

基于 Chan 氏算法和 Taylor 级数展开法的协同定位方法¹

刘 林 邓 平 范平志

(西南交通大学移动通信研究所 成都 610031)

摘 要: 该文分析讨论了 Chan 和泰勒两种 TDOA 定位算法的优缺点, 并在此基础上提出了基于 Chan 氏算法 (1994) 和 Taylor 级数展开法 (1976) 的协同定位方法, 通过在不同信道环境下对协同定位方法进行仿真, 表明该方法在信道环境恶劣时能够有效地提高定位精度。

关键词: TDOA, Taylor 算法, Chan 氏算法, 协同定位

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0041-06

A Cooperative Location Method Based on Chan and Taylor Algorithms

Liu Lin Deng Ping Fan Ping-zhi

(Institute of Mobile Communication, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In this paper, two location algorithms, i.e. Chan and Taylor series expansion methods, are analyzed and a cooperative location method based on Chan and Taylor algorithms is proposed. The performance of the cooperative location method is simulated under different channel environments, and the results show that the cooperative location method can significantly improve the location accuracy under bad channel environments.

Key words TDOA, Taylor series expansion method, Chan method, Cooperative location technique

1 引言

随着蜂窝移动通信技术的迅速发展, 无线定位技术已经成为下一代移动通信系统所必须具备的功能。近年来, 无线通信基本的定位技术包括场强定位法、基于电波传播时间 (TOA) 或时间差 (TDOA) 的定位法、基于电波入射角 (AOA) 的定位法以及各类混合定位法^[1]。其中, TDOA 定位法由于对移动台 (MS) 和基站 (BS) 无严格时间同步要求, 能适用于各种类型的蜂窝系统, 应用成本较低, 定位精度较高, 因而受到广泛关注, 并在 3GPP^[2] 中确定为一种标准的定位方法。

目前, 利用 TDOA 测量值进行定位的算法有多种, 如递归的 Taylor 级数展开法^[3] 及非递归算法如 Chan 氏算法^[4], SX, SI^[5] 算法等, 它们对 TDOA 测量值的误差特性有不同的要求, 计算复杂性也各不相同, 在不同的 TDOA 噪声特性下分别能达到定位估计的最优或次优解。但是, 几种主要的 TDOA 定位算法都面临一个共同的问题, 即在信道环境差的情况下, 定位精度很低^[6], 很难满足 E-911^[7] 定位精度的要求。为此, 本文针对这一问题, 提出了一种协同定位方法, 并在 COST259 信道模型^[8] 下对该方法进行了仿真分析。

2 Chan 和泰勒算法性能分析

在蜂窝网络中, 一旦取得 TDOA 测量值, 就可以得到 MS 到两个 BS 之间的距离差, 多个 TDOA 测量值就可以构成一组关于 MS 位置的双曲线方程组, 求解该双曲线方程组就可得

¹ 2002-07-09 收到, 2003-01-23 改回

国家自然科学基金 (60218001)、华为技术有限公司基金资助课题

到 MS 的估计位置。设 (x, y) 为 MS 的待估计位置, (x_i, y_i) 为第 i 个基站发射机的已知位置, 则 MS 和第 i 个 BS 发射机之间的距离:

$$\begin{aligned} R_i &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ R_i^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $K_i = x_i^2 + y_i^2$ 。令 $R_{i,1}$ 表示 MS 与 BS i 和 BS1(服务基站) 的距离差, 则

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

其中 c 为电波传播速度, $\tau_{i,1}$ 为 TDOA 测量值。为求解该非线性方程组可以先进行线性化处理。因为

$$R_i^2 = (R_{i,1} + R_1)^2 \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1) 得

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (4)$$

由式 (1), 当 $i = 1$ 时, 可得

$$R_1^2 = K_1 - 2x_1 x - 2y_1 y + x^2 + y^2 \quad (5)$$

式 (4) 减去式 (5) 可得

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = K_i - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y - K_1 \quad (6)$$

