



一种基于多天线簇的新型 LTE 室内定位系统

吕亚娟¹, 刘珊², 胡荣贻², 张文浩²

(1. 吉林医药学院计算机系, 吉林 长春 132013;

2. 中国联合网络通信有限公司网络技术研究院, 北京 100084)

摘要: 随着移动互联网业务的迅速发展, 位置服务需求越来越多样化, 定位技术也变得越来越重要。LTE (long term evolution) 室内蜂窝网络可以解决 GPS (global positioning system) 信号无法进入室内的问题, 从而提供高精度的位置服务。LTE 室内定位需要不同基站之间进行精确同步, 这给室内网络部署带来了新的挑战。针对上述问题, 提出了一种基于多天线簇的 LTE 新型无线定位系统, 通过上行探测参考信号 (sounding reference signal, SRS) 获取信号到达时间差 (time difference of arrival, TDOA)。该方法不需要簇间同步, 可有效降低网络部署难度。其次, 针对此系统设计了一种新的 TDOA 定位算法, 可支持灵活的天线簇配置。最后, 通过仿真及实验验证了该定位系统及算法的有效性, 实验结果表明可实现米级室内定位精度。

关键词: LTE; 室内定位; SRS; TDOA

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017037

A novel LTE indoor location system based on multiple antenna clusters

LV Yajuan¹, LIU Shan², HU Rongyi², ZHANG Wenhao²

1. Computer Science Department of Jilin Medical College, Changchun 132013, China

2. Network Research Institute of China Unicom, Beijing 100084, China

Abstract: With the rapid development of mobile internet services, demands of location service are becoming more diversified, then the location technologies become the key to satisfy the requirements. Long term evolution (LTE) indoor networks can solve the problem that GPS (global positioning system) signal can't arrive in indoor and provide high precision location service. However, LTE indoor location system need high precision synchronization among different base stations, and this is a new challenge for indoor network deployment. To solve the problem, a new LTE wireless location system based on multiple antenna clusters was proposed. The system could get TDOA (time difference of arrival) through uplink SRS (sounding reference signal) and it didn't need synchronization between different clusters which reduced the difficulty of network deployment. Then, a new location algorithm was designed which could support flexible antenna configuration. Finally, simulations and experimental measurements were given to verify the efficiency of the system and algorithm. Results show that meter indoor location accuracy can be realized.

Key words: LTE, indoor location, SRS, TDOA

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2016YFB0502000)

Foundation Item: The National Key Research and Development Plan (No.2016YFB0502000)

1 引言

随着移动互联网的迅速发展,无线定位技术逐渐引起了网络运营商的关注。一方面,用户的位置信息能够协助网络优化及故障检测;另一方面,基于用户位置信息的业务运营和商业应用已经成为热点^[1]。目前,LTE网络已在全球范围内部署^[4],基本实现室内外连续覆盖。在室外,GPS已经能做到较精准的定位,但由于GPS信号无法进入室内而使其在室内定位领域仍存在局限性^[5]。因此,研究基于LTE网络的室内定位技术就显得尤为必要^[6]。

现有的LTE定位技术主要包括小区ID定位^[7]、OTDOA(observed time difference of arrival,到达时间差定位)^[8]等,定位精度较低且需要在终端计算相关参数,增加了终端的功耗。本文提出了一种基于LTE的探测定位方法,采用SRS(sounding reference signal,探测参考信号)作为定位参考信号,通过在基站侧增加定位单元以及部署天线簇来得到用户上行到达时间差,从而实现较高精度的定位。首先,通过仿真分析了SRS在不同工作模式及采样速率下的信号相关性能,评估了其作为定位检测信号的有效性,并且提出了增强定位精度的信号处理方法。然后,设计了一种新的TDOA定位算法,可有效支持基于多天线簇的LTE室内定位系统,实现灵活的天线簇配置。最后,仿真分析了天线簇数量及目标用户位置对定位精度的影响,并且通过在实验室搭建原型系统验证了定位性能,实验案例显示可实现3 m内的定位精度。

2 系统模型

LTE定位系统模型如图1所示,主要由天线簇、无线定位模块及位置服务器3部分组成。不妨假设该系统共有 M ($M \in \mathbb{N}$)个天线簇,天线簇 m ($m=1,2,\dots,M$)由 N_m ($N_m \in \mathbb{N}$, $N_m \geq 2$)个天线组成,每个天线簇配备一个无线定位模块,负责处理来自相应天线簇的上行SRS,完成射频前端信号处理及TDOA计算。位置服务器用于收集来自 M 个无线定位模块的定位参数,包括上行到达时间差(uplink-time difference of arrival,U-TDOA)等,通过所提定位算法获取用户位置,并完成用户位置信息的存储与更新。

