

基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法

黄清明^① 刘 璐^{①②}

^①(山东大学信息科学与工程学院 济南 250100)

^②(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 在蜂窝网无线定位技术中,非视距(NLOS)误差的存在使定位性能急剧下降。该文提出了一种针对 NLOS 环境的基于卡尔曼滤波(KF)的动态跟踪定位算法。算法首先利用有偏卡尔曼滤波器的对测量值进行重构,然后利用重构后的测量值进行卡尔曼定位,并引入推算机制加以修正。实验结果表明,该方法在极为恶劣的 NLOS 环境下也能够获得很高的定位精度。

关键词: 无线定位;卡尔曼滤波;非视距误差

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1551-05

Tracking Based on Kalman Filtering for Measurements Restructuring and Mobile Location

Huang Qing-ming^① Liu Ju^{①②}

^①(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

^②(State Key Lab. of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The main impairment for location of terminals in wireless communications system is the Non-Line Of Sight (NLOS) condition. This paper presents a robust location tracking architecture for a NLOS situation. It mitigates NLOS error in the raw measurement using biased Kalman filtering. And then, a reckoning mechanism is introduced to Kalman filtering of location estimates. Simulation results demonstrate that, with the novel architecture, the location estimate can be obtained with good accuracy even in severe NLOS propagation conditions.

Key words: Wireless location; Kalman filtering; NLOS error

1 引言

美国联邦通信委员会(FCC)于1996年公布的E-911定位需求引起了人们对无线定位技术的广泛研究^[1]。

现有的定位算法中,按使用的测量值的种类划分,可分为信号强度(SS)、到达角(AOA)、到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)等单一定位方法和使用两种以上测量值的混合定位方法。按是否利用测量值的时间历史信息划分,可以分为静态定位方法和动态跟踪定位方法。静态定位是使用当前时刻的测量值对该时刻的移动台(MS)位置进行估计,而动态跟踪定位还可以利用之前时刻的测量值。因此,一般说来,动态跟踪定位的精度比静态定位的精度要高。动态定位常用卡尔曼滤波(KF)实现。

无线定位的误差主要有两个来源:一是非理想的信道环境造成测量值的偏差,称之为测量误差;二是求解定位方程组时,由于非线性问题造成的误差。在测量误差中,遮盖物的存在及多径传输引起 NLOS 误差,而测量装置的热噪声、

量化误差及设备精度引起标准测量误差或称为视距(LOS)误差。无论是均值或方差,NLOS 误差都要远远大于 LOS 误差。因此,对无线定位的基本定位算法和 NLOS 误差消除的研究是无线定位研究中的两大热点。

NLOS误差是影响定位精度的重要因素,NLOS误差的消除是无线定位中的关键技术。传统的定位方法,如Chan^[2],Fang^[3],Taylor级数展开^[4]等算法,都没有考虑NLOS误差的影响,当测量值中包含较大的NLOS误差时,这些方法的定位精度将大大降低,达不到FCC的E-911要求。所以,能够消除NLOS误差的定位方法受到了广泛关注:其中一类称为“一步定位法”——在传统定位算法中加以改进,提高其对NLOS的鲁棒性,如残差加权算法^[5]等,这类方法通过对冗余定位结果进行加权或取舍处理来减小NLOS的影响,需要有较多基站(BS)参与定位,并且必须存在LOS基站来保证定位精度,这样的要求在实际中不易实现;另一类可以称为“两步定位法”——根据NLOS误差的性质,对测量的原始数据进行处理,实现LOS重构,再利用重构后的数据进行定位计算,如Wylie方法^[6]等。

本文基于对 NLOS 误差特点的分析,提出一种基于 KF 的、能够有效消除 NLOS 误差的两步定位方案。第 1 步,利

2005-12-01 收到, 2006-05-24 改回

国家自然科学基金(60572105), 综合业务网国家重点实验室基金(ISN7-02), 移动通信国家重点实验室开放基金(A2005008)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET)资助课题

