模型及小小区发现方案原理



不同宏基站所发送的下行参考信号 TOA 一般是不一样的, 即网络中每个物理位置都有一组由不同宏小区 (3 个以上) 下行参考信号的 TOA 形成的数据与之对应。当 UE 与宏小区相连时, 会进行周期性的同频检测, 因此可以不断地获得 UE 当前位置所对应的 TOA 指纹信息。

2.2 指纹数据库的构建

根据网络拓扑结构, 系统事先在每个小小区边缘区域均匀地选取一系列指纹点, 并在每个指纹点位置分配 UE 进行 TOA 指纹信息测量, 即测量每个指纹点对应的宏小区参考信号 TOA 以及相应的宏小区 ID, 然后根据测量结果构建初始 TOA 指纹数据库。假设在网络中, 总共选取了 M 个指纹点, 即所构建的 TOA 指纹数据库有 M 条指纹, 其中每条指纹包含 N ($3 \leq N \leq V$) 个宏小区 ID 以及与之对应的参考信号 TOA 值, 见表 1, 其中 TOA_{mn} 为第 n 个宏基站的参考信号到达第 m 个指纹点所对应物理位置的 TOA 值, 指纹数据库中每条指纹信息都对应于网络中一个指纹点位置。该指纹数据库可以保存在网络端 (宏基站), 也可以保存在 UE 端。前者由于保存在网络端, 内存与计算复杂度则不需要考虑, 但会带来较大的信令消耗; 后者由于指纹数据库保存在 UE 端, UE 可以根据测量结果自行触发 IFS 检测。

表 1 指纹数据库

指纹 1	指纹 2	...	指纹 M
macroID_11	macroID_21	...	macroID_M1
TOA_11	TOA_21	...	TOA_M1
macroID_12	macroID_22	...	macroID_M2
TOA_12	TOA_22	...	TOA_M2
...	...	...	...
macroID_1N	macroID_2N	...	macroID_MN
TOA_1N	TOA_2N	...	TOA_MN

2.3 信号模型

假设 UE k ($k \in \mathbf{U}$) 与目标小小区 $\mathbf{S}(i)$ ($i=1,2,\dots,W$) 连接, 则 UE k 接收的小小区信号 (F1 频段, 即高频段) 为:

$$y_{i,k} = \sqrt{P_i} h_{i,k} s_i + \sum_{j=1, j \neq i}^W \sqrt{P_j} h_{j,k} s_j + n_k \quad (1)$$

其中, $h_{i,k}$ 表示从第 i 个小小区基站到 UE k 的信道系数, P_i 为小小区基站 $\mathbf{S}(i)$ 的发送功率, s_i 代表小小区 $\mathbf{S}(i)$ 所发送的下行信号符号, 且满足 $E\{|s_i|^2\}=1$, n_k 是 UE k 在 F1 频段上对应的加性白高斯噪声。同样, 当 UE k 与宏基站 $\mathbf{M}_i(n)$ ($n=1,2,\dots,V$) 相连接时, 其接收信号 (F0 频段, 即低频段) 为:

$$\bar{y}_{n,k} = \sqrt{\bar{P}_n} \bar{h}_{n,k} \bar{s}_n + \sum_{m=1, m \neq n}^V \sqrt{\bar{P}_m} \bar{h}_{m,k} \bar{s}_m + \bar{n}_k \quad (2)$$

其中, $\bar{h}_{n,k}$ 表示从第 n 个宏基站到 UE k 的信道系数, $\bar{P}_n$ 为宏小区基站 $\mathbf{M}_i(n)$ 的发送功率, $\bar{s}_n$ 代表宏小区 $\mathbf{M}_i(n)$ 所发送的下行参考信号符号, $\bar{n}_k$ 是 UE k 在 F0 频段上对应的加性白高斯噪声。UE k 在某个时刻 t 与小小区或宏小区相连接时的接收信号信干噪比 (SINR) 分别为:

$$\text{SINR}_{i,k,t} = \frac{P_i G_{i,k}}{\sum_{j \in \mathbf{S}/i} P_j G_{j,k} + N_0 B_1} \quad (3)$$

$$\overline{\text{SINR}}_{n,k,t} = \frac{\bar{P}_n \bar{G}_{n,k}}{\sum_{m \in \mathbf{M}_i/n} \bar{P}_m \bar{G}_{m,k} + N_0 \bar{B}_0} \quad (4)$$

