

一种非视距传播下的TDOA定位算法

袁登科¹, 冯全源²

(1. 惠州通信规划设计院 广东 惠州 516003; 2. 西南交通大学计算机与通信工程学院 成都 610031)

【摘要】提出了一种不需要任何非视距传播测量值先验信息且具有解析表达式解、非递归的双曲线定位算法。通过一步简单残差加权得出一个与真实移动台位置比较接近的初始定位估计,利用该初始值构造了一个加权矩阵,进行两次加权最小二乘计算,得出了一个最后的定位结果。理论分析与目前流行定位算法的仿真结果比较表明,该定位算法能有效地抑制非视距传播误差的影响,计算量相当小。

关键词 非视距传播; 到达时差; 无线定位; WLS估计
中图分类号 TN929 文献标识码 A

A Location Algorithm with NLOS Propagation

YUAN Deng-ke¹, FENG Quan-yuan²

(1. Huizhou Telecommunication Planning & Design Institute, Huizhou Guangdong 516003;
2. School of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031)

Abstract A new non-line-of-sight location algorithm based on TDOA for mobile station is developed in this paper. One of the advantages of this method is that no statistical models or prior information on NLOS channel condition are needed. Simulation and comparison of performance with other existing methods have shown the effectiveness of NLOS error mitigation in location estimate. Its good characteristics including low requirement, non-iteration, very low computational complexity make it easily available to apply to practice.

Key words non-line of sight propagation; time difference of arrival; wireless location; WLS estimation

无线定位技术应用于蜂窝网络,既可满足对移动台MS定位的要求,也可以用于W-CDMA网络的系统设置和网络资源的管理和实现智能交通运输系统等^[1]。电波到达时间差(TDOA)定位法在MS和基站(BS)之间存在视距(LOS)传播时,能达到较高的精度。可是在实际的蜂窝网络中,MS和BS之间经常存在非视距(NLOS)传播,以致于给TDOA测量值带来一个正值,可达1 000 m以上的误差。现场测试表明,在IS-95 CDMA系统中,NLOS平均误差为589 m,使NLOS传播成为影响蜂窝网络定位精度的主要原因。如何降低NLOS误差带来的影响是提高定位精度的关键^[2]。

现有的一些鉴别和抑制NLOS误差的方法通常需要利用测距误差统计的先验信息,通过比较TDOA测量值的标准差来鉴定NLOS,然后重构NLOS测量值,得到LOS测量值,或者降低非线性最小二乘算法中NLOS测量值的权重^[3]。这些方法存在的一个主要问题就是缺少NLOS误差模型和有关NLOS误差信号强度的现场测试,为这些算法提供必需的TDOA测量值误差的先验信息,在实际应用中往往具有一定的困难。因此,文献[2]提出了一种不需要任何NLOS测量值的先验信息的残差加权Rwgh算法,利用定位残差对定位结果进行加权,以降低NLOS误差的不利影响。该算法对NLOS误差能起到明显的抑制作用,但是计算复杂性太高,计算量太大,这是其最主要的缺点。本文提出了一种既不需要任何NLOS测量值的先验信息,计算量复杂性也不高,运算时间很少的TDOA定位算法。

1 算法推导

设在蜂窝网络中待定位的MS的位置坐标为 (x, y) ,第 i 个BS的坐标为 (x_i, y_i) ,根据测量得到的TDOA测量值可建立距离方程:

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (1)$$

收稿日期: 2004-04-06

作者简介: 袁登科(1981-),男,硕士,主要从事蜂窝网络无线定位、WCDMA无线网络规划方面的研究。

式中 $K_i = x_i^2 + y_i^2, i=1,2,\dots,M$, M 为BS的数目, BS_1 为服务BS; $d_{i,1}$ 为TDOA测量值; C 为电波传播速度; $r_{i,1}$ 表示MS与第*i*个BS和 BS_1 的距离差, $r_{i,1} = Cd_{i,1} = r_i - r_1$ 。式(1)可以化为:

$$r_{i,1}^2 + 2r_{i,1}r_1 = K_i - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y - K_1 \quad (2)$$

式中 $x_{i,1} = x_i - x_1$; $y_{i,1} = y_i - y_1$; $i=2,3,\dots,M$ 。从式(2)构成的 $M-1$ 个方程组中任取两个组成一个二元方程组, 分别求出MS位置中间结果, 记为 (\bar{x}_k, \bar{y}_k) , $k=1,2,\dots,N$ 。定义残差函数为:

$$f_i(x, y) = r_{i,1} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} + \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (3)$$