用有偏 KF 对被 NLOS 误差污染的测量值进行测量值重构: 首先, 根据 NLOS 误差的特性及测量值的历史信息, 利用有偏的 KF 估计测量值及偏差, 并对估计结果做出修正以消除 NLOS 误差; 其次, 对估计值进行多项式拟合平滑处理以消除标准测量误差。第 2 步, 利用重构的测量值进行 KF 定位, 并引入推算机制利用历史信息对定位结果进行修正。

2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种线性最小方差估计, 算法具有递推性, 适用于对多维随机过程进行估计, 卡尔曼滤波器主要由两个方程实现:

$$\mathbf{s}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{G}\mathbf{s}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别称为状态转移方程与测量方程, 其中 $\mathbf{s}(k)$, $\mathbf{z}(k)$ 分别是状态向量与测量值向量, \mathbf{A} 和 \mathbf{G} 分别是转移矩阵和测量矩阵, $\mathbf{w}(k)$ 及 $\mathbf{v}(k)$ 是加性噪声分量。

状态转移方程将某一时刻与下一时刻的状态向量相联系, 测量方程将测量向量与同一时刻的状态向量相联系。 $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 反映了状态变化和测量噪声的随机性。因此, 这两个方程建立了第 k 时刻的状态值、测量值与测量值历史信息之间的关系, 通过迭代, 就可以根据测量值序列估计出相应时间点上的状态值。

本文提出的算法两处用到了卡尔曼滤波。在算法第 1 步中, 利用有偏卡尔曼滤波进行 TOA 或 TDOA 测量值的估计, 其测量向量是在 NLOS 环境中测得的未经处理的 TOA 或 TDOA 测量值, 状态向量是测量值的 LOS 估计值及 NLOS 偏移值; 在第 2 步中, 利用卡尔曼滤波对移动台定位跟踪过程进行建模, 其测量向量是消除 NLOS 误差的测量值, 状态向量是移动台的位置坐标。第 1 步基于有偏 KF 的测量值重构算法及第 2 步引入推算机制的 KF 定位算法将分别在第 3、第 4 节中详细阐述。

3 基于有偏 KF 的测量值重构算法

3.1 NLOS 误差模型

无线电波在传播过程中, 遇到障碍物的阻挡会发生反射、折射等, 使到达时间 TOA 发生超量延迟, 到达角度 AOA 也发生很大偏差, 即产生 NLOS 误差。NLOS 误差对定位精度的影响很大, Nokia 的现场测量结果表明, GSM 系统中平均 NLOS 误差高达 500~700m^[7]。

若 $r_m(t_i)$ 表示在 t_i 时刻从移动台到基站 m 的距离测量值, 则 $r_m(t_i)$ 等于真实距离 $L_m(t_i)$ 与标准测量误差 $n_m(t_i)$ 和 NLOS 误差 $\text{NLOS}_m(t_i)$ 之和:

$$r_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i) + \text{NLOS}_m(t_i) \quad (3)$$

其中 $n_m(t_i)$ 为零均值高斯变量, $\text{NLOS}_m(t_i)$ 为正值随机变量。

非视距误差模型分为确定性和随机性两类。在随机性误

差模型中, 通常认为非视距误差服从指数分布, 均匀分布或 Delta 分布^[8]。

本文中 NLOS 误差模型采用服从指数分布的 Greenstein 模型^[9]: $\tau_{\text{rms}} = T_1 d^\epsilon y$ 。其中 τ_{rms} 是均方根延时扩展, 即 NLOS 误差, T_1 是在 $d=1\text{km}$ 处延时扩展的中值, ϵ 取值在 0.5 到 1 之间, y 是一个标准差为 σ_y (4dB) 的对数正态分布随机变量。