其中, $\bar{G}_{n,k} = |\bar{h}_{n,k}|^2$ 与 $G_{i,k} = |h_{i,k}|^2$ 分别为 UE k

与宏基站 $\mathbf{M}_i(n)$ 和小小区基站 $\mathbf{S}(i)$ 之间的信道功率增益, B_1 与 B_0 分别为小小区与宏小区的系统带宽, N_0 为高斯白噪声单边功率谱密度, $\mathbf{M}_i/n$ 表示将集合 $\mathbf{M}_i$ 中的元素 n 删除。较高的 SINR 值是基于 RSSI 指纹数据库的小小区发现方案的重要实现条件。

假设 IFS 消耗的能量包括信道测量能量 (E_{meas}) 与解码广播信号消耗的能量 (E_{decode}), 则单次 IFS 检测的总能耗为^[13]:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{meas}} + E_{\text{decode}} \quad (5)$$

2.4 参考信号测量模型

由于宏小区是利用同步卫星来获取时钟同步

的,因此宏小区之间拥有精准的时钟同步。UE 利用本地产生的参考信号与接收到的宏小区下行参考信号进行相关运算,计算出对应宏基站的参考信号 TOA,如式(6):

$$R(l) = \left| \sum_{l_1=1}^{L_1} \bar{y}_{n,k}(l+l_1) \cdot r_{\text{local}}(l_1) \right|^2 \quad (6)$$

当 $R(l)$ 取到最大值时即可获得符号定时位置,如式(7)。其中, $\bar{y}_{n,k} = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_{L_2}]$ 为 UE 接收到的宏小区下行参考信号, $\bar{y}_{n,k}(l+l_1)$ 为 $\bar{y}_{n,k}$ 时间滑动后的第 l_1 个元素, $r_{\text{local}} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{L_1}]$ 为本地生成的参考信号(即 UE 本地产生的模板信号), $r_{\text{local}}(l_1)$ 为 r_{local} 第 l_1 个元素, L_1 与 L_2 分别为本地参考信号及接收信号长度(一般为一个帧的长度), η 为宏小区下行信号采样频率, $\tilde{l}$ 为 $\bar{y}_{n,k}$ 与 r_{local} 相关运算峰值所在位置的时间索引(即信号由宏基站传播到 UE 所经过的采样周期数), T_c 为系统的采样周期, T_{arrive} 为宏小区参考信号到达 UE 的时间测量结果(即 TOA 测量结果)。

$$\tilde{l} = \arg \max_l (R(l)) \quad (7)$$

本文对比分析了 CRS 与小区 PRS (position reference signal, 定位参考信号) 作为 TOA 测量参考信号时的 TOA 测量性能,其中, CRS 在 LTE 系统中用于同步追踪与 RSRP 测量, PRS 则用于定位。图 2 为两种参考信号对应的测量误差大小概率分布曲线对比,本文将 TOA 测量值转换为 UE 与宏基站之间的距离,从而将 TOA 测量误差转换为 UE 与宏基站之间的距离测量误差。从图 2 中可以看出, PRS 对应的测量误差集中在 10~40 m, 反观 CRS, 其测量误差则集中在 0~3 m, 因此 CRS 的测量精度较高。本文选取 CRS 作为 TOA 测量目标信号的原因在于, 用户可以利用其同步追踪过程提取宏小区对应的 CRS-TOA, 即 TOA 值, 因此, UE 可在不增加系统额外开销的情况下获取 TOA 指纹信息, 且 CRS 相比于 PRS 的 TOA 测量精度高。