式中 $x_{i,1} = x_i - x_1$, $y_{i,1} = y_i - y_1$ 。将 x, y, R_1 视为未知数, 则式 (6) 成为线性方程组, 求解该方程组便可以得到 MS 的坐标位置。目前, 有多种方法用于求解该线性方程组, 如 Chan, Taylor, FANG, SX, SI, DAC 等^[9], 其中 Chan 氏算法和 Taylor 级数展开法被认为是最有效的两种算法。

Chan 氏算法是一种求解双曲线方程组的非递归算法, 该算法采用两步最大似然估计 (ML), 具体过程可参阅文献 [4]。该算法的特点是计算量小, 在噪声服从高斯分布的环境下, 定位精度高。但在非视距 (NLOS) 环境下, Chan 氏算法的定位精度下降。

Taylor 级数展开法是一种需要初始估计位置的递归算法, 在每一次递归中通过求解 TDOA 测量误差的局部线性最小二乘 (LS) 解来改进估计位置, 具体过程可参考文献 [3]。该算法的特点是计算量大, 能够适用于各种信道环境, 在初始估计位置与实际位置接近的情况下能得到准确的计算结果。但是, 在初始位置选择不好的情况下, 算法将很难保证收敛。而在实际应用中, 初始位置是很难确定的, 因此, 这也限制了 Taylor 级数展开法的定位精度的提高。

3 基于 Chan 和 Taylor 的协同定位方法

由于 Taylor 级数展开法初始值的选取对定位结果影响很大。如果初始值选取不合适, 可能导致算法的不收敛。因此, 可以先通过某种算法, 对测量数据进行初始定位, 将定位的结果作为 Taylor 级数展开法的初始值, 然后, 再利用 Taylor 级数展开法进行定位运算。为了减小算法的运算复杂性和尽量避免牺牲太大的运算速度, 作为初始定位的算法应该具备运算速度快, 定位结果较精确的特点, 而 Chan 氏算法恰好具有以上的优点。虽然, Chan 氏算法在信道环境比较差的情况下, 定位精度下降, 但它的定位结果仍然反映了 MS 位置与测量值之间的关联特征, 有利于 Taylor 算法的收敛。因此, 本文提出了基于 Taylor 级数法和 Chan 氏算法的协同定位方法。该方法的实现流程如图 1 所示。首先采用 Chan 氏算法对 TDOA 测量值进行定位计算, 计

算结果作为 Taylor 级数展开算法的初始值, 采用 Taylor 级数展开算法再次对 MS 进行定位估计。为了避免少数情况下 Taylor 算法定位结果的发散问题, 该方法提出了根据 Chan 和 Taylor 级数展开算法的定位结果进行加权系数的计算, 最后根据加权系数, 对两种定位方法的位置估计值进行处理, 得出 MS 最终的位置估计值。

为了计算加权系数, 我们定义定位结果与测量值之间的残差为

$$R_{res} = \sum_{i=1}^{N_{BS}} (r_i - |\hat{X} - X_i|)^2 \quad (7)$$

其中 $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ 为定位结果, $X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$ 为参与定位的第 i 个 BS 的坐标, r_i 为 MS 到第 i 个 BS 的距离, 即 $r_i = ct_i$, c 为电波传播速度, t_i 为 MS 和第 i 个 BS 之间的测量 TOA; N_{BS} 为参与定位的 BS 数目。如果某种算法的定位结果比较精确, 则式 (7) 的值就比较小, 这种算法的结果在最后的的位置估计中应该占有较大的比重, 因此, 可以按下面的方式计算加权系数。

假设对同一组 TDOA 测量值分别采用 K 种定位算法, 则第 k 种算法的加权系数 R_k 的计算方法^[10]为

$$R_k = \sum_{i=1}^{N_{BS}} (r_i - |\hat{X}_k - X_i|)^2 / N_{BS} \quad (8)$$

其中 $\hat{X}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix}$ 为第 k 种算法的定位结果。MS 的最终位置估计 $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ 可通过加权系数来计算, 即

$$\hat{X} = \sum_{k=1}^K \hat{X}_k R_k^{-1} / \sum_{k=1}^K R_k^{-1} \quad (9)$$

4 仿真与讨论

本文的计算机仿真信道模型采用 COST259, 非视距误差根据公式 $\tau_{rms} = T_1 d^\alpha y$ 产生均方根误差, 然后根据指数分布产生超量时延, 即

$$P(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{rms}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{rms}}\right), & \tau > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