由于 TOA 测量值中 NLOS 误差的分布与电波传播路径上障碍物的分布有关, 所以 NLOS 误差具有随机性的特点; 其次, NLOS 误差是电波在传播途中遇障碍物发生超量延迟所致, 所以 TOA 中的 NLOS 误差总是正值; 再次, 式(3)说明, TOA 测量值可以看作是真实的 TOA 与标准测量误差及 NLOS 误差之和, 由于这两种误差的产生原因不同, 因此是相互独立的, 基于这种独立性我们可以将两种误差分别予以消除。

本文分别针对 NLOS 误差的随机性、正值性和独立性, 从不同角度对 NLOS 误差进行消除。

3.2 基于有偏 KF 的测量值重构算法

在测量值中, 我们可以将式(3)重组为

$$r_m(t_i) = r_LOS_m(t_i) + \text{NLOS}(t_i) \quad (4)$$

其中 $r_LOS_m(t_i) = L_m(t_i) + n_m(t_i)$, 表示不含 NLOS 误差的视距测量值。由式(4)可以设计出测量值的 KF 模型。其中 $\mathbf{z}(k)$ 表示 TOA 或 TDOA 测量值序列, 即 $r_m(t_i)$; $\hat{r}(k)$ 表示视距测量值 $r_LOS_m(t_i)$ 导数的估计值; $b(k)$ 表示 NLOS 误差的估计值, 即 $\text{NLOS}_m(t_i)$ 。由此可以设计出卡尔曼滤波方程式(1)、式(2)中的相关参数:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s}(k) = [r(k) \quad \dot{r}(k) \quad b(k)]^T$$

$$\mathbf{G} = [1 \quad 0 \quad 1]$$

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{v}(k) = \mathbf{0}$$

其中 Δ 是采样间隔, α , β 分别是表征移动台运动和 NLOS 环境变化的常量, 可根据实验确定其值。

通过 KF 的迭代过程, 估计出 k 时刻的视距测量值 $r(k)$ 和 NLOS 误差值 $b(k)$, 并根据 NLOS 误差固有的特点和分布规律判断 $b(k)$ 的值, 并对 $r(k)$ 作相应修正。

若 $b(k) > 0$, 即可认为在该点上出现了较大的 NLOS 偏差, 并已通过卡尔曼滤波的迭代过程将其消除; 若 $b(k) < 0$, 则与非视距误差非负且偏差较大的特性矛盾, 可认为此时 NLOS 误差为零, 由于此时标准测量误差是一个较大的负数, 在两者的共同作用下使得估计出的偏差发生负向偏移, 此时将 $b(k)$ 置零, 测量值就是视距测量值。

考虑到运动轨迹的连续和不可突变性, 测量值也应当是连续不可突变的。当相邻两个时刻的估计值差异超过某一特

定门限时, 就发出了该时刻获得的测量值误差较大的信号。此时, 根据运动的连续性, 需要对 k 时刻的估计值加以修正, 而卡尔曼滤波器特有的速度估计性能提供了修正的有效方法, 即

$$r(k) = r(k-1) + \Delta \dot{r}(k-1) \quad (5)$$

通过这一步卡尔曼滤波, 测量值中的 NLOS 误差得到了抑制, 也实现了测量值的 LOS 重构。

经过前面方法处理的测量值, 由于测量噪声, 量化误差等标准测量误差的存在, 仍需要进一步的处理, 由于移动台运动过程中相邻时间点的测量值具有相关性, 可以根据相邻时间点的测量值对时刻 k 的测量值进行修正。标准测量误差服从均值为零的正态分布, 通过对测量值平滑处理得以消除。随着采样技术及科学计算技术的迅速发展, 多项式拟合方法运算速度不断加快, 几乎可以达到实时处理, 又可以利用较长的数据序列。因此本算法采用了多项式拟合法利用较高阶数的多项式对测量值的估计曲线进行平滑处理, 以消除标准测量误差的影响。