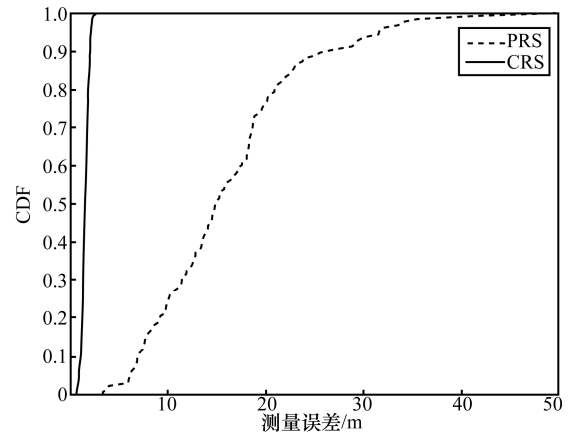


图2 两种参考信号对应的测量误差大小概率分布曲线对比

由式(8)可知,宏小区下行信号采样频率对 CRS 到达 UE 时间的测量精度影响较大,信号的采样频率越高,意味着系统带宽越宽。图 3 给出了 UE 在不同系统带宽下的 TOA 测量误差大小概率分布曲线,从图 3 中可以看出,下行链路对应的资源块数目(num of downlink resource block, NDLRB)值越大,即系统带宽越宽,测量误差值越小(即精度越高)。

$$T_{\text{arrive}} = \tilde{l} / \eta = \tilde{l} T_c \quad (8)$$

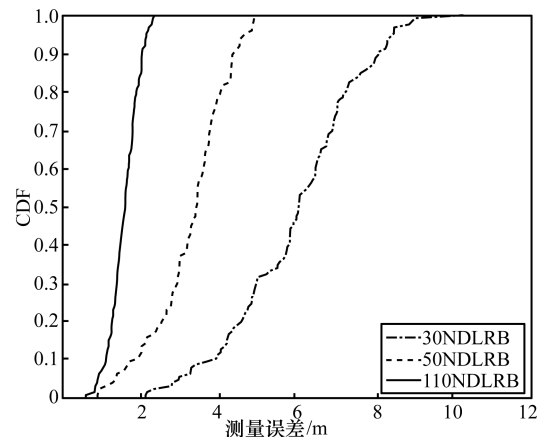


图3 UE 在不同系统带宽下的 TOA 测量误差大小概率分布曲线

3 基于 TOA 指纹的小小区发现方案

3.1 小小区发现机制

基于 TOA 指纹数据库的小小区发现方案,其出发点是减少 UE 不必要的 IFS 检测,以达到 UE 节能的目的。UE 在与宏小区连接时,会周

得说明的是,式(10)中 TOA 指纹匹配误差范围 β 的设置是实际设计中十分重要的问题,合适的指纹匹配误差范围能有效避免高速移动的 UE 进行无益的 IFS 检测,从而提高 UE 小小区发现的有效性。

3.2 UE 移动状态下的 IFS 触发控制

假设指纹匹配周期为 T_s , UE 移动速度为 v ,如图 4 所示,用半径为 r 的小圆表示网络端进行指纹匹配时所能容忍的误差范围^[13],半径 r 与匹配误差门限 β 的关系如式(11)所示,其中 v_L 为电磁波传播速度。当半径 r 满足式(12)时,则能有效地避免速度为 v 以上的 UE 进行异频检测:

$$\beta = 2r / v_L \quad (11)$$

$$v \cdot T_s > 2r \quad (12)$$

之所以避免处于中高速移动状态的 UE 进行 IFS 检测,是因为 UE 在中高速移动时停留在小小区覆盖范围内的时间一般较短(与小小区建立连接的时间不能满足分流业务要求),或者即使 UE 进行了 IFS 检测,也往往没有足够的时间切换到小小区。当 UE 处于小小区覆盖范围之外时,UE 在 IFS 检测后不能发现小小区;反之,当 UE 处于小小区覆盖区域内时,UE 进行 IFS 检测后并且成功发现小小区,但与小小区连接时间不满足预设时间门限值(<10 s),一般都视为无效的 IFS 检测^[12],这两种场景的 IFS 检测对于 UE 来说是无益的,并且白白浪费了 UE 在 IFS 过程中消耗的能量。因此,合理设定指纹数据库匹配误差范围,能有效地减少大量无效的 IFS 检测次数,规避处于中高速移动状态的 UE 进行 IFS 检测,提高小小区业务切换的有效性。