所有残差平方和为:

$$F_k = \sum_{i=2}^M f_i^2(x, y) \quad (4)$$

对所有的 (\bar{x}_k, \bar{y}_k) 按下式加权, 得到MS位置的初步估计:

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\sum_{k=1}^N (\bar{x}_k, \bar{y}_k) (F_k(\bar{x}_k, \bar{y}_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^N (F_k(\bar{x}_k, \bar{y}_k))^{-1}} \quad (5)$$

令 $z_a = [z_p^T, r_1^T]^T$ 为未知矢量, 其中, $z_p = [x, y]^T$ 。从式(3)建立以 z_p 为变量的方程为:

$$h = G_a z_a \quad (6)$$

对应的误差矢量为:

$$\varphi = h - G_a z_a^0 \quad (7)$$

式中 $h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \vdots \\ r_{M,1}^2 - K_M + K_1 \end{bmatrix}$; $G_a = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & r_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & r_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M,1} & y_{M,1} & r_{M,1} \end{bmatrix}$; z_a^0 是真实MS位置对应的 z_a 的值。如果测量值的噪声

矢量为 n , 则:

$$\varphi = CBn + 0.5C^2 n \quad (8)$$

式中 $B = \text{diag}\{r_2^0, r_3^0, \dots, r_M^0\}$, r_i^0 是MS与各BS之间距离。一般式(8)右边第二项远小于第一项, 可忽略。于是误差矢量 φ 成为具有以下协方差矩阵的随机矢量:

$$\psi = E[\varphi\varphi^T] = C^2 BQB \quad (9)$$

式中 Q 是TDOA协方差矩阵。对 z_a 进行第一次WLS估计:

$$z_a = (G_a^T \psi^{-1} G_a)^{-1} G_a^T \psi^{-1} h \quad (10)$$

由于无任何有关TDOA测量值的先验信息, 所以 Q 未知; 又因 r_i^0 在求出MS的位置之前未知, 故 B 也未知。在不能提供 Q 的情况下, 唯有令 $Q=I$, I 为单位矩阵, 式(10)则成为LS估计, 得出得结果肯定没有WLS估计精确, 因为没有对存在的NLOS误差的TDOA测量值进行任何抑制。仿真表明, Q 值的选取对NLOS误差抑制起重要作用, 能有效地提高定位精度。采用如下方法构造 Q 矩阵: 由前面所定义的残差函数, 将MS位置初始估计值 (\bar{x}, \bar{y}) 代入式(4), 得到每个方程的残差 $f_i(\bar{x}, \bar{y})$, 令:

$$Q = \text{diag}\{f_2(\bar{x}, \bar{y}), f_3(\bar{x}, \bar{y}), \dots, f_M(\bar{x}, \bar{y})\} \quad (11)$$

对于 B 未知, 文献[5]是通过近似 $z_a \approx (G_a^T Q^{-1} G_a)^{-1} G_a^T Q^{-1} h$, 利用近似得到的 z_a 来计算 B 。但是由于 z_a 中的 r_1 与 $[x, y]^T$ 并不相互独立, 这样近似得出来的结果误差会很大, 所以如果由前面第一步得出的MS位置初始估计 (\bar{x}, \bar{y}) 来计算 B 将会更加准确。第一次WLS估计的结果可由式(10)得到, 这个过程是假设 z_a 中的 r_1 与 $[x, y]^T$ 相互独立, 但事实上 r_1 与 $[x, y]^T$ 并不独立, 利用这一关系进行第二次WLS估计可以得到更准确的结果。首先计算 Δz_a 及 z_a 的协方差矩阵:

$$\Delta z_a = C(G_a^{0T} \psi^{-1} G_a^0)^{-1} G_a^{0T} \psi^{-1} Bn \quad (12)$$

$$\text{cov}(z_a) = E[\Delta z_a \Delta z_a^T] = (G_a^{0T} \psi^{-1} G_a^0)^{-1} \quad (13)$$

式中 G_a^0 是无噪声时的 G_a , 由 z_a 计算出 r_i^0 代入 G_a 近似获得。根据关系 $r_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2$ 构造新的误差矢量为:

$$\varphi' = h' - G_a' z_a'^0 \quad (14)$$

式中 $\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - y_1)^2 \\ z_{a,3}^2 \end{bmatrix}$; $z_{a,1}$ 、 $z_{a,2}$ 、 $z_{a,3}$ 为 z_a 的三个元素; $\mathbf{G}'_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{z}'_a = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix}$ 。 $\boldsymbol{\varphi}'$ 的协方差

