

LTE 系统中采用干扰消除技术的 TDOA 定位方法^①

赵军辉^{②*} 赵 聪^{**} 束 锋^{***}

(* 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

(** 北京邮电大学工程学院 北京 100876)

(*** 南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

(**** 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要 为长期演进计划(LTE)通信系统提出了一种采用干扰消除技术来改进信号到达时间差(TDOA)的移动台定位方法。该方法针对移动台在靠近小区中心时接收邻近小区基站信号会受到服务基站和其他基站信号以及噪声的干扰,从而导致定位精度下降的情况,首先在信号接收端重建干扰并且从接收信号中对其进行消除,然后基于正交频分复用(OFDM)通信系统使用相关估计法估算信号传播时间,最后通过加权最小二乘法估算移动台的位置坐标。在多径传播以及非视距(NLOS)传播无线环境中,仿真实验证明,采用该方法可以有效改善靠近小区中心的移动台的定位精度。

关键词 无线定位,到达时间差(TDOA),干扰消除,非视距(NLOS)

0 引 言

无线蜂窝通信系统的移动台定位技术具有广阔的应用前景。对移动台的定位主要包括两个步骤:信号测量和基于测量的位置估算。通常蜂窝网定位测量的参数有信号场强(received signal strength, RSS)^[1]、信号到达时间(time of arrival, TOA)^[2]、信号到达时间差(time difference of arrival, TDOA)^[3]、电波入射角度(angle of arrival, AOA)^[4]、小区识别码(Cell-ID)、提前时间量(timing advanced, TA)/往返时间(round-trip time, RTT)^[5]等。通过测量以上参数中的一种或多种,就可以利用定位算法估算出移动台的位置。第三代合作伙伴计划(3GPP)长期演进(long term evolution, LTE)计划通信系统主要有三大定位技术:辅助全球导航卫星系统(assisted global navigation satellite system, A-GNSS)技术、下行到达时间差观测(observed time difference of arrival, OTDOA)技术和增强小区 ID(enhanced CELL-ID, E-ID)技术。其中,OTDOA 定位技术以其定位精度高、算法计算复杂性低、易于实现等诸多优点而受到

更多的重视^[6-8]。在蜂窝网中定位移动台时需要同时测量到包括服务基站和邻近基站信号在内的至少三个基站的信号,由于远近效应的存在,移动台越靠近服务基站,其接收邻近小区信号的困难就越大,而只有当移动台处在小区边缘时,才能够接收到较高质量的邻近小区信号。在移动台靠近服务基站的情况下,受服务基站的影响,移动台测量到的邻近基站信号的特征参数会存在很大的偏差,进而计算得到的移动台的位置误差也较大。为解决这一问题,本文研究了使用干扰消除技术的 TDOA 定位技术。文献[9]提出了一种干扰消除技术,即多径传播环境下,各个基站的导频信号分别经过多条延迟路径到达移动台,在接收端分别对各个基站信号重建并且消除干扰,再采用时间相关技术进行基站信号的延时估计,大大减少了定位误差。本文基于正交频分复用(OFDM)通信系统将此干扰消除技术应用到非视距(none line of sight, NLOS)传播环境下的移动台定位当中,改善了移动台非常靠近服务基站情况下的邻近小区信号的接收质量,对定位精度有了很大程度的提升。

① 国家自然科学基金(61172073),中央高校基本科研业务费和东南大学移动通信国家重点实验室资助项目。

② 男,1973 年生,工学博士,副教授,研究方向:无线通信中的信号处理;联系人,E-mail: junhui Zhao@bjtu.edu.cn, jzhao@ieee.org (收稿日期:2011-10-10)

1 基于干扰消除技术的定位过程

1.1 干扰消除技术

如图 1 所示,对信息比特数据流进行 QAM 调制后得到符号数据 $S_{m,n}$ ($m = 0, 1, \dots, N_C - 1; n = 0, 1, \dots, N_S - 1$; N_C 和 N_S 分别表示所使用的 OFDM 载波数目和帧中的 OFDM 符号数目)。采用 Zadoff-chu 序列^[10]作为导频,向符号数据中插入导频信号后进行 OFDM 调制,包括串并变换、逆快速傅立叶变换 (IFFT) (变换长度为 N_{FFT})、并串变换以及插入循环前缀 (长度为 N_{GI})。其中 IFFT 实现了多路正交子载波的并行传输。经过 OFDM 调制后的信号可以表示为

$$x_{t,n} = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{m=0}^{N_C-1} S_{m,n} \exp(j \frac{2\pi m(t - N_{GI})}{N_{FFT}}) \quad (1)$$

