

基于 Alamouti 编码的移动台无线定位方法

陈驰宇,解培中,李 汀

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:基于移动台位置的服务已经广泛融入人们的生活。目前基站定位主要作为 GPS 定位的补充,然而在低信噪比环境下,基站定位方法受信道影响具有较大定位误差。为了充分利用 LTE 系统中基站发送端多天线特点,提升定位精度,文中提出了一种基于 Alamouti 空时编码技术的 OFDM-MIMO 系统的移动台定位方案。首先给出了通用的无线定位系统模型及定位算法,其次研究了 Alamouti 编码译码过程及其对无线定位系统性能的影响,最后通过仿真,与传统 OFDM 系统定位方案进行性能对比。结果表明,较传统定位方案,基于 Alamouti 编码的移动台无线定位方法可以在低信噪比环境下显著降低定位参考信号误码率,提升定位系统性能。

关键词:Alamouti 空时编码;广义互相关算法;时延估计;无线定位

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)03-0135-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.03.032

Wireless Location Method for Mobile Station Based on Alamouti Coding

CHEN Chi-yu, XIE Pei-zhong, LI Ting

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The service based on mobile station location has been widely integrated into people's lives. At present, the base station location is mainly used as a supplement to the GPS position, but in the low SNR environment, the base station location method has a large positioning error. In order to make full use of the multi antenna characteristics of base station in LTE system and improve the positioning accuracy, a mobile station positioning scheme with Alamouti space time encoding technology on OFDM-MIMO system is proposed in this paper. It first gives a general model of wireless positioning system and positioning algorithm, followed by the study of the Alamouti decoding process and its impact on the wireless positioning system performance, finally through simulation, this scheme is compared with the traditional OFDM system positioning scheme on performance. The results show that compared with the traditional positioning scheme, the mobile station based on Alamouti encoding can significantly reduce the bit error rate and improve the performance of the positioning system in low SNR environment.

Key words: Alamouti space-time coding; generalized cross correlation algorithm; time delay estimation; wireless localization

1 概 述

随着无线通信业务的蓬勃发展,基于移动台位置的服务(LBS),如微信摇一摇、滴滴打车、高德地图等手机应用也越来越多,LBS 逐渐成为人们日常生活、出行的一部分。无线定位的精度决定了 LBS 的服务质量,逐步提高的定位精度促进了 LBS 的更广泛应用。目前三大运营商相继推出了 4G 网络,中国已经有了比较完备的 LTE 产业链。随着基站数目的增多,移动

终端的智能化,运营商所能提供的定位精度以及用户对无线定位业务的要求都在提高。

到达时延差(TDOA)定位法具有定位精度高和移动台与基站同步要求低的特点,被广泛应用。文中提出的基于 Alamouti 编码的移动台无线定位方法同样以 TDOA 定位法为基础。无线定位精度主要受时延估计精度的影响^[1],因而目前对于无线定位技术的研究多集中在提高时延估计精度上。针对时延估计问

收稿日期:2015-06-01

修回日期:2015-09-03

网络出版时间:2016-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271236)

作者简介:陈驰宇(1990-),男,硕士研究生,研究方向为无线定位技术;解培中,博士,副教授,研究生导师,研究方向为电子系统和无线通信中的信号处理。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160218.1619.016.html>

题,文献[2]提出了两步求解法。在粗时延估计时,为提高定位速度,首先对频域采样信号以保护间隔长度 N_{cp} 滑动相关,找出时延估计初始点 t_1 ,然后在时域上以 $t_1 - N_{cp}$ 作为起点,以单个采样点做滑动相关,最终找到整数倍采样点时延估计;针对精时延估计,运用 0.618 插值法获得小数倍采样点的时延,提高采样精度。文献[3]针对 LTE 系统下行链路信号多径衰落严重的情况,提出了一种基于信噪比门限值获取首达路径的算法,并在此基础上针对首达路径衰落严重的情况,提出一种基于信噪比门限和标准峰值的选择性门限定位法。文献[4]提出了一种数据融合方案,综合考虑 TDOA、TOA、AOA、RSS 的测量结果,运用最小均方误差原则为不同测量结果分配权重,对测量结果进行优化。文献[5]提出一种基于 MIMO 技术的时延估计算法,利用多天线技术降低信号传输过程中的误码率,提升信号的互相关性,在低信噪比情况下优化无线定位系统性能。