矩阵为:

$$\boldsymbol{\psi}' = E[\boldsymbol{\varphi}'\boldsymbol{\varphi}'^T] = 4\mathbf{B}'\text{cov}(z_a)\mathbf{B}' \quad (15)$$

$$\mathbf{B}' = \text{diag}\{x^0 - x_1, y^0 - y_1, r_1^0\} \quad (16)$$

式中 (x^0, y^0) 用初始估计 (\bar{x}, \bar{y}) 来近似替代, 进行第二次WLS估计: $\mathbf{z}'_a = (\mathbf{G}'_a{}^T \boldsymbol{\psi}'^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} \mathbf{G}'_a{}^T \boldsymbol{\psi}'^{-1} \mathbf{h}'$, 最终的计算结果为: $\mathbf{z}_p = \pm \sqrt{\mathbf{z}'_a} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}$, 选择处于感兴趣区域的一个解作为MS位置的最终估计。

2 仿真和比较

为了检验本算法(Proposed)的实际定位性能, 本文就不同NLOS误差、各种信道环境(Rural、Suburban、Urban、Badurban)及不同基站提供的TDOA测量值数目等情况对本算法和目前流行的一些算法进行了仿真比较。假设蜂窝网络基站布局为典型的7BS, 正六边形, 小区半径为3 000 m。由测量系统造成的TDOA测量误差服从均值为0, 方差为30 m的Gauss分布, NLOS误差分为确定值和服从COST259信道模型^[6]两种情况。基站为定位提供的TDOA测量值数目分别为4个和5个, 假设其中有1个或2个有NLOS误差, 基站不能提供任何有关TDOA测量值的先验信息。参与比较的算法有Rwgh算法、Chan算法^[4]、Friedlander算法^[5]。另外, 还增加了由式(5)得到结果(Simple-Rwgh)和利用真实MS位置作为初始估计的本算法(Best), 以及假设没有NLOS误差, 只有测量误差(Gauss型)时定位性能的比较。

