

基于无线传感器网络的 TDOA - CTLS 定位算法研究

王 森, 白文乐

(北方工业大学 信息工程学院, 北京 100041)

摘 要: 节点位置的确定是无线传感器网络的应用基础. 为了提高传感器网络节点定位的精度, 利用转移矩阵和观测矩阵噪声之间的关系, 采用约束总体最小二乘算法求解时差定位问题. 通过将定位问题转化为一个约束总体最小二乘问题, 然后又将有约束问题等价于无约束的问题, 利用 Newton 算法进行迭代求解. 最后计算机仿真结果验证了该算法的有效性.

关键词: 定位跟踪; 约束总体最小二乘; 时差定位; 无线传感器网络

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7180(2010)04 - 0149 - 04

The Research of TDOA - CTLS Location Algorithm for WSN

WANG Sen, BAI Wen-le

(College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: The location of the node is the basis in the application of WSN. In order to improve the precision of the location, making use of the constraint relation between transfer matrix and observation matrix, the constrained total least square algorithm based on TDOA are applied. In this dissertation, this location algorithm is transformed into the criteria total least square algorithm issue, then, the criteria total least square algorithm is equaled to the non criteria total least square algorithm. Finally, target location can be estimated by Newton iterative and the computer simulation demonstrates its performance.

Key words: location tracking; CTLS; TDOA; WSN

1 引言

随着通信技术、嵌入式计算机技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟, 具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现. 由这些微型传感器构成的传感器网络引起了人们的极大关注. 这种传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和通信技术, 能够协作地实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息, 并把这些信息进行处理, 获得详尽而准确的信息, 传送到需要这些信息的用户^[1-2].

目前 WSN 中节点定位技术主要分成两大类: Range - Based 算法以及 Range Free 算法^[3]. Range

- Based 算法通过距离或者角度信息进行定位, 测距技术包括: 信号到达时间 (Time of Arrival, TOA)^[4]、信号到达时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA)^[5]、信号到达角度 (Angle of Arrival, AOA)^[6]、信号强度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI)^[7] 等. 此类算法需要额外的硬件支撑, 其定位精度较高. Range - Free 算法不需要测量节点间的距离和方位, 对硬件要求简单, 但定位误差较大, 满足部分不需要精度很高位置的场合. 其典型算法包括: 质心算法、DV - HOP 算法^[8-9]、Amorphous 算法、MDS - MAP 算法及 APIT 算法等.

文中将测距技术与参考节点 (beacons) 相结合, 利用转移矩阵和观测矩阵噪声之间的约束关系, 提出一种基于 TDOA 的约束最小二乘算法, 简称

收稿日期: 2009 - 03 - 23; 修回日期: 2009 - 06 - 25

基金项目: 北京市高等学校人才强教计划项目 (107052610764); 江苏省自然科学基金项目 (BK2008512)

TDOA-CTLS (Time Difference of Arrival-Criteria Total Least Square), 并进行了理论推导与算法性能分析, 与基于 TLS 的定位算法相比, 定位精度有明显改进。

2 无线传感器网络构成及定位原理

定位算法的基本原理是直接或间接测量节点之间的距离、方位或者其它连接性信息, 然后再根据这些信息计算网络中的所有节点的位置, 最后对得到的位置值进行修正, 提高定位精度减小误差。

假设一个 d 维空间中的无线传感器网络 N 由 m 个信标节点 (编号 $1 \sim m$) 和 $n-m$ ($n > m$) 个未知节点 (编号 $(m+1) \sim n$) 组成, $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表示这 n 个节点的位置, $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 表示 m 个信标节点的位置, Z 表示所有节点之间的距离向量, 那么定位问题就可以用下式来表示:

$$\{y_1, y_2, \dots, y_m, Z\} \xrightarrow{f} \{y_1, y_2, \dots, y_{n-m}\}$$

定位问题的关键就是要找到转化关系 f , 使这个关系式的前后保持一一对应, 转化关系 f 在具体的算法中可以是矩阵方程、坐标图等。

3 理想信道条件下 TDOA 定位的数学模型

假设观测站由 1 个主节点和 N 个辅节点组成, 目标辐射信号到达主节点和第 i 个辅节点的时间差为 Δt_i , 可以得到如下方程:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - \\ & \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \\ & = c\Delta t_i = \Delta r_i \\ & i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 为主节点的位置矢量, $[x_i \ y_i \ z_i]^T$ 为第 i 个辅节点的位置矢量, $[x \ y \ z]^T$ 为目标的位置矢量。

令:

$$r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$$

则 $\Delta r_i = r_0 - r_i$

对式(1)化简得:

$$(x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y + (z_0 - z_i)z = k_i - r_0\Delta r_i \quad (2)$$