针对尺寸较小、能耗要求高的手机终端设备,文中提出一种基于 Alamouti 编码的无线定位方案。该方案采用双发单收模式,发射端对 OFDM 调制信号进行 Alamouti 编码,接收端采用最大比合并译码、OFDM 解调获得定位参考信号;通过对两路基站到达信号互相关运算提取到达时延差;最后通过 Chan 算法获取移动台位置信息。

仿真表明,在低信噪比情况下,采用 Alamouti 编码可以较大程度地优化定位参考信号的互相关特性,提升定位精度。

2 相关工作

2.1 定位参考信号模型

一个 TDOA 信号由两路定位参考信号 (PRS) 通过相关运算获得。PRS 针对 OFDM 系统设计,对发射方和接收方均已知,无线定位系统利用这段信号进行相关操作,获取到达时延差值,得到两基站距离移动台的位置差。

小区定位参考信号存在于所有的下行链路帧结构上,由一到四根天线发送^[6]。其定义如下:

$$X_l^{p,b}(k) = s_{l,n_l}(m') \quad (1)$$

式中: X 为小区定位参考信号; s 为 QPSK 调制的 31 位 GOLD 序列; p 为天线端口号; b 为基站号; k 为载波序号; m 和 m' 为 GOLD 序列的标号; l 为小于 n_s 的 OFDM 信号数。

通过快速傅里叶变换可以将定位参考信号转化到时域:

$$x_l^{p,b}(n) = \text{IFFT}[X_l^{p,b}(k)] =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_l^{p,b}(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} kn\right) \quad (2)$$

则接收端获得的对于基站的接收信号为:

$$r_l^b = \sum_{p=0}^{N_b} h_l^{p,b} * x_l^{p,b} \quad (3)$$

式中: $h_l^{p,b}$ 表示基站 b 的 p 天线信道衰落系数; $N_b + 1$ 为基站 b 的天线数。

目前关于无线定位的文章多为单输入单输出,即 $N_b = 0$,没有充分利用发送端的多天线,造成资源的浪费。通过 Alamouti 编码可以对发送端进行多天线分集,利用发送端的多天线特性,获得信噪比增益,提升无线定位系统的性能。

2.2 无线定位误差原因

无线定位系统的误差由多方面原因产生,包括非视距传输、多径传输、多址干扰等^[7]。多径传输对基于时间的定位系统 (TOA、TDOA) 有很大影响,即使定位基站和移动台间存在 LOS 路径,它也会导致时延估计误差。传统时延估计大多是通过互相关提取时间参数,当接收信号处于同一个码片内时,如果次达信号强度大于首达信号,相关时延估计法提取的可能是次达信号时延。多径传输问题的解决方法很多,主要包括高分辨率频谱估计^[8]和最小均方估计;非视距传输 (NLOS) 是指发射信号经过反射和衍射传输以大于直射路径的传播距离到达接收端,通常发生在室内环境 (如墙壁家具阻挡) 或建筑物密集的室外环境 (如城市地区)。NLOS 传播获得的时延会附加一个正的偏差,在 GSM 典型系统中的定位误差达到 400 ~ 700 m^[9]。针对 NLOS 误差的解决方法主要是通过先验信息对 NLOS 信号进行 LOS 重构或者在定位算法中降低 NLOS 信号的权值;多址干扰存在于所有的小区通信系统中。CDMA 小区中,用户通过使用不同的传播码字共用相同频段,远近效应十分明显。不同移动台收到的服务信号以不同的强度传输,导致近端用户信号更加难以恢复,在无线定位中同样会导致近端时延估计误差较大。