图2给出了定位系统的功能实现流程。首先,无线定位模块对天线簇接收的上行信号进行射频前端处理得到多用户基带模拟信号,再经过A/D转换得到多用户基带数字信号,借助从基站获取的多用户SRS的配置信息,实现

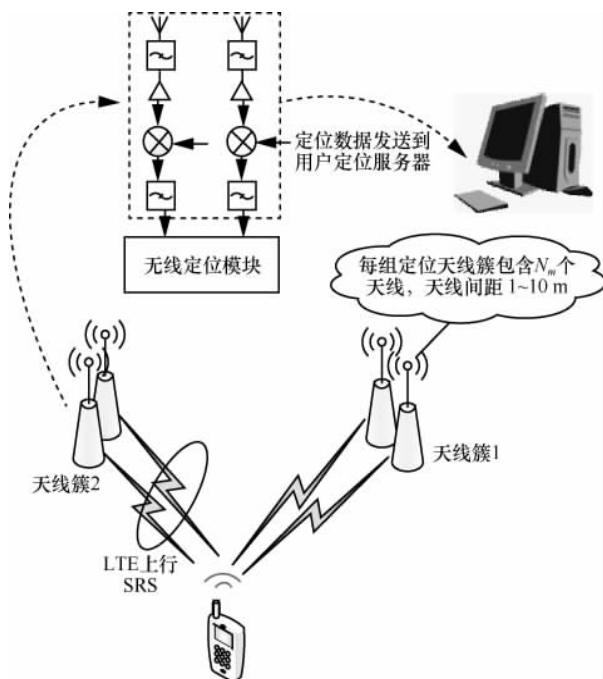


图1 LTE定位系统模型

单用户SRS的提取。将不同天线接收到的单用户时域信号与本地信号相关,得到信号到达不同天线的时间差(time difference of arrival,TDOA)、天线位置和相应的TDOA作为无线定位算法的输入参数,应用所提定位算法即可实现对用户的定位。用户位置信息通过有线/无线传输链路回传到用户位置信息服务器上,并且需要对用户位置信息数据库进行周期性(或触发性)更新。

3 LTE网络中SRS的相关性

SRS是LTE网络中的参考信号,一般用于上行链路的信道质量检测。eNode B发送srs-ConfigIndex信令通知终端待传输SRS的信号周期,周期值可选集为{2 ms,5 ms,10 ms,20 ms,40 ms,80 ms,160 ms,320 ms}^[9],终端则会根据配置参数在某个确定时隙的最后一个符号上发送SRS。该信号由ZC(Zadoff-Chu)序列产生,具有良好的自/互相关特性。

通过仿真评估LTE网络中SRS的相关性能。该仿真根据3GPP标准将待发送的SRS以及用户业务数据混合映射到一个LTE子帧中,由终端发送给网络。eNode B接收到上行时域信号并将其转化到频域,然后将接收信号和本地SRS进行相关运算。由于SRS良好的自相关特性,可获取较明显的相关峰。通过相关峰位置计算得到TDOA值。仿真信道模型为加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise,AWGN)信道,基带采样速率为30.72 MHz。

