



小波分析法解决无线定位跟踪问题

陈宝全¹, 毛永毅²

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院 西安 710061; 2. 西安邮电大学电子工程学院 西安 710061)

摘 要:无线定位中,信号的非视距传播(NLoS)很大程度上决定了移动台的定位精度,而小波分析理论在信号处理中有较为明显的优点,提出了一种在蜂窝网络中非视距环境下对移动台(MS)的定位及跟踪算法。利用小波变换对信号的分解和重构,实现了对 TD OA 测量值误差的修正,再利用经典 Chan 算法对移动台位置进行估计,配合相应的距离门限值对移动台的位置进行跟踪定位。仿真结果表明,该算法能够有效地实现对移动台位置的静态定位和动态跟踪,并明显优于同等环境下经典算法的仿真结果,有效提高了定位精度。

关键词:无线定位;小波变换;阈值;跟踪算法

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.10.017

Wavelet Analysis Method to Solve the Problem of Wireless Location Tracking

Chen Baoquan¹, Mao Yongyi²

(1. Department of Communication Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710061, China;

2. Department of Electronic and Information, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: The signal of non-line-of-sight propagation(NLoS) largely determine the positioning accuracy of the mobile station in wireless location, the wavelet analysis theory has obvious advantages in signal processing. A positioning and tracking algorithm of the mobile station (MS) in the NLoS environment of cellular network was presented. Using wavelet transform signal decomposition and reconstruction, the TD OA measurement error correction, re-use classic Chan algorithm to estimate the location of the mobile station, with the corresponding distance threshold to track the location of the mobile station location. The simulation results show that the algorithm can effectively achieve the static positioning and dynamic tracking of the location of the mobile station, and significantly better than the classical algorithm simulation results in the same environment, and effectively improve the positioning accuracy.

Key words: wireless location, wavelet transform, threshold, tracking algorithm

1 引言

随着第四代通信技术的高速发展,移动通信设备得到了大规模的普及,对基于位置服务的要求也不断增加,这促使移动定位技术成为人们关注的焦点。无线定位算法包括基于到达时间(TOA)的定位算法^[1]、基于到达时间差

(TD OA)的定位算法^[2]、基于到达角(AOA)的定位算法^[3]以及由它们混合使用衍生的定位算法^[4,5],但在非理想环境下,测量值都含有一定的误差量,这使定位精度很难达到要求。目前大致可以总结出如下两种方式以解决该问题^[6,7]:一是运用多次迭代的方式反复校正,二是处理优化数据消除测量误差。

在蜂窝系统移动台(MS)定位技术中,利用到达时间差实现移动台的定位得到了学者的广泛认可。由经验可知,往往得到的TDOA方程组是非线性的,要将其转换成线性方程组再求解,但在非理想状态下测量的TDOA值存在误差,在众多误差中非视距误差^[8]起主导地位,所以如何消除测量值中的非视距误差成为保证定位准确性的关键。参考文献[9,10]在非视距误差环境下利用卡尔曼滤波对移动台的初始位置估计值进行修正,并根据相应方法完成对移动台的跟踪。参考文献[11]利用混沌算法优化初值,再利用Taylor算法实现对移动台的位置估计;参考文献[12]提出了一种全新的RF定位算法;参考文献[13]根据信号强度约束移动台和基站(BS)之间的信号变化和几何布局,从而获得移动台位置的定位算法。

本文利用小波变换^[14]在信号消噪中的应用,将其运用在消除TDOA测量误差和非视距误差中。首先用小波变换对非视距误差进行修正,其次利用修正后的TDOA值运用Chan算法^[15]进行位置估计,然后用相关检测门限对移动台位置进行跟踪,最后用仿真软件对该算法的结果进行分析和评估。