因而在实际的通信环境下,对于 M 个基站参与的 K 个定位时刻, t_i 时刻基站到移动台之间的测量距离 $R_m(t_i)$ 为:

$$R_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i) + \text{NLOS}_m(t_i) \quad (4)$$

式中: $m = 1, 2, \dots, M$; $i = 1, 2, \dots, K$; $L_m(t_i)$ 为基站和移动台的真实距离; $n_m(t_i)$ 为标准测量误差,服从 $N(\mu, \sigma)$, 通常取零均值高斯分布; $\text{NLOS}_m(t_i)$ 为正均值非视距误差,在不同的信道环境下可能服从均匀分布、指数分布或 Delta 分布。

由式 (4) 知,定位误差集中在 $n_m(t_i)$ 和 $\text{NLOS}_m(t_i)$ 上。 $n_m(t_i)$ 受信道环境影响,非视距环境

下 $NLOS_m(t_i)$ 通常远大于 $n_m(t_i)$, $n_m(t_i)$ 相对于 $NLOS_m(t_i)$ 可忽略,因而目前对移动台无线定位技术大都集中在抑制非视距误差上^[10-12]。然而在信噪比较小,信道环境较差的情况下 $n_m(t_i)$ 幅值增加,通常对定位影响较大而无法忽略^[13-14]。针对这种情况,文中提出了一种基于 Alamouti 编码的无线定位算法。基站发射源对定位参考信号采用双天线 Alamouti 编码,移动台接收端通过最大比合并译码获得定位参考信号,充分利用基站多天线资源,获得信噪比增益,降低定位误差。

3 Alamouti 编码与时延估计

3.1 定位参考信号的 Alamouti 编码

发射端天线分集,利用不同天线发送信号所具备的相关性为无线传输系统提供了额外的信号传输副本,提升系统带宽和信号传输质量。将该方案应用于无线定位系统则可以降低定位参考信号的传输误码率,减弱发送序列的频域畸变,提升时延估计精度,改善定位性能。

两个连续信号 x_1 和 x_2 按以下空时码字矩阵编码:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设信道增益在连续的两个信号传输周期内不变,那么接收信号在连续的两个信号周期可以表示为:

$$\begin{cases} r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \\ r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2 \end{cases} \quad (6)$$

合并接收端收到的信号,则:

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = h_1^* r_1 + h_2^* r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_1 + h_1^* n_1 + h_2^* n_2^* \\ \tilde{x}_2 = h_2^* r_1 - h_1^* r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_2 + h_2^* n_1 - h_1^* n_2^* \end{cases} \quad (7)$$

其中, h_1, h_2 为信道增益,可以通过信道估计求出。

对 \tilde{x}_1 和 \tilde{x}_2 进行最大似然译码,可以获得定位参考信号。与未编码方案相比,两发一收的 Alamouti 编码方案虽然未产生编码增益,但 $|h_1|^2 + |h_2|^2$ 保证了空间分集增益为 2,在相同的误码率下降低了对信噪比的要求,适用于低信噪比的情况^[15-16]。

图 1 为文中提出的 Alamouti 编码系统框图。

该方案结合了 OFDM 与多天线技术,通过 OFDM 调制降低信道频率选择性衰落,并运用发射天线空间分集减轻衰落,提高链路可靠性,优化系统定位性能。

文中提出的编码方案针对下行链路无线定位,对于上行链路无线定位方案,该编码同样有效。移动台发射端采用单发模式,基站接收端由于不需要考虑计

算复杂度,可以采用四根接收天线,在获得更高的分集增益的同时也获得了多天线增益。由于上行链路无线定位发射源为手机,考虑到辐射发热等因素发射功率通常较低,接收端获得信噪比较低的情况下,其对定位性能的提升更加明显。