测量误差满足均值为 0, 方差为 30m 的高斯分布; 由于对称性, 因此只考虑 MS 在 1/12 小区内均匀分布 (图 2 中黑色区域); 参与定位的 BS 为 7 个, 小区半径为 1000m。BS 分布如图 2 所示。

图 3 是本文提出的基于 Chan 和 Taylor 级数展开算法的协同定位方法在不同信道环境下定位误差的 CDF(Cumulative Distribution Function) 性能曲线与 Chan 氏算法、Taylor 级数展开法 (初始值为真实值) 在相同条件下的仿真结果的比较。其中, 服务基站为视距传输, 其它基站为非视距传输。图中, CHAN 表示 Chan 氏算法定位结果; CHAN&TAYLOR 表示基于 Chan

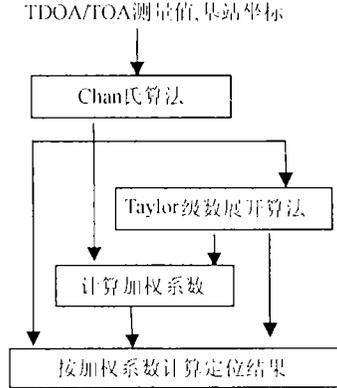


图 1 协同定位方法流程

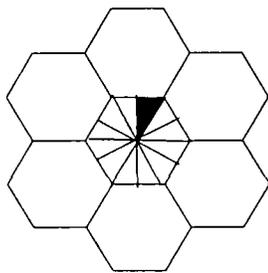


图 2 基站分布示意图

和 Taylor 级数展开法的协同定位方法的定位结果；TAYLOR(TRUE) 表示以 MS 真实值为初始值的 Taylor 级数展开算法定位结果。从图 3(a), 3(b), 3(c) 可以看出，基于 Chan 和 Taylor 级数展开法的协同定位方法的定位性能比 Chan 氏算法的性能好，定位精度有明显的提高，并接近于以真实值为初值的 Taylor 级数展开法的性能，即基于

Chan 和 Taylor 级数展开法的协同定位方法基本上可以达到 Taylor 级数展开算法的最佳效果。图 3(d) 则表明，在 Rural 环境下，协同定位方法与 Chan 氏算法相比，并无明显的性能改变，原因是在 Rural 环境下，Chan 氏算法本身的定位结果就已经很好，因此，基于 Chan 和 Taylor 级数展开法的协同定位方法对结果的改善不大。对比图 3(a), 3(b), 3(c), 3(d) 的曲线还可以看出，信道环境越差，本文提出的定位方法对定位性能的改善越大。图 4 是所有 BS 都是非视距传输，其它条件与图 3 相同的仿真结果；图 5 是服务 BS 和其它两个基站为视距传输，其余 4 个基站为非视距传输，其它条件与图 3 相同的仿真结果。从这两个图也可以看出，基于 Chan 和 Taylor 级数展开的协同定位方法对定位精度有明显的提高。