2 算法描述

现做如下假设,设移动台的位置坐标为 (x, y) ,基站的位置为已知,第 i 个基站的位置 BS_i 的坐标为 (X_i, Y_i) ,定义MS到 BS_i 的距离为 R_i ,则相应地可得:

$$R_i^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 \quad (1)$$

现将 BS_i 定义为系统的服务基站;TDOA测量值为 t_{i1} ;假设电波传播速度不受环境影响,为常量 c ; R_{i1} 表示MS与基站 BS_i 和服务基站 BS_1 之间的距离差,则:

$$R_{i1} = ct_{i1} = R_i - R_1, i=2,3,\dots,N \quad (2)$$

其中, N 为基站数目,利用 $R_i^2 = (R_{i1} + R_1)^2$ 展开并化简可得:

$$R_{i1}^2 + 2R_{i1}R_1 = R_i^2 - R_1^2 \quad (3)$$

通过式(1)~式(3)可得到关于坐标的距离差方程^[9],通过求解方程组就能够得到移动台的位置坐标。

2.1 小波变换算法

起初小波分析只作为纯数学理论被学者研究,随着建立起成型的体系结构,小波分析理论逐渐被广泛地应用在工程实践中,其中包括信号分析及图像处理领域、量子力学及理论物理领域、军事电子对抗与武器的智能化领域等。小波变换是一种信号的时间—频率(时间—尺度)分析

方法,它的思想来源于伸缩与平移,不仅继承和发展了窗口傅里叶变换的局部化思想,而且克服了窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交基的缺点,即在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率。所以小波分析方法在功能上明显优于传统的傅里叶分析方法,原则上讲,小波分析方法在大部分情况下可以替代傅里叶分析方法,并在很大程度上获得更丰富的信息,如下是小波变换的具体算法。

设 $\varphi_{(t)}$ 满足以下条件:

- $\varphi_{(t)}$ 为一平方可积函数,即 $\varphi_{(t)} \in L^2(R)$;
- $0 < \int_0^{+\infty} \frac{|\psi_{(\omega)}|^2}{(\omega)} d\omega < +\infty$ 。

其中, $\psi_{(\omega)}$ 为 $\varphi_{(t)}$ 的傅里叶变换,以上两点为小波函数的可容性条件,称 $\varphi_{(t)}$ 为小波母函数或小波函数。

将小波函数 $\varphi_{(t)}$ 进行伸缩和平移得:

$$\varphi_{a,\tau}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (4)$$

其中, α 为伸缩因子(或尺度因子); τ 为平移因子;称 $\varphi_{a,\tau}(t)$ 为依赖于 α, τ 的小波基函数。由于 α, τ 是连续变化的值,因此称 $\{\varphi_{a,\tau}(t)\}$ 为连续小波基函数,它们是由同一母函数 $\varphi_{(t)}$ 经伸缩平移后得到的一组函数序列。设某一信号为 $f(t)$,可得连续小波变换表达式为:

$$WT_f(a, \tau) = \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (5)$$

相应的逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} WT_f(a, \tau) \cdot \varphi_{a,\tau}(t) d\tau da \quad (6)$$

其中, $C_\varphi = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi_{(\omega)}|^2}{\omega} d\omega$,对尺度因子 α 进行离散化,

取 $\alpha = \alpha_0^j, j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$,时移因子取 $\tau = d\tau_0$,调整时间轴使 $k\tau_0$ 在轴上为整数(归一化) k ,于是,离散化后的小波函数为:

$$\varphi_{j,k}(t) = \alpha_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(\alpha_0^{-j}t - k), j, k \in Z \quad (7)$$

则得到的离散小波变换为:

$$WT_f(j, k) = \int_R f(t) \bar{\varphi}_{j,k}(t) dt \quad (8)$$

若取离散栅格的 $\alpha_0=2, \Delta\tau=0$,即相当于只在尺度上进行二进制离散 $a=2^j$,而位移仍取连续变化,称这类小波为二进小波,表示为:



$$\varphi_{2^j, \tau}(t) = 2^{\frac{k}{2}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{2^k}\right) \quad (9)$$

则二进制小波变换为:

$$WT_f(2^j, \tau) = \frac{1}{2^j} \int_R f(t) \varphi\left(\frac{\tau-t}{2^j}\right) dt \quad (10)$$