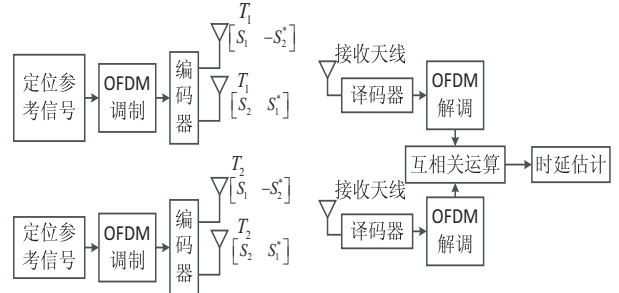


图 1 Alamouti 编码框图

3.2 时延参量提取

TDOA 定位模型又称双曲线定位模型,若两基站到达移动台时延差值为 τ ,则移动台位于到两基站距离差为 $c * \tau$ 的双曲线轨迹上。两组或两组以上的双曲线组的交点即为移动台的位置,若交点不惟一可运用最小均方误差求值,或通过几何法取舍。TDOA 信号为两基站到达移动台的时延差,不涉及移动台时间参数,因而与 TOA 定位方案相比,TDOA 定位方案对时间同步要求较低,更容易实现。

移动台接收信号为:

$$r_l = \sum_{b=0}^{N_r} r_l^b = \sum_{b=0}^{N_r} \sum_{p=0}^1 h_l^{p,b} * x_l^{p,b} \quad (8)$$

其中, $N_r + 1$ 表示参与定位的基站数。

利用 $h_l^{0,k}$ 和 $h_l^{1,k}$ 对 r_l 进行最大似然译码,可以提取基站 k 发送的定位参考信号 x_l^k 。

对 $x_l^{k_s}$, $x_l^{k_s}$ 进行互相关运算:

$$R_{k_s k_s}(q) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x_l^{k_s}(q + n - \frac{t_1}{T_s}) x_l^{k_s}(q - \frac{t_2}{T_s}) \quad (9)$$

GOLD 序列在频域和时域都具有很好的自相关特性,因而相关器可以很容易地检测到相关峰值。找出到达相关峰值时的采样点:

$$m = \arg\{\max [R_{k_s k_s}(q)]\} \quad (10)$$

根据 m 和采样频率可以获得两路信号的到达时间差:

$$\tau = m * T_s \quad (11)$$

3.3 Chan 算法位置估计

Chan 算法是一种具有解析表达式的非递归算法,适用于时延误差服从零均值高斯分布的情况。Chan 算法运算效率高,适用于三个及三个以上基站情况,当基站数达到四个及以上时,其定位误差接近 CRLB(克拉美罗下界),因而广泛应用于视距定位情况的分析

计算,针对非视距定位情况也有许多优化算法。

$$R_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (12)$$

$$R_i^2 = (R_{i,1} + R_1)^2 \quad (13)$$

由式(12)和式(13)得:

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1} * R_1 = R_i^2 - R_1^2 = K_i - K_1 - 2x_{i,1} * x - 2y_{i,1} * y \quad (14)$$

式中: (x, y) 为移动台坐标; (x_i, y_i) 为基站 i 坐标; R_i 为基站 i 到达移动台的时延; $R_{i,1}$ 为基站 i 和基站 1 的到达移动台的时延差; $K_i = x_i^2 + y_i^2, K_1 = x_1^2 + y_1^2, y_{i,1} = y_i - y_1$ 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - R_{2,1}^2 + 2R_{2,1} * R_1 \\ K_3 - K_1 - R_{3,1}^2 + 2R_{3,1} * R_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$R_{i,1} = c * \tau_{i,1}$ 可以通过 TDOA 时延估计由两路定位参考信号相关运算获得, c 为光速。将式(15)带入 $R_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}$ 可获得 R_1 值。将 R_1 带入方程组可解得 x 和 y 值, x 和 y 取值可能不唯一,这时可以利用小区号、场强等信息确定取舍。