4 引入推算机制的 KF 定位算法

经过以上方法处理的测量值消除了大部分的 NLOS 误差和 LOS 误差, 使用常规的定位算法就能取得较好的定位效果, 但是由于卡尔曼滤波定位能够利用大量的时间历史信息, 自身有着很好的抗测量误差及非线性误差能力^[10-12], 所以本文采取基于卡尔曼滤波的定位算法。

4.1 基于 KF 的定位算法

在线性 KF 定位算法中, 卡尔曼滤波器的状态方程可以如下设计:

状态向量 $\mathbf{s}(k) = [x(k) \ y(k) \ \dot{x}(k) \ \dot{y}(k)]^T$, 状态矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{w}(k) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w_x(k) \\ w_y(k) \end{pmatrix}$$

其中 $x(k)$, $y(k)$ 表示移动台在 k 时刻的位置坐标, $\dot{x}(k)$ 和 $\dot{y}(k)$ 则分别表示 k 时刻的运动速度, $\mathbf{w}(k)$ 是与移动台运动速度的随机性有关的向量。

根据测量值种类的不同, 文献[10]和文献[13]分别给出了利用 TDOA 和 TOA 测量值进行定位时卡尔曼滤波器测量方程的不同设计。

4.2 KF 定位中引入推算机制

由于运动轨迹的连续性, 相邻两个时刻的运动轨迹点距离应该保持在某一个门限之内, 这一门限与移动台的运动速度有关。当根据相邻两个时刻的移动台坐标的估计值计算出的距离值超过这一门限时, 即可认为产生了较大的定位误差。根据这一原则对定位后的结果即 $x(k)$, $y(k)$ 加以判别和修正, 将较大地提高定位精度。

因为卡尔曼滤波器本身具有记忆性并且可以估计出 MS 的速度, 所以可以利用上一时刻的位置估计结合速度估计来推算该时刻的 MS 位置。本文采取的修正策略是引入推算机制, 设

$$d(k) = \sqrt{(x(k) - x(k-1))^2 + (y(k) - y(k-1))^2} \quad (6)$$

若 $d(k) > \text{threshold}$, 则说明相邻时间间隔内出现了较大的误差。其中 threshold 是一个与移动台运动速度有关的值, 可以根据先验信息获得。此时, 将该点处的测量值由前一时刻的估计值推算, 即

$$\left. \begin{aligned} x(k) &= x(k-1) + \Delta \cdot \dot{x}(k-1) \\ y(k) &= y(k-1) + \Delta \cdot \dot{y}(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通过引入位置推算机制, KF 定位方法的定位精度得到了有效提高。

5 仿真及分析

仿真中使用了两个典型环境: (1)闹市区 NLOS 环境, 小区半径为 250m; (2)山区环境, 小区半径为 2500m。4 个基站参与定位, 移动台从 $(-300, -100)$ 以速度 $\mathbf{v}[v_x \ v_y]$ 运动, v_x , v_y 是以 10m/s 为均值的随机变量, 每 0.5s 采样一次, 采 100 个 TOA 测量值, 对测量值以本文提出的算法进行重构, 并对 MS 定位。

实验 1 设 BS1(0, 0) 作为服务基站, 将 MS 与 BS1 的 TOA 测量值 $r = ct_{\text{TOA}}$, 分别用一般的多项式平滑法、Wylie 方法、本文提出的基于有偏 KF 的测量值重构算法(记为 BKF 算法)进行处理。实验独立运行 2000 次, 并分析几种方法的性能。

如图 1 所示, 一般用于 LOS 环境中的多项式平滑法已经不再适用于 NLOS 环境, Wylie 方法使估计曲线整体向下偏移, 消除了一部分 NLOS 误差, 但 Wylie 偏移量的数值无法自适应地由算法本身得到, 而需要关于 LOS 的先验知识, 随着测量值及环境的变化, 偏移量也随之变化。因此在动态变化的环境中, 准确的设计这一参数难度很大。而本文提出的 BKF 算法, 在不同的环境中都能够以很高的精度再现真实值, 无需有关 LOS 的先验信息, 实现更为简单。