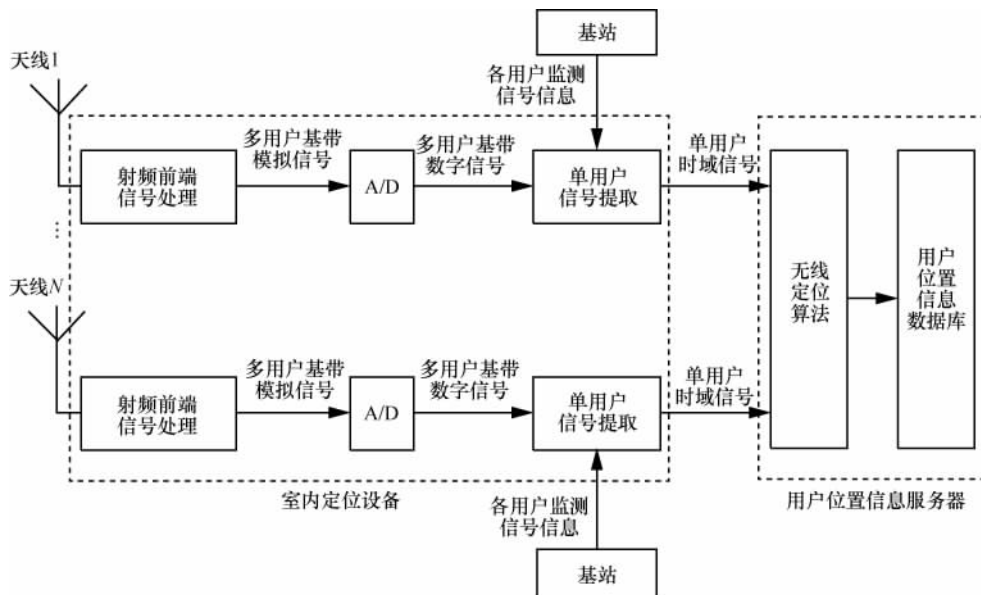


图 2 LTE 定位系统的功能实现流程

在 3GPP 标准中, LTE 的 SRS 有两种工作模式: 时分发送和码分发送^[10]。不同模式下 SRS 的相关运算仿真结果如图 3 所示。在时分模式(图 3(a))中, 最大相关峰较容易提取, 来自其他终端的信号不会对其造成明显干扰; 然而在码分模式(图 3(b))中, SRS 相关峰之间间距相对较近, 约为 410 ns, 且副峰与最大峰峰值大小接近, 因而难以提取相关峰位置信息。这里可以通过时间提前量(time advance, TA)辅助实现相关峰提取^[11], 也就是说, 基站将用户终端的 TA 信息发送给无线定位模块, 该模块可根据 TA 参数值缩小峰值检测的时间范围。当 $TA < 410$ ns 时, 该方法可有效提取相关峰。

LTE 的采样速率为 30.72 MHz, 按照该速率采样后的相关运算结果, 其定位精度最高只能达到 9 m 左右, 无法满足高精度定位要求。本文使用过采样方法, 得到更多的样本点, 缩小样本点之间的时间差, 获取更高的定位精度。图 4 仿真了 SRS 在默认采样率 30.72 MHz 以及过采样情况下的相关性能, 仿真结果表明, 过采样得到的相关曲线更加平滑, 能够提高所得峰值时间的精确性。实际上, 过采样并不能够获取更多的信息熵, 因为 30.72 MHz 的采样速率已经满足奈奎斯特采样定理, 这里只是通过增加样本点密集度来提高时间差的分辨率。

4 定位算法

假设此定位系统中每个天线簇有 N_m 个天线, x 是待估计终端的位置, $\|x - x_n\|$ 表示天线 n 和 MT 之间的真实距

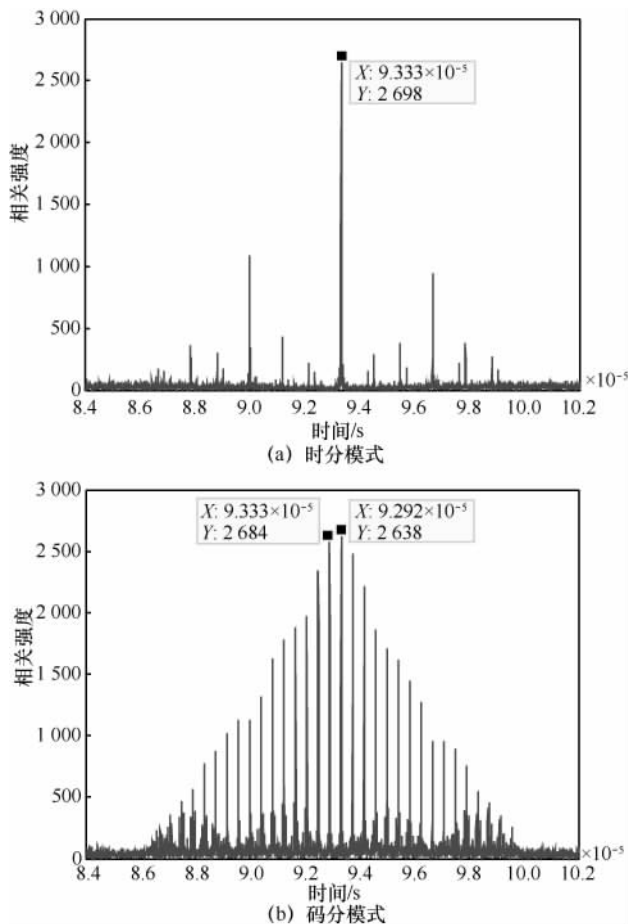


图 3 SRS 在时分和码分模式下的相关性能

离, $n=1, 2, \dots, N_m$ 。选取天线 1 作为锚点, 天线 n 和天线 1 之间真实距离差可以表示为 $h_n(x) = \|x - x_n\| - \|x - x_1\|$, 每簇