其中 $t = 0, 1, \dots, N_{FFT} + N_{GI} - 1$, $n = 0, 1, \dots, N_S - 1$ 。 N_{BS} 个基站的信号经过数模变换发送到时变多径信道中,以不同的路径和延时到达接收端,并且每个基站信号包含若干条路径^[9],则接收到的信号可以表示为

$$y(t) = \sum_{\mu=1}^{N_{BS}} \sum_{p=1}^{P_{\mu}} a_{\mu,p} x_{\mu}(t - \tau_{\mu,p}) + n(t) \quad (2)$$

其中 $a_{\mu,p}$ 和 $\tau_{\mu,p}$ 分别表示基站 μ 的第 p 条路径的幅度和传播延时, $\mu = 1, 2, \dots, N_{BS}$; $p = 1, 2, \dots, P_{\mu}$ 。 $n(t)$ 是均值为零,方差为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。接收信号为 N_{BS} 个基站的多径信号以及噪声的叠加。

在接收端对接收信号进行接收处理,进行一系列相反的变换,即模数变换、OFDM 解调 (去保护间隔以及 FFT 变换)、提取导频 (用于信道估计)、QAM 解调,最终将信号恢复为比特数据流。

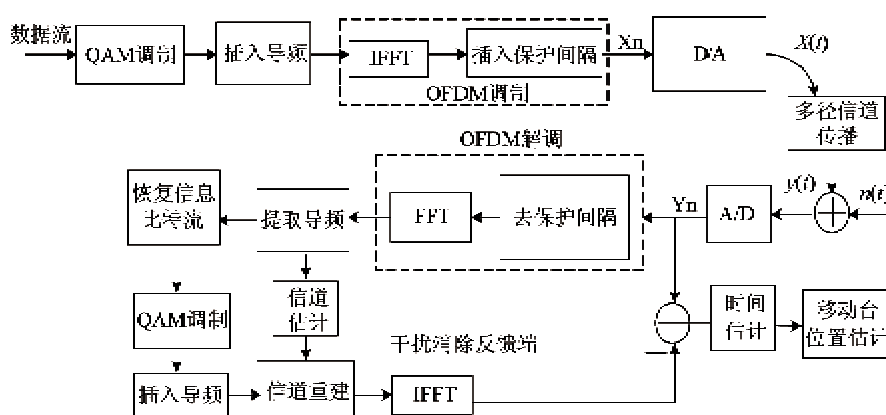


图 1 LTE 系统下基于干扰消除的定位估计原理框图

移动台在接收某一邻近基站的信号时,其他邻近基站尤其是服务基站的信号会对该基站信号产生干扰,影响信号的接收质量,有时甚至会接收不到该基站的信号。另外,基站信号在复杂的移动通信环境中传播时,会受到多径效应和 NLOS 传播的影响,这对于估算信号传播时间是非常不利的,并且会造成较大的移动台位置估计误差。为了减少以上干扰以及噪声的影响,采用一种干扰消除技术 (如图 1 所示),在 LTE 通信系统中加入干扰消除反馈端,对恢复得到的信息比特流再次进行 QAM 调制,并且插入提取得到的各个基站的导频序列。利用信道估计的结果重建信号的传播环境,即重建邻近基站尤其是服务基站的信号干扰、多径干扰、NLOS 干扰以及噪声。重建干扰经过 OFDM 调制,从接收信号中被消除,从而可得到该基站的有用信号。采用这样

的方法,可以较精确地区分各个邻近基站 μ ($\mu = 2, 3, \dots, N_{BS}$) 发出的信号。

由于移动台接收到的服务基站信号质量是最好的,在接收端不需要采用干扰消除技术即可得到服务基站的信号。

1.2 时间估计

若采用干扰消除技术,将各个邻近基站的导频信号分别与经过干扰消除的接收信号滑动相关^[11],可得到

$$r_{\mu,n} = \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} x_{\mu,k}^* y_{n+k} \quad (3)$$