4 仿真分析

4.1 仿真场景

仿真实验场景设定为某个蜂窝异构网,包含 3 个宏小区($\|M_i\|_0 = V = N=3$),在宏小区覆盖范

围内随机分布 40 个小小区($\|S\|_0 = W=3$),其中,小小区与宏小区分别异频部署在 F1 和 F0 频段。UE 以一定的速度在网络中做定向移动,当到达网络边界时,则按原来路线折返并继续运动。仿真时间为 8 000 s,即 UE 在网络中移动的时间,该时长能保证 UE 在仿真网络范围内至少来回两次。路径损耗模型为^[15]:

$$L_M = 128.1 + 37.6 \lg R \quad (13)$$

$$L_S = 140.1 + 36.7 \lg R \quad (14)$$

其中, L_M 为宏基站与 UE 之间的路径损耗, L_S 为小小区与 UE 之间的路径损耗, R 为收发两端的距离,单位为 km。详细的仿真参数见表 2^[16]。

表 2 仿真参数

参数	宏小区	小小区
发送功率/dBm	46	30
站点间最小距离/m	3 000	150
IFS 周期(T_{inter})/ms	80、1 000	
同频扫描周期/ms	200	
触发时间/ms	480	
切换时延/ms	160	
UE 速度/(km·h ⁻¹)	5~80	
指纹长度	3	
指纹匹配周期/s	1	
系统带宽/MHz	20	
快衰落模型	ITU Vehicular A(6 tap)	

根据参考文献[17],设定 UE 信道测量和解码的能耗分别为: $E_{\text{meas}}=1.5$ mJ 与 $E_{\text{decode}}=0.75$ mJ。当 UE 发送至网络端的 TOA 测量结果与指纹数据库中的指纹匹配成功时,则 UE 进行 IFS 检测,检测周期为 T_{inter} 单位为 ms。在整个过程中,如果 UE 成功地发现小小区,则进行小小区切换过程;如果 UE 没有成功发现小小区(未能成功匹配或 IFS 过程无效),则在 T_{inter} 后停止异频检测。为与参考文献[13]保持一致,本文将 UE 指纹信息检测误差(或匹配误差)控制在半径 $r=5$ m 的圆内。



4.2 对比方案

以下对 3 种小小区发现方案进行性能对比与分析。

方案一：传统的小小区发现方案。当 UE 与宏小区连接时，无论是否处于小小区覆盖范围，均以固定的周期进行 IFS 检测。

方案二：基于 RSSI 指纹数据库的小小区发现方案^[11,12]。该方案利用 RSSI 建立指纹数据库，UE 在与宏小区连接时，周期性地同频检测，并将检测到的宏小区 ID 以及与之相对应的 RSSI 数据发送至网络端，进行指纹匹配搜索，一旦匹配成功，则触发 UE 进行 IFS 检测。

方案三（本文方案）：基于 TOA 指纹数据库的小小区发现方案。利用宏小区下行参考信号到

达 UE 的时间建立 TOA 指纹数据库，UE 周期性地同频检测，并将检测到的宏小区 ID 以及与之相应的 CRS-TOA 发送至网络端，进行指纹匹配搜索。如果匹配成功，则触发 UE 进行 IFS。

4.3 性能分析

基于 TOA 指纹数据库的小小区发现方案实质上是一种基于地理位置信息的方案，网络端在 UE 无线定位的基础上决定是否触发 UE 的 IFS 操作。基于 TOA 或 TDOA 及 RSSI 的无线定位技术，都已经非常成熟，从精度上来说，基于 TDOA 或 TOA 的定位技术精度更高^[18,19]。图 6 为基于 RSSI 与 TOA 两种方案在不同信噪比下 UE 位置信息测量精度的对比。