由于离散小波的逆变换与重建比较复杂,本文不进行详细介绍,可查看相应文献^[14]。

2.1.1 基于小波变换的 TDOA 测量值的修正

选择适当的信道模型,本文采用移动台基于时间定位技术的常用模型 T1P1(COST259)信道模型,并采用典型的 7 小区组成的蜂窝结构,其具体的位置关系如图 1 所示。

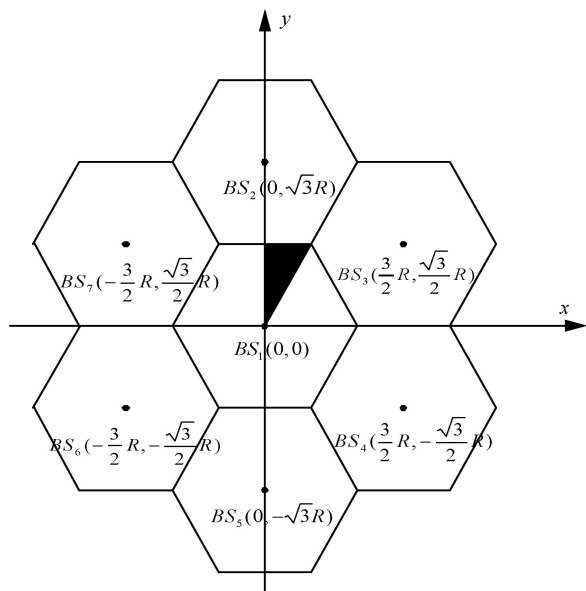


图 1 基站与移动台的位置分布

由 7 个基站可测得相应的 7 个 TOA 值,假设其中一个基站是服务基站,则基于该服务基站可得出 6 个 TDOA 测量值为: TDOA21、TDOA31、TDOA41、TDOA51、TDOA61、TDOA71。由于测量值是在非视距误差环境下进行的,所以测量值均含有测量误差和 NLoS 误差。每个 TDOA 值相当于一个信号,测量误差和 NLoS 误差相当于信号中的噪声,接下来用小波降噪的基本思想解决消除误差的问题。其基本方法是对信号进行小波变换,将其分解为不同的尺度,分析相应高频系数的特征,通过处理噪声占主导尺度的层实现降噪。

小波降噪大致可以分为如下 3 类:

- 基于小波变换极大值原理;
- 基于相关性去噪;
- 阈值去噪。

本文采用第 3 种降噪方法,阈值降噪也是工程应用中较容易实现的一种方法。该方法的基本思想是对小波分解后的各层系数中模大于或小于某阈值的系数分别进行处理,然后进行反变换重构信号,重构后的信号即去除噪声后的信号。该方法的具体步骤如下。

步骤 1 通过测得的数据及经验选择合适的小波函数,用该小波函数对测得的 TDOA 信号进行小波变换,得到相应小波变换系数,记为 W 。

步骤 2 采用合适的阈值选取方法,计算出小波阈值 δ ,用该阈值对步骤 1 中的 W 进行取舍,得到新的小波系数 W_δ 。

步骤 3 用新得到的系数 W_δ 进行逆小波变化,重构出去噪后的 TDOA 值。

(1) 小波的选取

小波基函数^[16]的选取在一定程度上决定着小波系数的分布,所以选择什么样的小波基函数直接影响处理结果。目前还没有研究出一种适合所有场合的最优小波基函数,小波函数的选取一般根据经验和大量的实验进行选择,可以总结出 5 点选择小波基的原则:正交性、对称性、紧支性、消失矩特性、正则性。工程中常用的小波系有 haar、dbN、symN、CoifN 等,针对本文所处理数据的基本特性(主要根据信道模型的特性),选择的小波基应具有离散小波变换的特性,且应具有正交性和对称性,所以本文选用较为简单的 dbN 小波基函数。经过大量的仿真实验,最终选择仿真结果最好的 db3 小波。