比较两种算法的相对于真实值的均方误差, 如图 2 所示, 本文提出的 BKF 算法的均方误差曲线平缓、误差值明显小

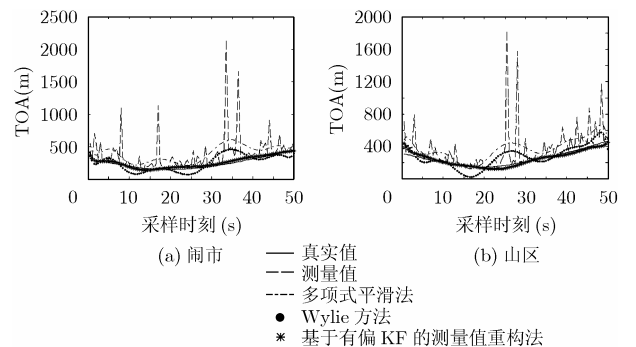


图 1 消除 NLOS 误差性能比较

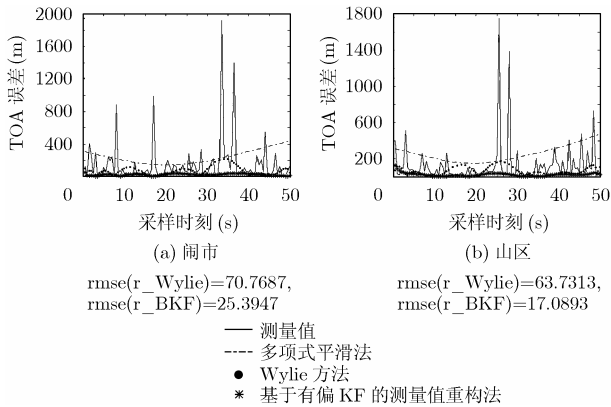


图 2 测量值重构均方误差比较

于 Wylie 算法, 且性能较为稳定, 在各种环境中均能获得很高的精度。

经过实验分析可知, BKF 算法与同属于“两步定位法”的 Wylie 方法相比, 可获得较小的估计误差。与“一步定位法”相比, BKF 只要求参与定位的基站数不少于完成一次 TOA 定位的最少基站数(3 个), 且当所有基站均不存在 LOS 路径时也适用。经过重构的测量值, 即使使用普通的不考虑 NLOS 误差消除的定位算法来计算 MS 的位置, 也可以达到较高的精度。

本文将经过 BKF 算法处理过的 TOA 测量值进行定位, 分析以 Taylor 为代表的静态定位算法与卡尔曼滤波为代表的动态跟踪定位算法的性能, 并在 KF 定位算法中引入推算机制后再进行性能比较。由于 Taylor 方法利用的是 TDOA 值, 为了便于比较定位效果, 本文提出的算法也使用 TDOA 值进行定位。在图 3 中, 将 MS 沿着某一轨迹运动时真实轨迹与 Taylor 和两种 KF 定位比较。可以看出, 由于 KF 算法利用了时间历史信息, 基于 KF 的动态定位算法整体上优于静态的 Taylor 算法。这与理论分析也是一致的。引入推算机制的 KF 定位比普通 KF 定位更加逼近于真实曲线, 跟踪结果比未引入推算机制的跟踪结果更好。

图 4 画出了两种 KF 定位算法定位误差累积分布函数, 横坐标表示定位误差, 纵坐标表示定位误差小于横坐标值的概率, CDF 曲线清楚的表明: 利用引入推算的算法进行移动台定位, 能够达到在 95% 的概率下定位精度不低于 100m, 在 67% 的概率下定位精度不低于 50m, 能够满足 FCC-911