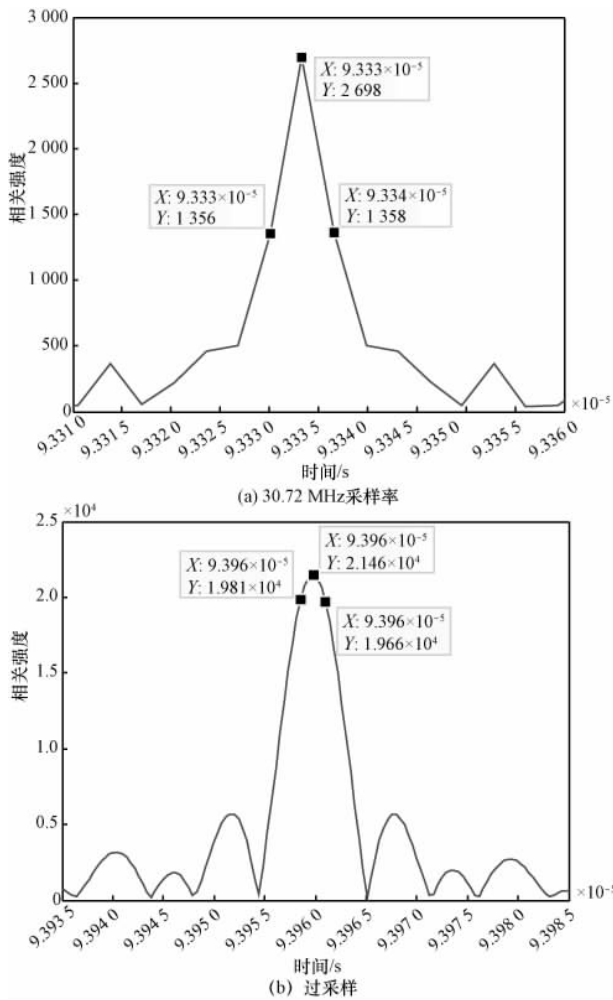


图4 SRS在非过采样及过采样情况下的相关性

天线内距离差则可表示为 $h(x)=[h_2(x), \dots, h_{N_m}(x)]^T$, 其中 $[\cdot]^T$ 代表转置运算。测量距离差矩阵 r 如式(1)所示, 其中 ε 是服从正态分布 $(0, \delta_n^2)$ 的测量误差^[12]。

$$r=h(x)+e \quad (1)$$

将 $h(x)$ 在初始点 x_0 进行一阶泰勒展开近似, 如式(2)所示。其中 H_0 是 $h(x)$ 在点 x_0 处的 Jacobian 矩阵。

$$h(x) \approx h(x_0) + H_0^*(x-x_0) \quad (2)$$

因此, 式(1)能够表达为:

$$r=y+h(x_0)-H_0x_0, \quad y=H_0x+e \quad (3)$$

其中, y 是 r 的线性估计, x 能够通过非线性最小二乘迭代算法来求得^[12-15], 如式(4), 其中 R 是 ε 的协方差矩阵, $(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵逆运算。

$$\hat{x}=(H_0^T R_1^{-1} H_0)^{-1} H_0^T R_1^{-1} y \quad (4)$$

若定位系统存在 M 个天线簇, 可以将 M 个天线簇得到的信息合并通过式(4)计算 MT 的位置, 式(4)中的参数

y, H_0, ε 则分别替换为:

$$y' = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}, H'_0 = \begin{bmatrix} H_{01} \\ H_{02} \\ \vdots \\ H_{0M} \end{bmatrix}, \varepsilon' = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

该定位算法可灵活适用于单簇到多簇天线的定位。对于多簇接收天线的情况, 实际上可以做进一步的算法优化研究, 比如剔除明显错误或坏的 TDOA 值、选取合理的参考天线等^[16]。这将在很大程度上降低冗余信息对算法迭代性能的影响, 提高算法的计算效率。同时, 该算法不需要基站间的高精度同步。定位系统中若要达到 3 m 的定位精度, 至少需要纳秒级同步, 这会给硬件实现及网络部署带来较大挑战。该算法可有效支持多天线簇定位系统, 只需实现小范围的簇内同步, 能够大幅度降低实际布网难度。

5 仿真与实验

5.1 仿真分析

本文通过仿真以及实验验证了所提系统及算法的有效性。首先, 定位系统的仿真场景为长 4.5 m、宽 2 m 的室内环境, 共部署 A、B 两簇天线, 簇 A 包含 4 个天线, 簇 B 包含 2 个天线, 天线簇的位置及用户位置如图 5 所示。假设每根天线的测量误差服从独立同分布, $\varepsilon \sim N(0, \delta_n^2)$ 。不同终端的 SRS 采用时分工作模式, 信号采样率设置为 2 倍过采样。基于上述仿真场景, 通过两组仿真分别分析了天线簇数目和用户位置对定位性能的影响。