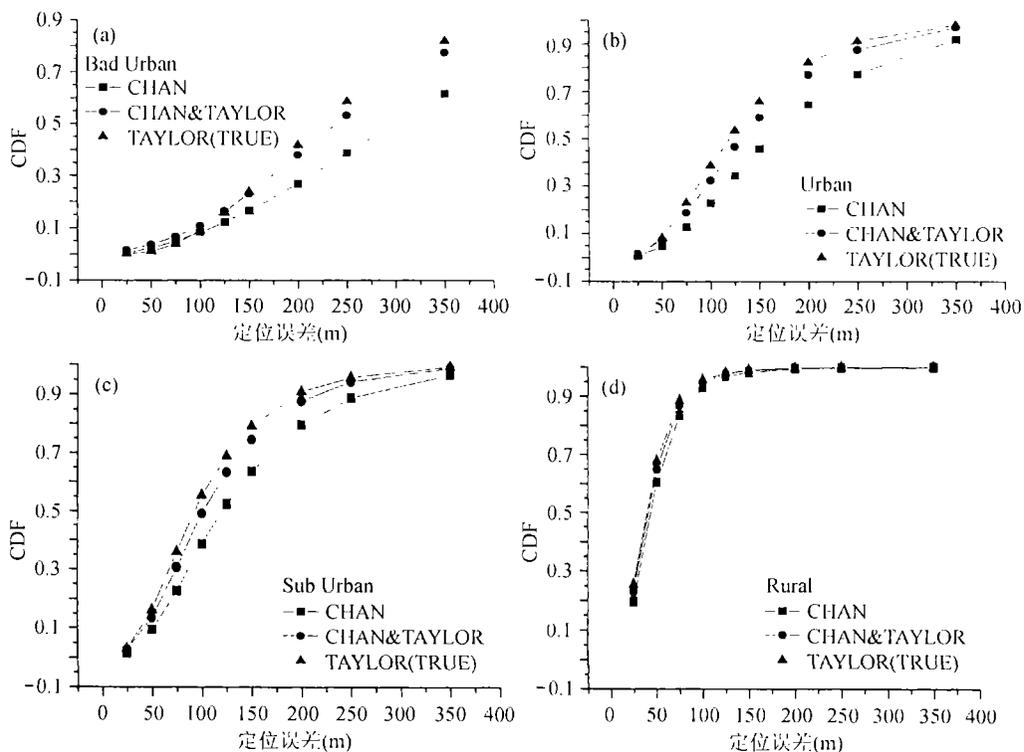


图 3 协同定位算法性能 (服务基站视距, 其它 6 个基站非视距)

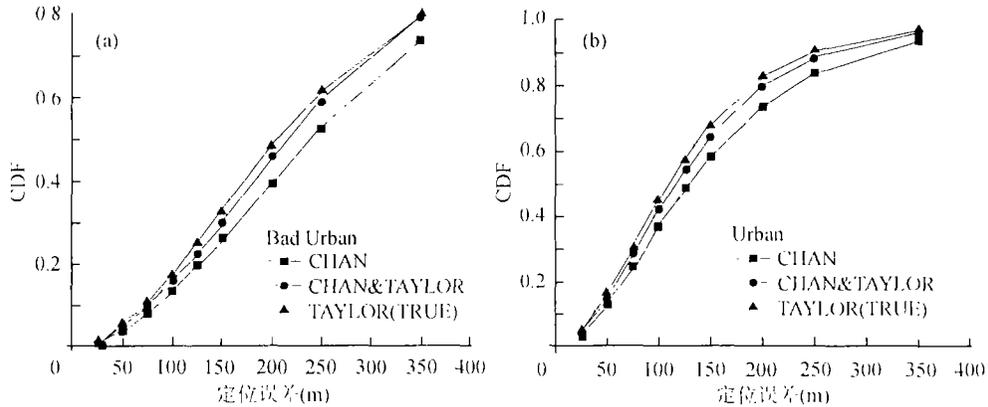


图 4 协同定位算法性能 (所有 7 个基站都是非视距)

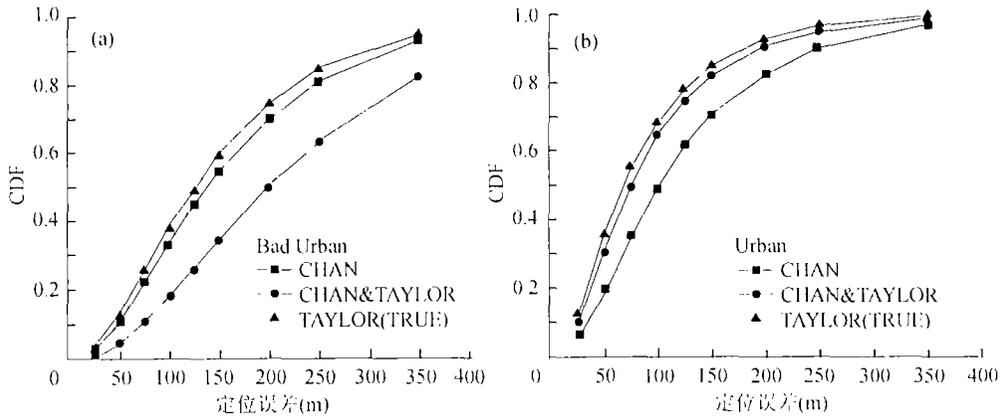


图 5 协同定位算法性能 (服务基站和其它两个基站为视距, 其余基站为非视距)