(2) 阈值的选取

关于阈值的选取有多种方法,具体可参考参考文献^[14]。本文选择使用信号的默认阈值(较容易得到),其主要的计算式为: $thr = \sqrt{2 \lg(n)} \times \sigma$, 其中, σ 为噪声的强度。在求得阈值后,有两种在信号上作用阈值的方法,一种是硬阈值法,另一种是软阈值法。硬阈值法具有绝对性,强制令绝对值小于阈值的信号点的值为 0,绝对值大于阈值的信号点不做处理,这种方法有一定的缺陷,比如会在某些点产生间断。本文采用软阈值的方法,该方法是在硬阈值的基础上让边界处不连续点逐渐收缩到 0,这样可以有效避免间断,使得重建的信号比较光滑。

2.1.2 基于小波变换的 TDOA 定位算法

当测量 TDOA 值与真实值相差较小时,尤其是在理想的零均值高斯随机变量下 Chan 算法具有很好的定位精度,但对于 NLoS 环境中误差较大的 TDOA 测量值,Chan

算法的性能就显得没有那么优秀了。本文利用小波分解与重构对 TDOA 测量数据进行修正,减小了 TDOA 测量值中的测量误差和 NLoS 误差,然后利用 Chan 算法进行位置估计,有效地提高了系统的定位精度。

具体的定位步骤如下。

(1)假定测得 K 组 NLoS 环境下的 TDOA 值,选取适当的小波基函数和分解层数,然后对测得的数据进行小波分解。

(2)用上文的方法对相应分解层的系数进行处理,使用处理后的系数进行小波重构,得到修正后的 TDOA 值。

(3)利用修正后的 TDOA 值采用 Chan 算法进行位置估算。

2.2 移动台跟踪算法

2.2.1 算法实现

实现定位跟踪的本质是对各实时定位点的优化整理,把连续时间计算出的定位点通过相应的方法和门限值整理成一个点迹,该点迹即移动台运行的跟踪轨迹。本文采用的跟踪算法^[7]如下所述。

步骤 1 设通过第 2.1 节算法计算得到的定位结果 (x_i, y_i) 为观测点 A_i , 目标点迹为 $T_i, i=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 2 计算前 10 个观测点的均值设为点迹的起始点 T_i , 并计算出相应的距离门限值 G 。

步骤 3 将下一个观测值 A_{i+1} 与 T_i 进行比较, 如果距离差小于步骤 2 中的距离门限值 G , 则把 A_{i+1} 定为跟踪点迹的下一个点 T_{i+1} , 如果两者的绝对值大于门限值 G , 则舍弃该观测点, 返回步骤 2 继续比对下一个观测值。

步骤 4 当计算结果 $T_{i+1}=T_i$ 时, 返回步骤 2 更新距离门限值 G , 并进行下一点迹的计算, 直到 $i=n$ 时停止计算。

步骤 5 用线性插值法对漏掉的点迹进行拟合计算, 最终完成跟踪计算。

2.2.2 距离门的选取

为便于实现数学模型, 更容易确定距离门限 G 的值, 假设观测序列 A 中除遗漏的点和由于误差过大舍去的数据外, 其他各点数据均满足高斯过程。根据一定长度的观测序列估计距离门限值 G , 实质上是概率统计中置信度和置信区间的关系, 即按照一定的置信度估计出相应的置信区间。由式(11)可以计算出置信区间。

$$\left(E(A) - t_{\alpha/2}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}}, E(A) + t_{\alpha/2}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (11)$$

其中, $E(A)$ 为序列 A 的均值; α 为置信度; $t_{\alpha/2}(n-1)$ 服

从 t 分布, 其值可由 t 表查得; S 为 σ 方差的无偏估计量:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - E(A))^2 \quad (12)$$