4 仿真与分析

定位参考信号采用 QPSK 调制的 GOLD 序列生成,FFT 大小为 512,信道为瑞利衰落信道。分别采用 Alamouti 编码和 SISO 未编码方案传输定位参考信号得到的误码率曲线。从图 2 中可以看到,在 $\text{SNR} = -6$ 时,相同误码率条件下,Alamouti 编码提供了大于 2 dB 的信噪比增益,并且 Alamouti 编码误码率曲线斜率大于未编码情况,即随 SNR 提升 Alamouti 编码提供的信噪比增益更高。

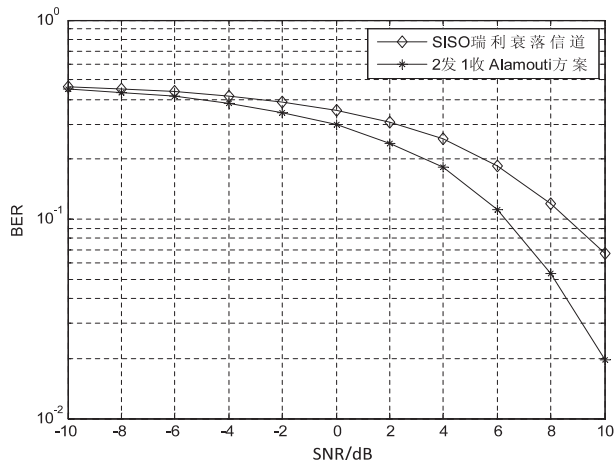


图2 定位参考信号误码率曲线

定位参考信号假设为 QPSK 调制的 GOLD 序列,仿真信号取采样点个数为 256,信道采用瑞利衰落模

型,噪声为加性复高斯白噪声。两路信号到达时间差为 10 个采样点,移动台收到的两路信号信噪比相同且 Alamouti 编码发送信号与未编码方案基站采用相同发送功率。如图 3 所示,当 $\text{SNR} = -2$ dB 时,两种方案峰值均在 10 采样间隔处,两种方案都可以提取正确的时延信息;当 $\text{SNR} = -6$ dB 时,无编码方案的相关峰值在 30 处,获得错误的时延信息,而 Alamouti 编码方案依然可以提取到正确相关峰值。

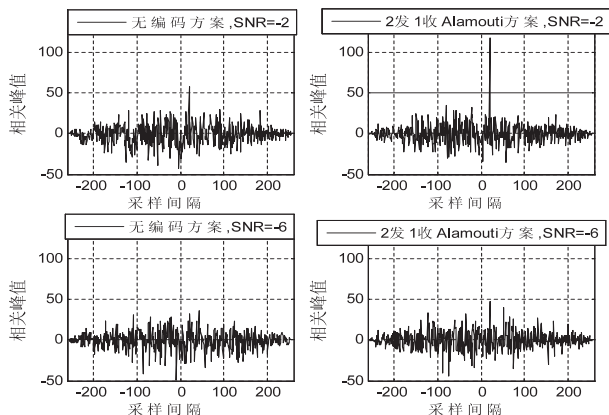


图3 定位参考信号相关后的曲线

分别对无编码方案和 Alamouti 编码方案接收的定位参考信号做 1 000 次相关运算。定位参考信号采用 QPSK 调制的 GOLD 序列生成,FFT 大小为 512,信道为瑞利衰落信道,两路时延差采用 10 个采样点。若相关峰值恰好偏离 y 轴 10 个采样点,则认为正确获得了时延差,正确定位次数加 1。从图 4 中可以看出,在低信噪比情况下,Alamouti 编码对定位性能的提升尤为明显。对比发现,该编码方案成功提取时延差次数与未编码方案信噪比提升 4 dB 后成功提取时延差次数相近。