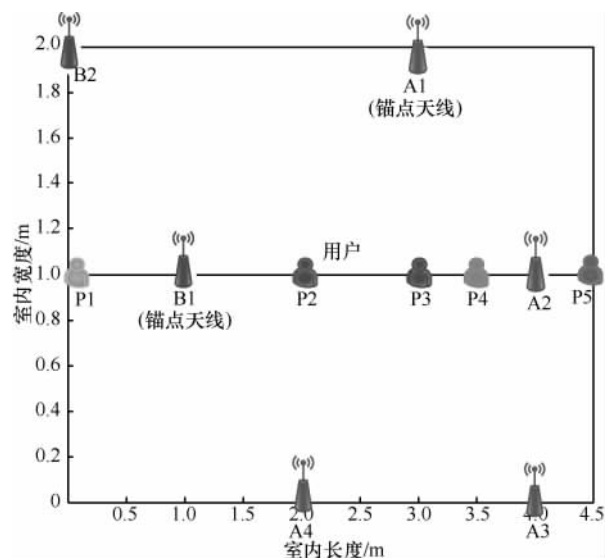


图5 定位仿真场景

首先评估不同天线簇数目对于定位性能的影响,这里假设用户随机分布。单天线簇(簇A包括4根天线)和双天线簇(簇A和簇B)的定位性能对比如图6所示。从图6中可以看出,双天线簇平均定位误差约为0.2 m,而单天线簇的定位误差平均约为0.28 m。相对于单天线簇,双天线簇的定位精度可提高20% ($\delta^2=1$)~25% ($\delta^2=10$)。

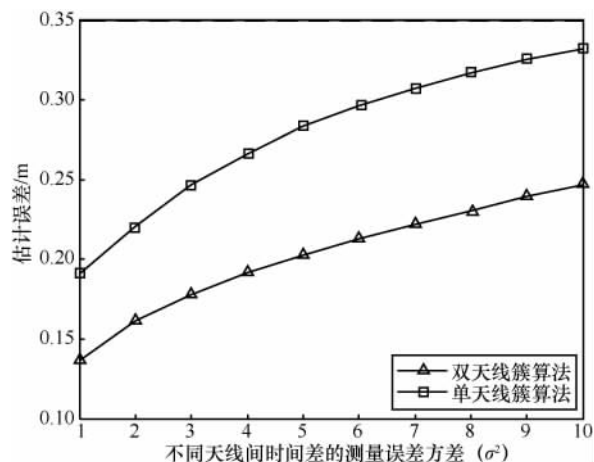


图6 单天线簇与双天线簇定位性能比较

然后评估用户位置对定位精度的影响。用户在天线覆盖区域内沿着特定轨迹点{P1(0,1), P2(2,1), P3(3,1), P4(3.5,1), P5(4.5,1)}移动,图7给出了用户在不同位置时定位误差。仿真结果表明,当用户处于天线簇中心位置{P3(3,1), P4(3.5,1)}时,定位精度要优于其他区域,误差只有0.06 m;而当用户移动到天线覆盖的边缘位置{P1(0,1)}时,定位误差明显增大,平均误差约为0.32 m。可见,定位性能与天线分布及目标用户位置密切相关。在实际系统中,建议尽量加大簇内天线间距,且使天线簇有效覆盖热点区域。

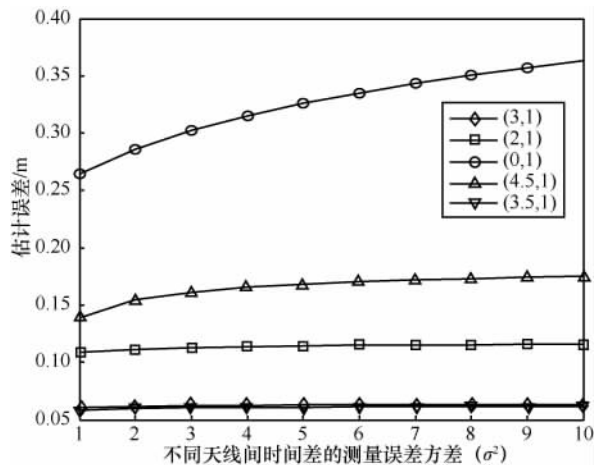


图7 不同区域内用户定位性能比较

5.2 实验验证

实验环境为阶梯会议室(长12.2 m、宽17 m、高3.8 m),会议室部署两簇天线,如图8所示。选择10个定位目标点,对每个点做多次重复独立测量,多次测量值聚合计算得到最终定位结果,测试结果如图9所示。图9中五角星圆心表示目标点实际位置,圆的半径为3 m,图9(a)中圆点表示50次重复独立测量得到的定位结果,图9(b)中圆点表示最终定位结果。表1对定位结果进行了统计分析,可见,单次测量定位误差小于3 m的概率约为80%,最终定位结果的最大误差为3 m,最小误差为0.47 m,平均误差为1.30 m。由于真实环境的复杂性,信号的传播可能受到多径等因素影响,实验室测试误差相对较大,但均在3 m以内,可以满足室内高精度定位的基本需求。