从图 6 中可以看出，基于 RSSI 的测量精度受

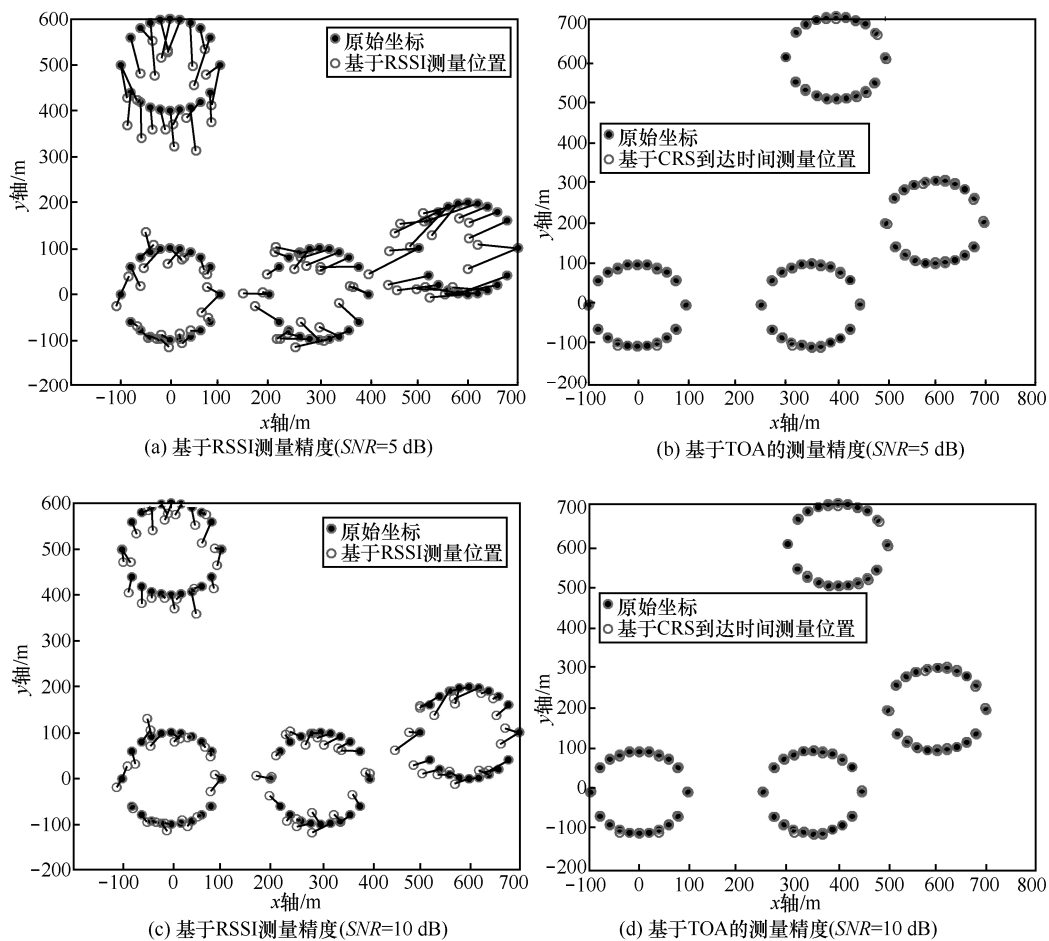


图 6 基于 RSSI 与 TOA 两种方案在不同信噪比下 UE 位置信息测量精度的对比

高斯加性白噪声的影响较大。当 $SNR=5$ dB 时, 其测量误差已达到 100 m, 无法满足有效的小小区发现的误差要求, 其中, SNR 的定义如下:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\bar{P}_n}{N_0 \bar{B}_0} \right) (\text{dB}) \quad (15)$$

相反, 基于 CRS-TOA 的测量精度, 受噪声影响较小, 在 $SNR=5$ dB 时, 能保持较高的精度。UE 位置测量精度直接决定 UE 小小区发现的准确性, 即位置测量精度越高, UE 小小区发现的准确率越高。图 7 为两种测量方法在不同信噪比下测量准确率的对比 (假设测量误差在 8 m 以内可视为准确的测量)。从图 7 中可以明显看出, 基于 CRS-TOA 的 UE 位置测量精度高, 且受噪声影响小, 稳定性高。