其中 x_{μ}^p 表示基站 μ 的导频信号, y_n 表示接收信号的抽样信号, $\mu = 2, \dots, N_{BS}$, $n = 0, 1, \dots, (N_{FFT} + N_{GI})N_{symbol} - 1$ 。对于服务基站以及不采用干扰消除技术的情况,对信号传播延时进行估计时,不采用

图 1 所示的反馈端,同样可采用式(3)直接将接收信号与导频信号进行滑动相关运算。

对于第 μ 个基站,选择相关峰值作为一帧内基站信号的传播延时估计值,即从所有 $\tau_{\mu,n}$ 中选择最大值得到

$$\hat{\tau}'_{\mu,1} = \operatorname{argmax} |\tau_{\mu,1}| \quad (4)$$

由于各个基站信号不会在同一抽样时刻到达接收端,每一帧的传播延时估计值存在偏差,因此对 N_{frame} 个帧的估计值 $\hat{\tau}'_{\mu,1}$ 求平均值,最终得到基站 μ 的信号传播延时估计值:

$$\hat{\tau}_{\mu,1} = \frac{1}{N_{\text{frame}}} \sum_{f=1}^{N_{\text{frame}}} \hat{\tau}'_{\mu,1,f} \quad (5)$$

1.3 移动台位置估算

利用估计得到的各个基站信号的传播延时,可以计算出各个基站信号相对于基站 1(服务基站)到达移动台的时间差。将时间差与光速 c 相乘,得到信号传播距离差。本文采用加权最小二乘法^[12]估算用户的位置坐标。设 (X_i, Y_i) 为基站坐标 ($i = 1, 2, \dots, N_{BS}$), (x, y) 为待估计的移动台坐标。基于已经得到的信号传播距离差,建立定位方程组:

$$R_{i,1} = c\Delta\tau_i = R_i - R_1, i = 2, \dots, N \quad (6)$$

其中:

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (7)$$

R_i 为基站 i 与移动台之间的距离。

根据文献[12]推导的结果,可以得到:

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = -2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y + K_i - K_1 \quad (8)$$

其中

$$K_i = X_i^2 + Y_i^2 \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_{i,1} = X_i - X_1 \\ Y_{i,1} = Y_i - Y_1 \end{cases} \quad (10)$$

令

$$p = [x, y, r]^T = [x, y, \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}]^T \quad (11)$$

可以得到

$$h_c = G_c p + \varepsilon_c \quad (12)$$

其中:

$$h_c = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - (K_2 - K_1) \\ R_{3,1}^2 - (K_3 - K_1) \\ \dots \\ R_{N_{BS},1}^2 - (K_{N_{BS}} - K_1) \end{bmatrix}$$

$$G_c = \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & R_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & R_{3,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{N_{BS},1} & Y_{N_{BS},1} & R_{N_{BS},1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ε_c 为具有 TDOA 噪声的误差矢量。

用 TDOA 测量值误差的协方差矩阵 Q 来近似代替误差 ε_c 的协方差矩阵 ψ ,可以得到 p 的估计:

$$\hat{p} = (G_c^T Q^{-1} G_c)^{-1} G_c^T Q^{-1} h_c \quad (14)$$

最终得到移动台的估计位置坐标 $(\hat{x}, \hat{y})$:

$$\begin{cases} \hat{x} = p(1) \\ \hat{y} = p(2) \end{cases} \quad (15)$$

2 计算机仿真

本文采用图 2 所示的蜂窝网结构,基站数目 N_{BS} 为 7,站间距离为 1500m,每个基站拥有 3 个扇区,图中灰色区域是服务基站的 3 个扇区。仿真信道环境为文献[13]信道模型中的 Urban 类型。为了考察该定位方法的性能,分别考察 6 个不同位置点: $(20,0), (200,0), (400,0), (600,0), (800,0), (1000,0)$ 。