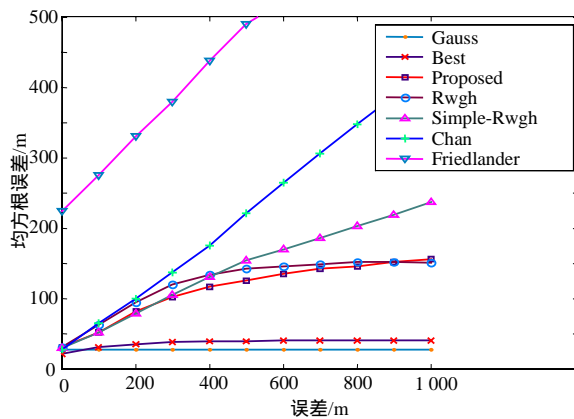


图1 1/4 TDOA测量值存在NLOS误差

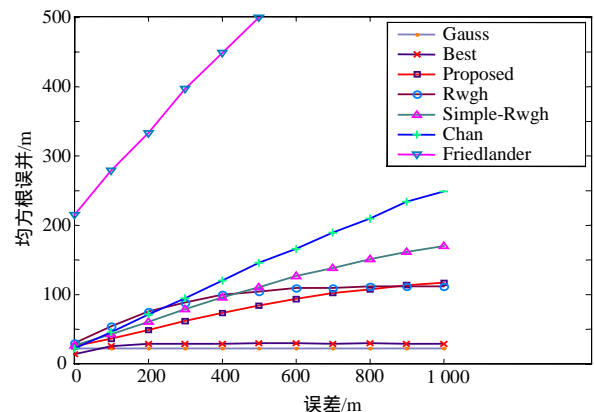


图2 2/4 TDOA测量值存在NLOS误差

图1、2分别为当NLOS误差为确定值时, 本算法与其他算法的性能比较, 从图中可看出NLOS误差与RMSE的关系。图中的RMSE曲线显示, 与Friedlander算法相比, 本算法的性能有了很大的提升。与同样也对NLOS误差具有明显的抑制作用的Rwgh算法相比, 本算法的性能也有不小的改善, 特别是当NLOS误差不太大的时候。说明本算法能较好地抑制NLOS误差的影响, 当NLOS误差很大时, 效果尤为明显, 此时的RMSE曲线趋近水平。与Chan算法的比较充分说明了加权矩阵对整体性能的巨大提升起着重要的作用。从Simple-Rwgh曲线可以看到, 式(5)简单残差加权处理也能在一定的程度上对NLOS误差的不利影响进行抑制, 说明式(5)得出的初始估计已经与真实的MS位置相当接近了, 这有利于随后两次WLS定位估计的精度提高。从最后的Best曲线与Gauss曲线的比较可以看出, 用真实的MS位置作为初始估计的本算法能得出最好的性能, 与没有NLOS误差时得出的结果十分接近, 几乎不受NLOS误差的影响, 这是本算法的理想性能。图3和图4是本算法在不同的信道环境下的性能仿真, 与其他算法的比较可以得出以上相同的结论。

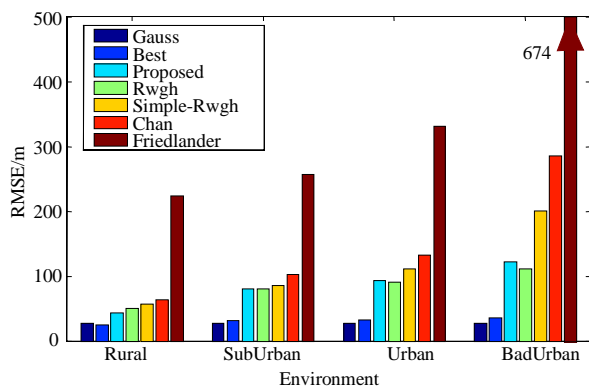


图3 1/4 TDOA测量值存在NLOS误差

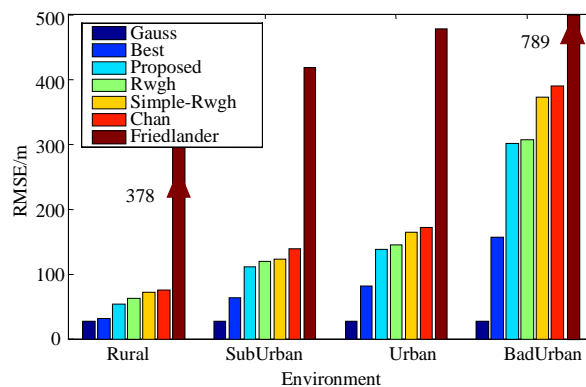


图4 2/4 TDOA测量值存在NLOS误差

此外,由于本算法具有解析表达式解,非递归,在算法的复杂度方面要比那些递归算法如Taylor级数展开法简单得多,而且也不存在解的收敛问题,在与一些非递归的算法如Rwgh算法相比也要简单不少。以6基站为例,此时的TDOA测量值有5个,在Rwgh算法中,TDOA测量值分组数目为 $N = C_5^3 + C_5^4 + C_5^5 = 16$,每个方程组是数目为3~5的超定方程组。为了取得最好的性能,每个超定方程组都采用含有三次WLS计算的Chan算法求解,计算量很大,复杂性也由此可见。而本算法只包含一个二次WLS计算,第一步的简单加权也只是求解 $N = C_5^3 = 10$ 个二元方程组,相对来讲,这个过程计算量要小得多,而且方程组的数目也要少1/2。在TDOA测量值数目相同条件下,本算法的平均计算量仅是Rwgh算法的1/5。

3 结 论

理论分析和在不同NLOS误差和信道环境下进行的仿真比较表明,本文所提出的利用一个比较接近真实MS位置的初始定位估计,为随后的两次WLS计算提供一个加权矩阵,以改进定位性能的方法能有效地抑制NLOS误差带来的不利影响,同时计算复杂度也不高,计算量小,其最后的性能要优于在相同条件下目前流行算法的性能,且其优秀的理想性能也说明本算法具有很好的前景。

参 考 文 献

- [1] Caffery J. Wireless location in CDMA cellular radio systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001: 21-23.
- [2] Chen P C. A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation[J]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC'99), 1999, 1(1): 316-320.
- [3] Caffery J, Stuber G. Subscriber location in CDMA cellular networks[J]. IEEE Trans. on VT, 1998, 47: 406-416.
- [4] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient Estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [5] Friedlander B. A passive location algorithm and its accuracy analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic engineering, 1987, OE-12: 234-244.
- [6] Asplund H. A channel model for position, COST 259 TD20[S], Bern, Switzerland, 1998: 79-81.

编 辑 刘文珍