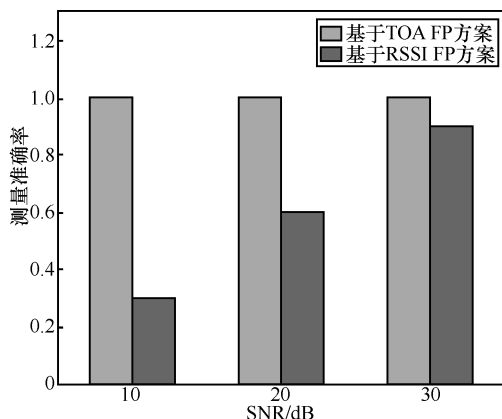


图7 基于CRS与RSSI的测量准确度对比

图8为RSSI FP方案与TOA FP方案在不同信噪比条件下, UE以固定的速度 (10 km/h) 移动时, 其归一化有效异频检测 (即有效IFS) 次数变化曲线, 其中, 有效异频检测是指UE经过异频检测过程能成功完成小小区发现。从图8中可以看出, 基于RSSI指纹数据库的方案随着信噪比的降低, UE有效IFS次数急剧下降, 在 $SNR=16$ dB 时, 归一化有效IFS检测次数只有0.56左右, 这表明此时小小区正确检测概率只有0.56左右。由此说明基于RSSI指纹数据库方案在低信噪比环境下, 由于定位精度受噪声影

响, 误差较大, UE很难触发有效的IFS操作以发现小小区。相反, 基于CRS-TOA的小小区发现方案, 由于受噪声影响小, 定位精度在低信噪比下较高, 有效IFS检测次数随噪声变化小, 趋于平稳。即使在低信噪比环境下, 本文方案仍能保持很好的性能。

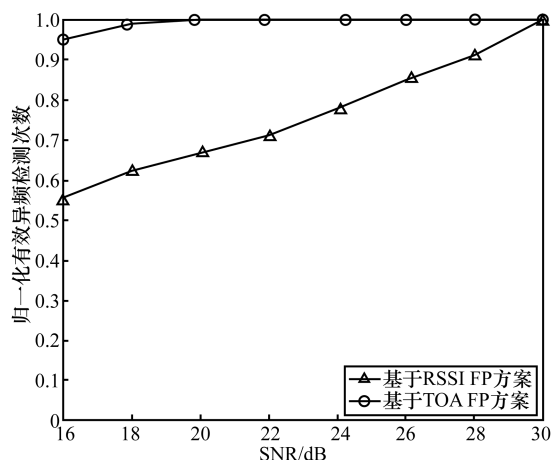


图8 有效异频检测次数随信噪比变化 (UE速度: 10 km/h)

图9为3种方案的UE能耗对比 ($SNR=30$ dB), 图9中对比了传统用户IFS机制在IFS周期为80 ms与1000 ms两种情况下与RSSI FP方案、TOA FP方案对应的用户归一化IFS能耗大小。从图9中可以看出, 基于RSSI指纹数据库与基于TOA指纹数据库的小小区发现方案, 相比于传统IFS机制可大量节省UE的IFS能耗, 且当传统IFS周期为80 ms ($T_{\text{inter}}=80$ ms) 的情况下, RSSI FP方案与TOA FP方案对应的用户IFS能耗小于传统用户IFS机制的2%。因为在传统小小区发现过程中用户是无条件地进行周期性IFS过程, 相反, 在RSSI FP方案与TOA FP方案中, 只有当指纹数据匹配成功时, 才触发用户IFS过程, 从而将IFS检测控制在很小的网络区域内, 从而减少大量不必要的用户IFS次数, 以达到为UE节能的目的。

图10为RSSI FP方案与TOA FP方案在高信噪比环境下 ($SNR=30$ dB), UE归一化IFS次数随UE移动速度变化曲线。从图10中可以看出, 两种方案的IFS检测次数随着UE移动

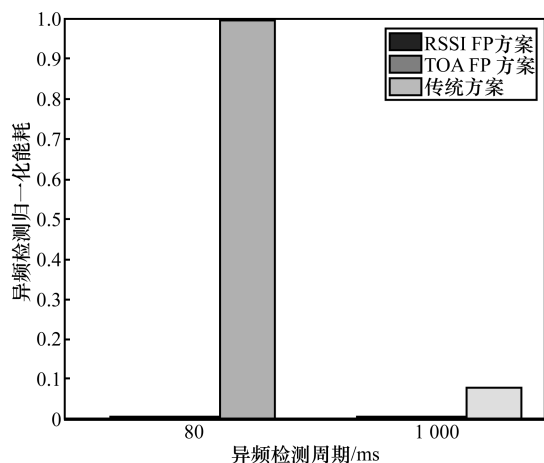


图9 UE 异频检测能耗对比 (SNR=30 dB)