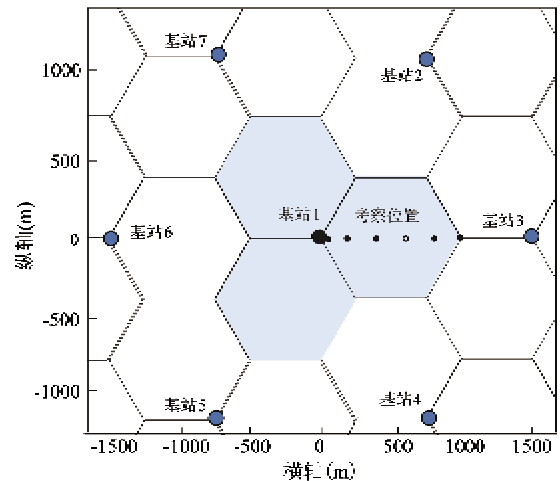


图 2 LTE 蜂窝网的结构

在没有多径干扰以及 NLOS 干扰的情况下,比较添加干扰消除反馈端与未添加反馈端时的信号传播延时估计值的均方根值:

$$RMSE_{\mu} = c \sqrt{E\{|\hat{\tau}_{\mu,1} - \tau_{\mu,1}|^2\}} \quad (16)$$

其中 c 为光速, $\hat{\tau}_{\mu,1}$ 和 $\tau_{\mu,1}$ 分别为基站 μ 信号的估计传播延时与真实传播延时。

由图 3 可以看出,在没有采用干扰消除的情况

下,对于基站 1 来说,移动台越靠近服务基站,估计时间值的误差越小,随着移动台移向小区边缘,其误差越大。对于基站 2 和基站 3,移动台靠近小区中心时的时间估计误差大于小区边缘处的误差,这说明只有当移动台靠近小区边缘时,才能够更好地接收到邻近基站的信号。采用干扰消除方法之后,随着移动台逐渐靠近服务,基站 2、3 的信号传播延时估计值的均方根误差降低得越多,而当移动台靠近服务小区边缘时,定位性能改善不大。这说明干扰消除方法能够明显提高移动台靠近小区中心时对邻近基站信号的接收质量,同时又不影响位于小区边缘处移动台的定位准确度。

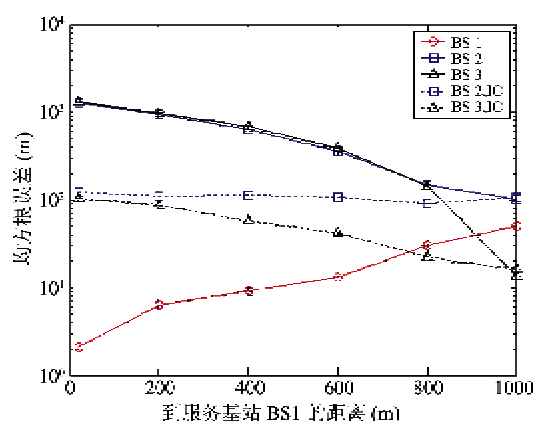


图 3 移动台位于不同位置点处的三个基站信号传播延时均方根误差曲线图

图 4 是关于定位误差的累积分布函数曲线图,考察在多径传播以及 NLOS 传播环境下采用干扰消除技术对定位性能的提高。可以看出,在采用干扰消除技术的情况下,没有多径和 NLOS 传播时的定位误差小于 100m 的概率超过了 90%,略高于存在

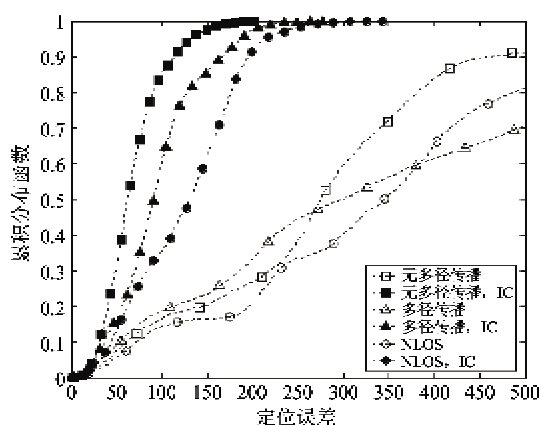


图 4 定位误差累积分布函数曲线图

多径或者 NLOS 传播时的概率,远远高于未采用干扰消除技术情况下的概率;在未采用干扰消除技术情况下,在 NLOS 传播环境中的定位误差小于 100m 的概率是最小的,为 10%。从图中还可以看出,相对于多径传播,定位精度受 NLOS 传播影响较大,定位误差小于 100m 的概率仅为 30%,即在市区环境下,减小 NLOS 传播有利于提高定位精度。