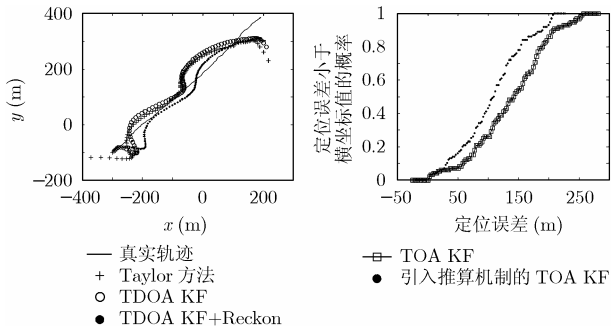


图 3 追踪轨迹(闹市区)

图 4 引入推算机制后 CDF 的比较

的要求(95%的概率下定位精度不低于 300m, 在 67%的概率下定位精度不低于 150m)。

以上实验结果表明, 本文提出的测量值重构算法和引入推算的 KF 定位算法, 从不同角度考虑, 改进了卡尔曼滤波器的迭代过程, 大大消除了 TOA 或 TDOA 测量值中的 LOS 误差和 NLOS 误差, 恢复出的测量值较精确的逼近真实值。

6 结束语

本文提出了一种基于 KF 的测量值重构及定位算法, 包括基于有偏 KF 的测量值重构算法及引入推算机制的 KF 定位算法。在测量值重构算法中, 通过运用有偏 KF 有效地消除了 NLOS 误差, 通过多项式拟合的平滑方法消除了标准测量误差, 经过这一系列处理, 有效地重构了测量值。与同属于“两步定位法”的 Wylie 方法相比, 该方法可获得较小的估计误差; 与“一步定位法”相比, 本文的方法只要求参与定位的基站数不少于完成一次 TOA 定位的最少基站数(3 个), 且当所有基站均不存在 LOS 路径时也适用。在定位算法中通过对普通的 TOA, TDOA 或 TOA/TDOA 混合 KF 定位算法中引入推算机制, 提高了定位算法本身的容差性和定位精度。

参考文献

- [1] Zhao Y. Standardization of mobile phone positioning for 3G systems. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(7): 108-116.
- [2] Chan Y T and Ho K C. TDOA-SDOA estimation with moving source and receivers. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, USA, 2003, vol.5: 153-156.
- [3] Fang B T. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(5): 748-753.
- [4] Torrieri D J. Statistical theory of passive location system. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(2): 183-198.
- [5] Chen P C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99)*, New Orleans, USA, 1999, vol.1: 316-320.
- [6] Wylie M P and Holtzman J. The Non-Line-of-Sight problem in mobile location estimation. *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, Cambridge, MA, USA, 1996, vol.2: 827-831.
- [7] Silventoinen M and Rantalainen T. Mobile station emergency locating in GSM. *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*, India, 1996: 232-238.
- [8] Asplund H, et al. A channel model for positioning. *COST 259 TD(98)20*, Bern, Switzerland, 1998.

- [9] Greenstein L J, *et al.* A new path-gain/delay-spread propagation model for digital cellular channels. *IEEE Trans. on VT*, 1997, 46(2): 477–485.
- [10] Najar M and Vidal J. Kalman tracking based on TDOA for UMTS mobile location. 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, San Diego, CA, 2001, Vol.1: B45–B49.
- [11] Najar M and Vidal J. Kalman tracking for mobile location in NLOS situations. 14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Beijing, China, Sept. 2003, Vol.3: 2203–2207.
- [12] Lee J and Ko H. Tracking of mobile phone using IMM in CDMA environment. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, USA, Proceedings, 2001, Vol.5: 2829–2832.
- [13] Caffery J Jr. A new approach to the geometry of TOA location. IEEE 52nd Vehicular Technology Conference, Boston, USA, Sept. 2000, Vol.4: 1943–1949.
- 黄清明: 女, 1979 年生, 硕士, 研究方向为蜂窝网无线定位.
刘 璐: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、盲信号处理、多媒体通信等.

编辑部公告

刊登于第 29 卷第 5 期 1194–1197 页, 作者徐兴, 叶梧, 冯穗力, “基于多优先级时延预留的接入控制机制”的论文因故撤销, 特此公告。