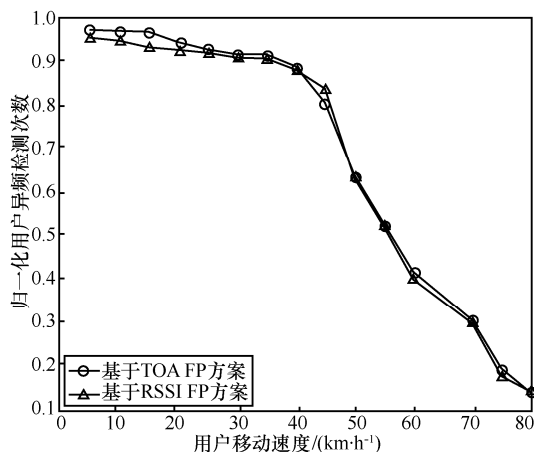


图10 异频检测次数随 UE 移动速度变化曲线 (SNR=30 dB)

速度的提高呈下降趋势, 且变化趋势基本保持一致, 且当 UE 速度大于 40 km/h 时, 两种方案中用户 IFS 次数急剧下降。这说明两种小小区发现方案均能有效限制高速移动的 UE 进行 IFS 过程, 并且在高信噪比环境下, 两种方案的小小区发现性能相当。图 11 为本文方案在有多径衰落与无多径衰落两种情况下, UE 归一化有效 IFS 检测对比。从图 11 中可以看出, 有多径衰落场景相比于无多径衰落场景, 小小区发现性能有轻微下降, 这说明衰落条件下的有效 IFS 检测次数比无多径衰落情况有所下降。由此, 可验证本文方案即使在有多径衰落的环境下能保证较高的小小区有效检测率, 适用于复杂多变的实际场景。

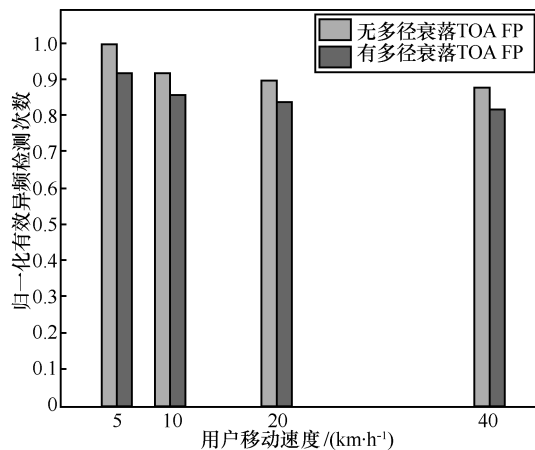


图11 有无多径衰落情况下 UE 有效 IFS 次数大小对比

从上述仿真结果与分析可得, 基于 TOA 指纹数据库的小小区发现方案, 相比于传统的小小区发现方案, 能大量减少 UE 的能耗 (>98%), 同时能有效地避免高速移动 UE 进行 IFS 检测, 从而提高小小区发现的有效性。基于 RSSI 指纹数据库的小小区方案, 由于其对噪声非常敏感, 在低信噪比环境下, UE 无法精准测量不同宏基站下行信号的 RSSI, 因此该方案不能有效地进行小小区发现。本文提出的基于 CRS-TOA 的小小区发现方案, 通过测量不同宏小区下行参考信号到每个小小区边缘位置的 TOA, 建立 TOA 指纹数据库。由于 TOA 的测量对噪声敏感度较低, 即使在低信噪比环境下, 也能保持较高的测量精度, 从而使得 UE 能有效地进行小小区发现。

5 结束语

提出一种基于宏小区参考信号 TOA 指纹数据库方案, 以解决由于小小区大量部署而带来的小小区发现过程中的 UE 能耗问题。该方案与传统的小小区发现方案相比, 不但能节省大量的 IFS 检测所带来的 UE 能量消耗, 而且还能有效地限制高速移动 UE 进行 IFS 检测, 进而提高 UE 进行 IFS 检测的有效性。相对于 RSSI 指纹数据的小小区发现方案, TOA 指纹方案有更好的抗噪性能, 即使在低信噪比或存在多径衰落的场景下, 仍然