3 仿真及分析

利用 MATLAB 软件^[8]进行仿真实验, 首先对本文定位算法与 Chan 算法、LS 算法和 Taylor 算法进行仿真比较。仿真中, 假设小区分布如图 1 所示, 服从 T1P1 信道模型, 小区半径为 3 000 m, 信道参数 $T=0.4$, 式(12)中观测长度 n 取 11。表 1 为各算法在上述条件下定位均方误差经 50 次仿真求平均值的比较结果, 从表中数据可以很明显看出了本文算法优于其他 3 种算法, 具有良好的静态定位精度。

表 1 定位算法比较

算法	本文算法	Chan 算法	LS 算法	Taylor 算法
RMSE	136.638 1	377.722 4	722.736 6	587.881 7

假设移动台从坐标 (500, 500) 出发, 以 5 m/s 的速度沿 x 正坐标轴 45° 方向匀速直线运动, 图 2 为本文算法的定位和跟踪仿真结果。从图中可以看出, 定位的离散点都在真实轨迹附近, 很少有偏离真实轨迹的点, 充分说明有良好的静态定位效果。从实线跟踪轨迹可以看出, 跟踪轨迹始终在真实移动轨迹附近波动, 有效消除了静态定位点中远离真实值的定位点, 实现了移动台的动态跟踪。

图 3 是不同测量误差下本文算法与其他 3 种算法的比较; 图 4 是不同信道环境模型下本文算法与其他 3 种算法的比较, 图中的 4 个点从左到右依次代表远郊、郊区、市区、闹市区; 图 5 是不同小区半径下本文算法和其他 3 种算法的比较。从仿真结果中可以很明显地看出, 本文算法在上述不同条件下的均方误差均小于 Chan 算法、LS 算法和 Taylor 算法, 充分证明本算法可以有效抑制测量误差和 NLoS 误差, 并且在大部分条件下的跟踪效果优于其他算法。

4 结束语

综上所述, 本文提出了一种基于小波变换的 TDOA 无线定位跟踪算法。利用小波分解与小波重构的思想, 配合相应的阈值, 有效地消除了测量值中的误差量, 然后用经典 Chan 算法完成移动台的位置估计, 利用相应的跟踪算法实现了对移动台的跟踪定位。实验数据说