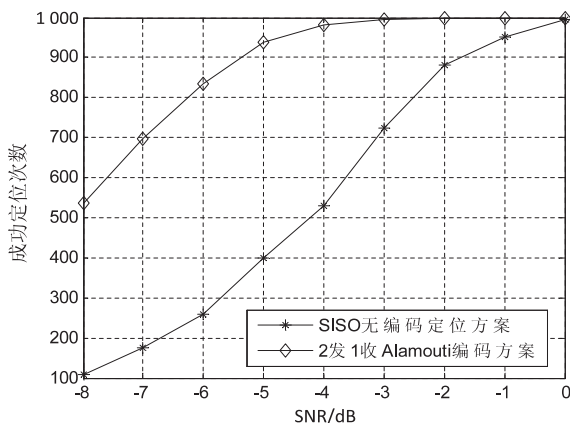


图4 1 000 次仿真正确定位次数

分别对编码方案和未编码方案运用 Chan 算法进行三基站定位。三个基站位置坐标分别为 $(0, 0)$, $(750, 433)$, $(750, -433)$, 移动台运动轨迹起始位置为 $(100, 100)$, 终点位置为 $(600, 600)$, 采样点个数为 100。如图 5 所示,Alamouti 编码无线定位方案和无编

码无线定位方案相比,定位误差均值分别为 20 m 和 8 m 左右,采用 Alamouti 编码方案采样点分布更接近真实轨迹。

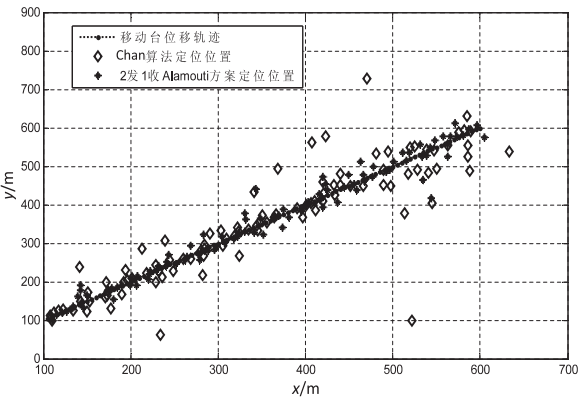


图5 定位轨迹

5 结束语

Alamouti 发射端双天线分集具有译码简单、复杂度低的特点,已经被 LTE 系统广泛采用。文中基站端通过对定位参考信号 Alamouti 空时编码,在信噪比较低的情况下,使移动台获得了较好的定位参考信号互相关峰值,易于提取时延参数,具有较高的实用价值。仿真结果表明,通过 Alamouti 空时编码,可以降低接收端的定位参考信号误码率,降低定位误差,并且在低信噪比情况下明显提升了性能。

参考文献:

[1] 丁宏毅,柳其许,王 巍. Chan 定位算法与 TDOA 估计精度的关系[J]. 通信技术,2010(3):134-136.

[2] 陈 健. 面向 3GPP-LTE 终端无线定位的参数估计与定位解算研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.

[3] Huang Ming, Xu Wen. Enhanced LTE TOA/OTDOA estimation with first arriving path detection[C]//Proc of wireless communications and networking conference. [s. l.]: IEEE, 2013:3992-3997.

[4] 丁宏毅,柳其许,王 巍. Chan 定位算法与 TDOA 估计精度的关系[J]. 通信技术,2010(3):134-136.

[5] Sbeity I, Dbouk M, Kobeissi H. Combining the analytical hierarchy process and the genetic algorithm to solve the timetable problem[J]. Eprint Arxiv, 2014, 5(4):39-50.

[6] 郭俊恩,刁文广. 基于规则和遗传算法的实验室排课算法研究[J]. 河南大学学报:自然科学版,2014, 44(3):355-359.

[7] 刘仁诚,冯秀兰. 基于改进遗传算法的排课问题研究[J]. 科技通报,2013, 29(5):160-163.