(a) 天线簇1

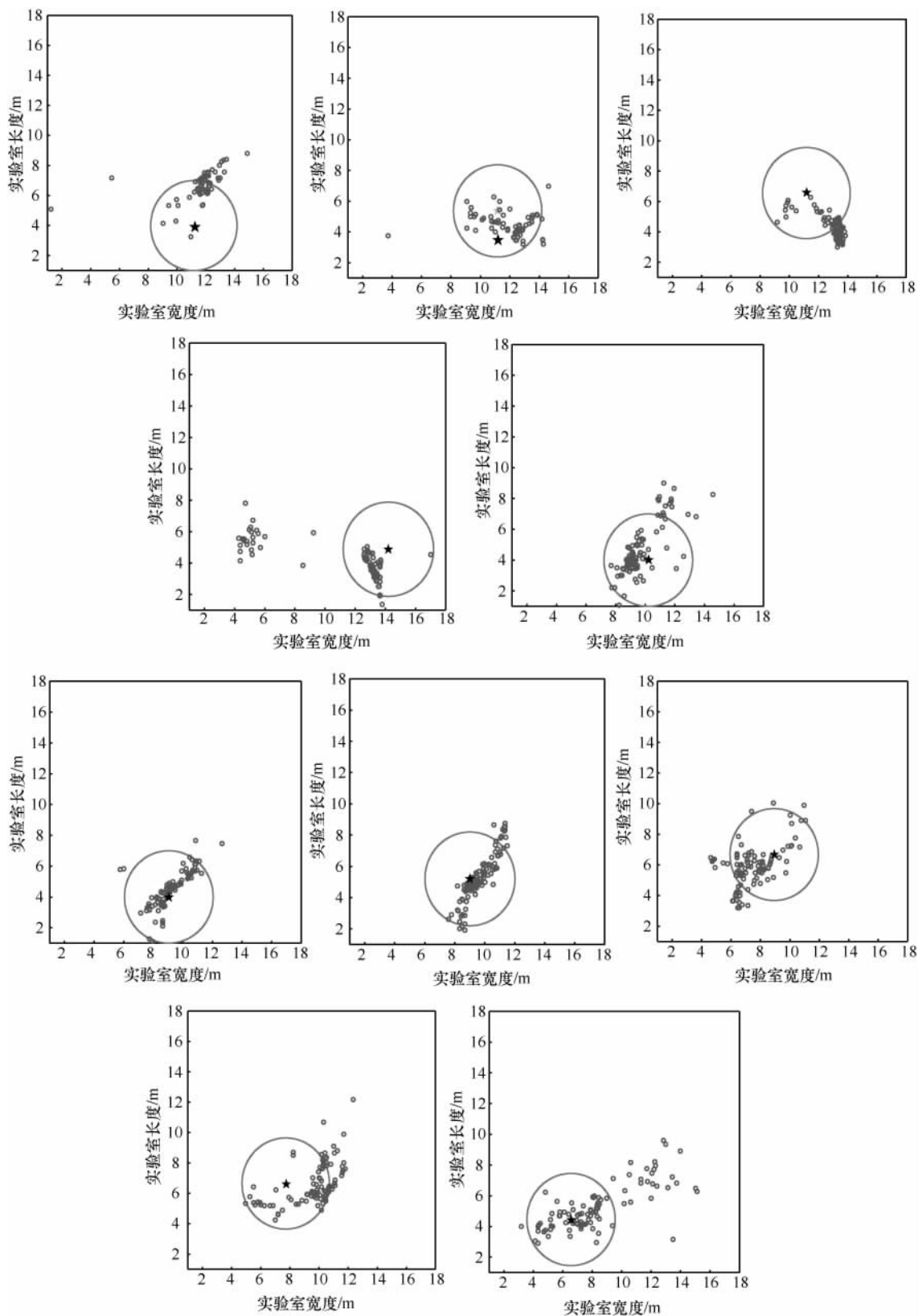


(b) 天线簇2

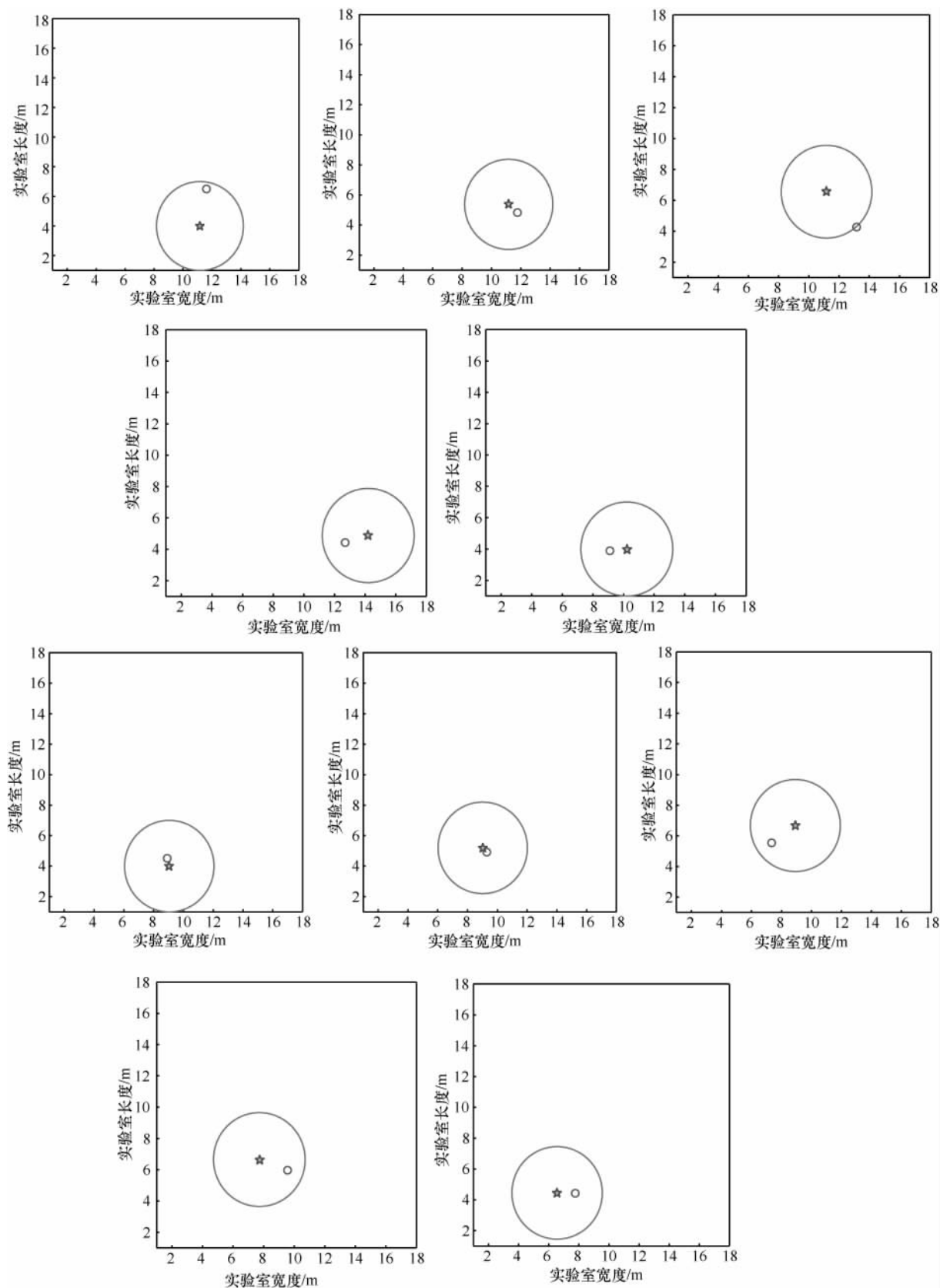
图8 阶梯会议室测试场景

6 结束语

本文提出了一种基于LTE网络的新型室内定位系统,并在实验室搭建了原型进行性能验证,该系统不要求基站间精确同步,且在基站侧处理数据相对降低了终端能耗,所提TDOA定位算法可支持灵活的天线簇配置。该系统实现的基本原理是利用LTE上行SRS作为探测信号,通过



(a) 多次测量结果



(b) 最终定位结果

图9 定点测试多次测量结果



表 1 测试结果统计分析数据

编号	< 2 m	< 3 m	< 4 m	最终定位误差/m
1	14.8%	58.6%	87.9%	2.50
2	69.1%	85.3%	92.7%	0.86
3	26.4%	77.0%	100%	3.00
4	59.4%	67.0%	72.5%	1.60
5	69.7%	85.4%	95.5%	1.10
6	85.4%	95.8%	100%	0.47
7	72.0%	88.0%	100%	0.53
8	49.5%	83.8%	95.0%	1.90
9	27.0%	80.0%	96.0%	1.90
10	61.2%	72.5%	80.0%	1.20
均值	53.5%	79.3%	92.0%	1.30