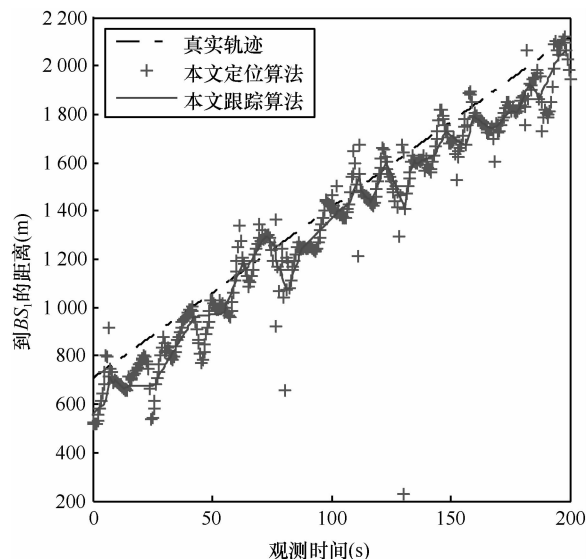


图2 本文算法定位与跟踪结果

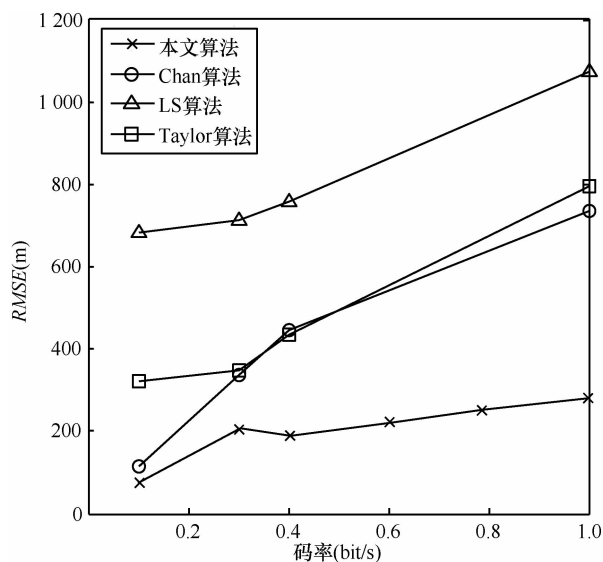


图4 不同信道下各算法跟踪结果比较

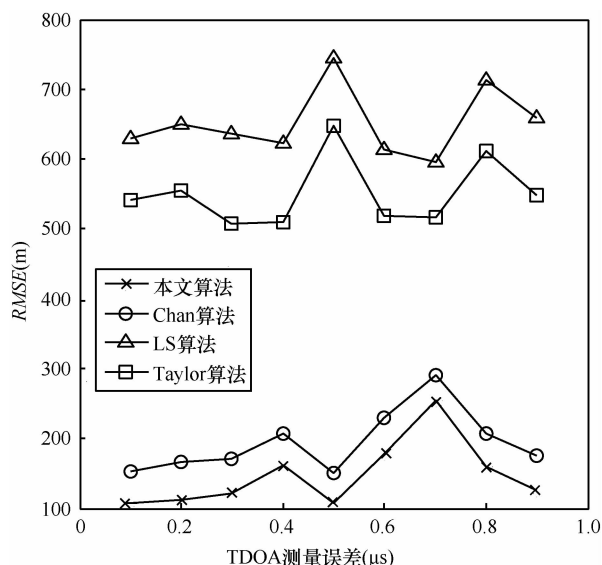


图3 不同测量误差下各算法跟踪结果比较

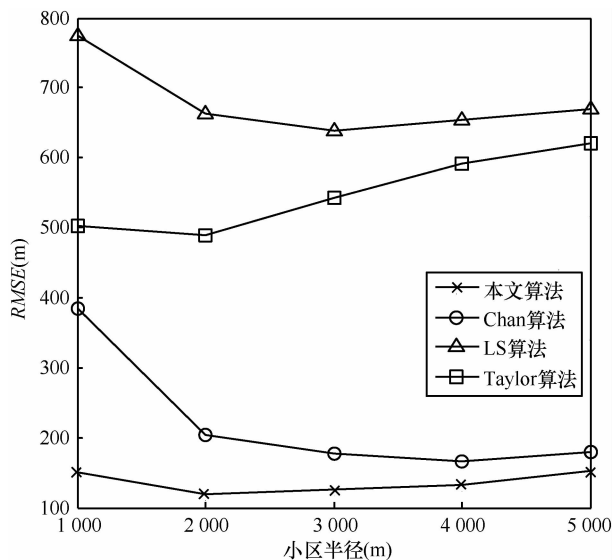


图5 不同小区半径下各算法跟踪结果比较

明,该算法可以有效地提高静态定位精度和动态跟踪精度。

参考文献

- 1 黄亚萍.基于TDOA和TOA的无线定位技术研究.南京邮电大学硕士学位论文,2012
- 2 Wang H Y, Lan Y F, Pei B N, *et al.* A location algorithm based on TDOA under NLoS environment. *Computer Simulation*, 2007,24(9):116~119
- 3 毛永毅,张颖.非视距传播环境下的AOA定位跟踪算法.计算机应用,2011,2(31):317~319
- 4 Ma C, Klukas R, Lachapelle G. An enhanced two-step least squared approach for TDOA/AOA wireless location. *Proceedings*

of ICC 2003, Anchorage, Alaska, USA, 2003

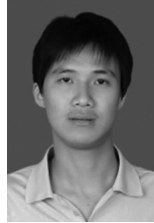
- 5 郭丽梅,罗大庸.非视距环境中TOA/AOA混合定位方法.电路与系统学报,2010,5(15):26~30
- 6 李渝,李青.常见无线通信定位技术研究.无线通信技术,2012(1):8~12
- 7 Wu S X, Li J P, Liu S Y, *et al.* Improved and extended RangeScale algorithm for wireless cellular location. *IEEE Communications Letters*, 2012,16(2):196~198
- 8 陈桂忠,董利达,兰守珍.一种在非视距环境中的移动节点定位方法.浙江大学学报(理学版),2009,36(1):52~56
- 9 毛永毅,周康磊,李星.一种蜂窝网中的跟踪算法.通信学报,2010,9(43):70~72
- 10 李川.基于Kalman的滤波目标精确跟踪技术研究.通信技术,2009,42(6):205~207