[8] 于 娟,尹积栋. 面向排课系统的遗传算法改进研究[J]. 太原理工大学学报,2012, 43(5):572-574.

[9] 石 慧,彭晓红,邬志红,等. 求解多校区排课问题的基因

[4] Kleine-Ostmann T, Bell A E. A data fusion architecture for enhanced position estimation in wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(8):343-345.

[5] 梁伟肇,彭建华. 一种基于 MIMO 的时延估计算法[J]. 计算机工程,2014, 40(1):107-112.

[6] Kim J, Kim S, Kim N Y, et al. A novel location finding system for 3GPP LTE[C]//Proc of IEEE 20th international symposium on personal, indoor and mobile radio communications. Tokyo: IEEE, 2009:3213-3217.

[7] Caffery J J, Stuber G L. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4):38-45.

[8] Peral-Rosado J A D, Lopez-Salcedo J A, Seco-Granados G, et al. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE[C]//Proc of international conference on localization and GNSS. [s. l.]: [s. n.], 2012:1-6.

[9] Silventoinen M, Rantalainen T. Mobile station emergency locating in GSM[C]//Proc of IEEE international conference on personalized wireless communication. [s. l.]: IEEE, 1996: 232-238.

[10] 张 源. LTE 网络中无线终端定位技术的研究与应用[D]. 北京:北京邮电大学,2014.

[11] 王 正,陈 兵. 基于 TDOA 无线定位的 NLOS 误差抑制算法[J]. 电子科技,2014, 27(6):9-12.

[12] 肖 竹,于 全,易克初,等. 适用于 NLOS 环境的 UWB 定位方案研究[J]. 通信学报,2008, 29(4):1-7.

[13] Knapp C, Clifford C G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(4):320-327.

[14] Wong Y, Lin Ziping, Ober R J. Limit of the accuracy of parameter estimation for moving single molecules imaged by fluorescence microscopy[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2011, 59(3):895-911.

[15] 滕晓丽,曹文利. Alamouti 方案的仿真与性能分析[J]. 成都大学学报:自然科学版,2008, 27(4):316-319.

[16] 伍文平,陈 琳,刘艳清,等. Alamouti 方案编译码分析与性能仿真[J]. 科学技术与工程,2009(19):5878-5880.

(上接第 134 页)

[1] 丁宏毅,柳其许,王 巍. Chan 定位算法与 TDOA 估计精度的关系[J]. 通信技术,2010(3):134-136.

[5] Sbeity I, Dbouk M, Kobeissi H. Combining the analytical hierarchy process and the genetic algorithm to solve the timetable problem[J]. Eprint Arxiv, 2014, 5(4):39-50.

[6] 郭俊恩,刁文广. 基于规则和遗传算法的实验室排课算法研究[J]. 河南大学学报:自然科学版,2014, 44(3):355-359.

[7] 刘仁诚,冯秀兰. 基于改进遗传算法的排课问题研究[J]. 科技通报,2013, 29(5):160-163.

[8] 于 娟,尹积栋. 面向排课系统的遗传算法改进研究[J]. 太原理工大学学报,2012, 43(5):572-574.

[9] 石 慧,彭晓红,邬志红,等. 求解多校区排课问题的基因

对交叉遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2010, 46(18): 240-243.

[10] 李红婵,户 刚,朱颖东. 基于群体优势遗传算法的高校排课问题研究[J]. 计算机工程与应用,2011, 47(10):233-236.

[11] 孙 彤,郭倩倩. 基于新型免疫遗传算法的高校排课仿真研究[J]. 计算机仿真,2012, 29(2):386-391.

[12] 雷英杰,张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2014.

[13] 祝勇仁,曹焕亚. 应用遗传算法求解排课问题[J]. 计算机应用与软件,2007, 24(12):130-132.

[14] 刘青凤. 遗传算法在教学任务分配中的应用[J]. 制造业自动化,2010, 32(10):203-205.