为了进一步验证本文提出的基于 Chan 和 Taylor 级数展开的协同定位方法的性能, 本文对 Chan+ 文献 [10] 与基于 Chan 和 Taylor 的协同定位两种方法进行了仿真比较, 信道模型仍然采用 COST259, BS 5 个, 小区半径 1000m, MS 在 1/12 小区内均匀分布 (图 2 中黑色区域), 仿真结果如图 6 所示。由于基于 Chan 和 Taylor 的协同定位方法在信道环境差时才显示出其优越的性能, 因此, 本文仅给出了 Bad Urban 和 Urban 两种环境下的比较结果。

从图 6 的仿真结果可以看出, 基于 Chan 和 Taylor 的协同定位方法比仅根据文献 [10] 的加权方式采用 Chan 算法进行定位的精度高。由此可以得出, 本文提出的基于 Chan 和 Taylor 级数展开算法的协同定位方法定位精度的提高主要来自于将 Chan 算法定位的结果作为 Taylor 算法的初值, 而加权方式对定位精度的提高是很有限的。

5 结论

在 Bad Urban 和 Urban 环境下, 由于 TDOA 测量值受到 NLOS 的严重影响, Chan 氏算法的定位精度下降。而 Taylor 级数展开算法初始位置的选取直接影响到定位精度, 因此, 本文提出了一种基于 Chan 和 Taylor 级数展开的协同定位算法, 该算法充分利用了 Chan 氏算法和 Taylor 算法的优势, 仿真结果表明, 本文提出的基于 Chan 和 Taylor 级数展开算法的协同定位方法在信道环境恶劣的情况下能很好地提高算法的定位精度, 并克服 Taylor 级数展开定位算法的发散问题。

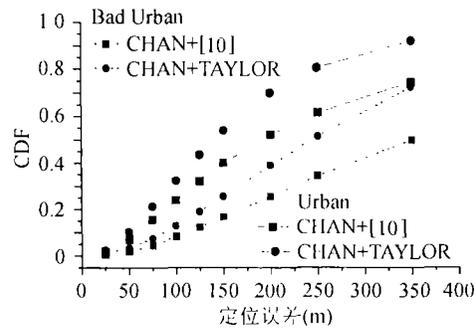


图 6 协同定位算法性能与 Chan+文献 [10] 算法性能比较

参 考 文 献

- [1] Caffery J Jr., Stüber G. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(4): 35-45.
- [2] 3GPP TS 22.071: 3GPP TS group services and system aspects, Location services(LCS), Services Description -stage 1, <http://www.3gpp.org/ftp/specs>.
- [3] Foy W H. Position location solutions by Taylor-series estimation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1976, AES-12(2): 187-193.
- [4] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, SP-42(8): 1905-1915.
- [5] Smith J O. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. *IEEE Trans. on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1987, ASSP-35(12): 1661-1669.
- [6] Deng P, Fan P Z. An efficient mobile location based positioning algorithm. IWADS'2000 Proceedings, Beijing, 2000: 34-38.
- [7] Reed J, Rappaport T. An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service. *IEEE Communications Magazine*, 1998, 36(4): 30-37.
- [8] Asplund H, *et al.*. A channel model for positioning. COST 259 TD20, Bern, Switzerland, 1998.
- [9] 邓平. 蜂窝网络移动台定位技术研究. [博士论文], 成都: 西南交通大学, 2002, 5.
- [10] Pi-Chun Chen. A non-line-of-sight error mitigation algorithm, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99), New Orleans, USA, 1999, 1(9): 316-320.

刘 林: 女, 博士生, 主要研究方向为无线定位、专用移动通信等.

邓 平: 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线定位、信号处理等.

范平志: 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信、网络与信息安全、信息与编码等.