3 结论

本文提出了一种 LTE 通信系统中的 TDOA 定位新方法。当定位靠近小区中心的移动台时,采用一种干扰消除方法提高了邻近基站信号的接收质量,使用接收信号与导频信号滑动相关法估算出基站信号到达移动台的传播延时,移动台的位置估算则通过加权最小二乘法来实现。从仿真结果来看,该方法能够显著提高位于 LTE 系统中靠近服务基站的移动台定位精度,并且可以减小多径传播和 NLOS 传播环境对于定位的不利影响。本文所采用的干扰抵消技术重点抵消的是服务基站以及其他邻近基站信号的干扰,并未考虑多径和 NLOS 传播环境造成的残留误差对于定位精度的影响,因此可以作为下一步的研究工作。

参考文献

- [1] Hata M, Nagatsu T. Mobile location using signal strength measurement in a cellular system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1980, 29(2): 245-252
- [2] Reed J, Rappaport T. An overview of the challenges and progress in meeting the e-911 requirement for location service. *IEEE Communication Magazine*, 1998, 36(4): 30-37
- [3] Smith J, Abel J. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal*, 1987, 35(12): 1661-1669
- [4] Rappaport T S. Position location using wireless communications on highways of the future. *IEEE Communication Magazine*, 1996, 34(10): 33-41
- [5] Borkowski J, Lempinen J. Geometrical transformations as an efficient mean for reducing impact of multipath propagation on positioning accuracy. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, London, UK, 2004, 9. 368-372
- [6] Li C, Zhuang W H. Nonline-of-sight error mitigation in

- TDOA mobile location. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 560-573
- [7] Laoufi, M, Heddebaut M, Rouvaen J M. Emergency calls location using TDOA technique along a motorway dedicated cellular radio network. In: Proceedings of the 4th IEEE Intelligent Transportation Systems, Oakland, USA, 2001. 930-950
- [8] Xiong J Y, Wang W, Zhu Z L. A new TDOA location technique based on Taylor series expansion in cellular networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Chengdu, China, 2003. 378-381
- [9] Mensing C, Sand S, Dammann A. Interference-aware location estimation in cellular OFDM communications System. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops, Dreden, Germany, 2009. 1-6
- [10] Frank R L, Zadoff S A. Phase shift pulse codes with good periodic correlation properties. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(6): 381-382
- [11] 范平志, 邓平. 蜂窝无线定位技术. 北京: 电子工业出版社, 2002. 167-169
- [12] Schau H C, Robinson A Z. Passive source location employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival difference. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1987, 35(1): 1223-1225
- [13] Greenstein L J. A new path-gain/spread propagation model for digital cellular channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1997, 5: 477-484

A TDOA location scheme using interference cancellation in LTE systems

Zhao Junhui * ****, Zhao Cong **, Shu Feng ***

(* School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

(** School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876)

(*** School of Electronic and Optic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

(**** National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract

A time difference of arrival (TDOA) location algorithm using the interference cancellation technique to localize mobile stations for LTE (the long-term evolution) communication systems. Aiming at the problem that a mobile station's received signals from neighbor base stations would be easily disturbed by the serving base station, other base stations and noise, especially when it is near to the serving base station, hence the location precision would be degraded by the interference, the proposed algorithm reconstructs the above interference and subtracts it from the received signals, and then, the signal propagation time is estimated by using a correlation method based on the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) communication system, and finally, the location of the mobile station is calculated by the weighted least square (WLS) method. The simulation results validated the proposed algorithm and showed that the location accuracy of the mobile station nearby the serving base station could be significantly improved by using the interference cancellation technique.

Key words: wireless location, time difference of arrival (TDOA), interference cancellation, none line of sight (NLOS)