有较好的 IFS 检测性能, 该方案可以作为小小区发现的高效实现方案之一。

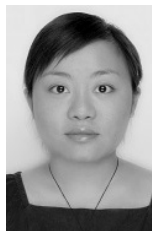
参考文献:

- [1] BOGALE T E, LE L B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless hetnet: potential benefits and challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(1): 64-75.
- [2] 毕奇, 梁林, 杨姗, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 20-27.
BI Q, LIANG L, YANG S, et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 20-27.
- [3] 杨峰义, 张建敏, 谢伟良, 等. 5G 蜂窝网络架构分析[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 52-62.
YANG F Y, ZHANG J M, XIE W L, et al. Analysis of 5G cellular network architecture[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 52-62.
- [4] ONIRETI O, ZOHA A, MOYSEN J, et al. A cell outage management framework for dense heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2097-2113.
- [5] LAN Y Y, CHIUEH T D. Turbo receiver with dual-loop dual-list update for inter-cell interference mitigation in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2288-2299.
- [6] ONIRETI O, IMRAN A, IMRAN M A, et al. On energy efficient inter-frequency small cell discovery in heterogeneous networks[C]//IEEE International Conference on Communications, June 8-12, 2015, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015: 13-18.
- [7] SUN S, GAO Q, PENG Y, et al. Interference management through CoMP in 3GPP LTE-advanced networks[J]. Wireless Communications IEEE, 2013, 20(1): 59-66.
- [8] PRASAD A, LUNDEN P, TIRKKONEN O, et al. Energy-efficient flexible inter-frequency scanning mechanism for enhanced small cell discovery[C]//Vehicular Technology Conference, June 2-5, 2013, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [9] PRASAD A, TIRKKONEN O, LUNDEN P, et al. Energy-efficient inter-frequency small cell discovery techniques for LTE-advanced heterogeneous network deployments[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5): 72-81.
- [10] HARADA H, NAGATA S, KISHIYAMA Y, et al. Efficient small cell discovery mechanism exploiting network synchronization and assistance for future radio access networks[C]//International Symposium on Wireless Communications Systems, August 26-29, 2014, Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2014: 675-679.
- [11] 3GPP. NTT DoCoMo, performance evaluation for small cell discovery[S]. 2013.
- [12] HONG Y, XU X, TAO M. Predictive connection time based small cell discovery strategy for LTE-advanced and beyond[C]//Wireless Communications and Networking Conference, April

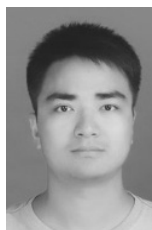
6-9, 2014, Istanbul, Turkey. New Jersey: IEEE Press, 2014: 2061-2066.

- [13] PRASAD A, LUNDEN P, TIRKKONEN O, et al. Energy efficient small-cell discovery using received signal strength based radio maps[C]//Vehicular Technology Conference, June 2-5, 2013, Dresden, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [14] PRASAD A, LUNDEN P, TIRKKONEN O, et al. Enhanced small cell discovery in heterogeneous networks using optimized RF fingerprints[C]//2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 8-11, 2013, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2013: 2973-2977.
- [15] 3GPP. Further advancements of E-UTRA: physical layer aspects:TS36.814[S]. 2009.
- [16] 3GPP. E-UTRA: mobility enhancements in heterogeneous networks:TR36.839[S]. 2012.
- [17] Nokia Siemens Networks, Nokia Corporation. Small cell detection in HeNet environment: R2-116151[S]. 2011.
- [18] GUVENC I, CHONG C C. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3): 107-124.
- [19] MARTIN R K, VELOTTA J S, RAQUET J F. Bandwidth efficient cooperative TDOA computation for multicarrier signals of opportunity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2311-2322.

[作者简介]



陈杨 (1982-), 女, 四川通信科研规划设计有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信技术。



雷珍珠 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为 LTE-Hi 系统及密集蜂窝异构网络。



申滨 (1978-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为 LTE 系统和认知无线电等。