(下转第107页)

参考文献

- 1 Winslett M, Yu T, Seamons K, *et al.* Trust negotiation on the Web. *IEEE Internet Computing*, 2002, 6(6):30~37
- 2 Yu T, Winslett M, Seamons K E. Supporting structured credentials and sensitive policies through interoperable strategies for automated trust negotiation. *ACM Transactions on Information and System Security*, 2003, 6 (1):1~42
- 3 廖振松, 李赤松, 邹德等. 自动信任协商及其发展趋势. *软件学报*, 2006, 17(9): 1933~1948
- 4 官尚元, 伍卫国, 董小社等. 自动信任协商的形式化描述与验证研究. *通信学报*, 2011, 32(2):86~99
- 5 李健利, 高勇, 解洋等. 自动信任协商中信任证存储策略研究. *计算机工程*, 2011, 37(12): 140~143
- 6 李健利, 霍光磊, 刘博等. 基于魔方算法的自动信任协商敏感信息传输方案. *计算机应用*, 2011, 34(4): 984~988
- 7 王凯, 张红旗, 任志宇. 自动信任协商中环策略依赖检测技术. *计算机应用*, 2012, 33(3): 686~689, 693
- 8 蒋文保, 陈文亮, 汪秋云. 一种自适应信任协商模型设计与分析. *四川大学学报(自然科学版)*, 2013(2):273~280
- 9 Guo S X, Jiang W B. A trust evaluation model and algorithm. *Proceedings of International Conference on Communications and Intelligence Information Security*, Nanning, China, 2010:130~134
- 10 Horst T, Sundelin T, Seamons K E, *et al.* Mobile trust negotiation authentication and authorization in dynamic mobile networks. *Proceedings of Eighth IFIP Conference on Communications and Multimedia Security*, Porto, Portugal, 2004
- 11 廖俊国, 洪帆, 李俊等. 在信任协商中保密证书的敏感属性. *通信学报*, 2008, 29(6):20~25
- 12 雷建云, 余涵, 蒋天发等. 自动信任协商中的敏感信息保护方案. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(3):1~4
- 13 洪帆, 郭亚军. 资源限制信任协商. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(5):23~25

[作者简介]



汪秋云,男,北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为人工智能与信息安全。



蒋文保,男,北京信息科技大学教授,主要研究方向为网络安全监测与监控。



王鸿,男,北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为物流工程与信息安全。

(收稿日期:2013-06-28)

(上接第 102 页)

- 11 罗竣友,赵军辉,廖健雄.基于混沌优化的无线定位算法研究. *电路与系统学报*,2010(1):113~119
- 12 任重远,陈佳品,李振波等.一种基于无线传感器网络的 RF 定位算法研究. *传感器与微系统*,2012(7):52~54
- 13 肖卫初,陈伟宏,龚伦峰.一种新的几何无线定位方法. *科学技术与工程*,2011,11(13):2945~2948
- 14 王慧琴.小波分析与应用.北京:北京邮电大学出版社,2011
- 15 Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimation or for hyperbolic location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905~1915
- 16 汪新凡. 小波基选择及其优化. *株洲工学院学报*,2003,17(5): 33~35
- 17 张颖.无线定位优化算法的研究.西安邮电大学硕士学位论文, 2011
- 18 张德丰. MATLAB 小波分析.北京:机械工业出版社,2012

[作者简介]



陈宝全,男,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理、移动台定位。



毛永毅,男,博士,西安邮电大学教授、硕士生导师、研究生院副院长,主要研究方向为通信信号处理、移动台定位。

(收稿日期:2013-06-30)