对接收信号射频前端处理、TDOA 计算及定位算法得到终端位置,实现用户的高精度定位。仿真及实验结果表明,该系统可达到 3 m 内的定位精度,同时能够大幅度降低网络部署难度。实际网络部署时需要运营商给定位单元提供相关参数,如 SRS 配置、带宽等,再通过合理的天线部署及天线簇划分,实现较好的用户定位性能。

参考文献:

- [1] DU Y, YANG D, XIAO D. The impact of LPNs on positioning technology in LTE-A systems [C]//The 2013 16th International Conference on Network-Based Information Systems, Sept 4-6, 2013, Gwangju, Korea. New Jersey: IEEE Press, 2013: 559-564.
- [2] 邓中亮, 余彦培, 袁协, 等. 室内定位现状与发展趋势研究[J]. 中国通信, 2013, 10(3): 50-53.
DENG Z L, YU Y P, YUAN X, et al. Situation and development tendency of indoor positioning[J]. China Communications, 2013, 10(3): 50-63.
- [3] 娄路. 面向移动 LBS 的智能手机室内定位技术探讨[J]. 电信科学, 2012, 28(6): 98-103.
LOU L. An approach of active indoor positioning using smartphone for mobile LBS [J]. Telecommunications Science, 2012, 28(6): 98-103.
- [4] SU W, LIU Q, LI Y Q, et al. Small cell deployment and smart cooperation scheme in dual-layer wireless networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014(4): 1-7.
- [5] ZHANG T, XIAO D, CUI J, et al. A novel OTDOA positioning

- scheme in Heterogeneous LTE-Advanced systems[C]// 2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC), Sept 21-23, 2012, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2012: 106-110.
- [6] 3GPP. UE positioning in E-UTRAN, version 12.0.0, release 12: TS36.305[S]. 2013.
 - [7] 万家欢, 庄春华, 陈秀万, 等. 基于线性加权的 Cell-ID 定位方法[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2012, 48(6): 913-917.
WAN J H, ZHUANG C H, CHEN X W, et al. Cell-ID positioning method based on linear weight[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(6): 913-917.
 - [8] 赵军辉, 赵聪, 束锋. LTE 系统中采用干扰消除技术的 TDOA 定位方法[J]. 高技术通讯(中文), 2012, 22(6): 566-570.
ZHAO J H, ZHAO C, SHU F. A TDOA location scheme using interference cancellation in LTE systems[J]. Chinese High Technology Letters(Chinese), 2012, 22(6): 566-570.
 - [9] SESIA S, TOUFIK I, BAKER M. LTE-the UMTS long term evolution [M]. Buckinghamshire: John Wiley & Sons Ltd., 2011: 337-339.
 - [10] KIM W, LEE J, LEE G. The interior-point method for an optimal treatment of bias in trilateration location[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2006, 55(4): 1291-1301.
 - [11] YE R, LIU H. UWB TDOA localization system: Receiver configuration analysis [C]// 2010 International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE), Sept 16-19, 2010, Nanjing, China. New Jersey: IEEE Press, 2010(1): 1-4.
 - [12] GHOLAMI M, GEZICI S, STROM E. A concave-convex procedure for TDOA based positioning[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(4): 765-768.
 - [13] CHOI K H, RA W S, PARK S Y, et al. Robust least squares approach to passive target localization using ultrasonic receiver array[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1993-2002.
 - [14] YANG K, AN J, BU X, et al. Constrained total least-squares location algorithm using time-difference-of-arrival measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59 (3): 1558-1562.
 - [15] QIAO T, ZHANG Y, LIU H. Nonlinear expectation maximization estimator for TDOA localization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 637-640.
 - [16] YE R, LIU H. UWB TDOA localization system: receiver configuration analysis [C]// 2010 International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE), Sept 16-19, 2010, Nanjing, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-4.

[作者简介]



吕亚娟(1982-),女,吉林医药学院计算机系讲师,主要研究方向为数据挖掘。



胡荣贻(1990-),男,中国联通网络通信有限公司网络技术研究院工程师,主要研究方向为无线移动通信技术、室内高精度定位系统研发等。



刘珊(1991-),女,中国联通网络通信有限公司网络技术研究院工程师,主要研究方向为无线移动通信技术、室内高精度定位技术等。



张文浩(1989-),男,中国联通网络通信有限公司网络技术研究院工程师,主要研究方向为无线通信技术、室内高精度定位技术等。