其中

$$k_i = \frac{1}{2}(\Delta r_i^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2)$$

将式(2)写成线性方程组如下:

$$H_1 X_1 = Y_1 \quad (3)$$

其中

$$H_1 = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 & \Delta r_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 & \Delta r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0 - x_N & y_0 - y_N & z_0 - z_N & \Delta r_N \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_N]^T$$

$$X_1 = [x \ y \ z \ r_0]^T$$

3.1 转移矩阵与观测矩阵之间的约束性

由于估计值与真实值总是存在误差, 所以无法得到真实值 H_1^* 和 Y_1^* , 只能得到受噪声干扰的矩阵 H_1 和 Y_1 (即用估计值 $-\Delta r_i$ 代替矩阵 H_1^* 中的 $-\Delta r_i^*$), 若只考虑向量 Y 的噪声干扰, 则可以得到最小二乘意义下的解为^[5]:

$$X_{1LS} = (H_1^T H_1)^{-1} H_1^T Y_1 \quad (4)$$

若同时考虑 H 和 Y 的噪声干扰, 并且假设噪声的各分量统计独立, 则可以得到总体最小二乘意义下的解为:

$$X_{1TLS} = [v_5(2)/v_5(1), v_5(3)/v_5(1), v_5(4)/v_5(1)]^T \quad (5)$$

其中, v_5 为矩阵 $[-Y_1 \mid H_1]$ 进行奇异值分解后, 最小的奇异值所对应的右奇异向量, $v_5(i)$ 为向量 v_5 的第 i 个元素。

但是观察发现, H_1 和 Y_1 的噪声分量并不统计独立, 为了得到它们之间的关系, 令

$$\Delta t_i^* = \Delta t_i - n_i \Leftrightarrow \Delta r_i^* = \Delta r_i - cn_i \quad (6)$$

其中, Δt_i^* 和 Δr_i^* 分别是时差和距离差, n_i 是时间测量扰动。

3.2 基于 TDOA 的约束总体最小二乘定位算法

根据 3.1 节的分析, 有如下结果:

$$\begin{aligned} H_1^* &= \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 & \Delta r_1^* \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 & \Delta r_2^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0 - x_N & y_0 - y_N & z_0 - z_N & \Delta r_N^* \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 & \Delta r_1 - cn_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 & \Delta r_2 - cn_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0 - x_N & y_0 - y_N & z_0 - z_N & \Delta r_N - cn_N \end{bmatrix} \\ &= H_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -cn_1 \\ 0 & 0 & 0 & -cn_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -cn_N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= H_1 + [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad N_1] \quad (7)$$

$$Y_1^* = Y_1 + \begin{bmatrix} -cn_1 r_0 \\ -cn_2 r_0 \\ \vdots \\ -cn_N r_0 \end{bmatrix} = Y_1 + N_2 \quad (8)$$

其中 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ 为 N 行 1 列的全零向量,且 $N_2 = r_0 * N_1$

从式(7)、(8)中可以看出,矩阵 H 和 Y 所受到的噪声干扰来源于噪声向量 N_1, N_2 . 因此可以将定位问题转化为如下的一个约束总体最小二乘问题:

$$\begin{cases} \min_{X,E} \| [N_1 \quad N_2] \|_F^2 \\ \text{s.t.} [H_1 \quad Y_1] \begin{bmatrix} X_1 \\ -1 \end{bmatrix} + [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad N_1 \quad N_2] \\ \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

可以看出,式(9)中的约束条件使算法对噪声有明显的抑制作用.

有约束的总体最小二乘算法可以转化为无约束的总体最小二乘算法^[10]. 对于文中 TDOA-CTLS 算法至少需要四个站($L=4$),应用如下:

若令 $H_X = \sum_{j=1}^L a_j F_j - F_{L+1}$, $G = \sum_{j=1}^{L+1} F_j^T F_j$, $C = [HY]$, 则式(9)可以转化为如下无约束的优化问题:

$$\min_X \begin{bmatrix} X \\ -1 \end{bmatrix}^T C^T (H_X G^{-1} H_X^T)^{-1} C \begin{bmatrix} X \\ -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 算法性能分析

仿真过程中假设在一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的区域中,存在一个主节点,4 到 7 个辅节点. 移动节点在正方形区域按照均匀分布随机出现且限定在参考节点范围之内. 为简单起见只考虑可靠接收参考节点信号的情况.

对运动目标进行定位跟踪,并与总体最小二乘算法、CRLB 限进行比较. 第 j 次实验估计出目标在 k 个参考节点时的坐标为 $(x_k^{(j)}, y_k^{(j)})$, 真实坐标为 (x_k^*, y_k^*) , 定义距离的相对误差如下:

$$\delta_{r_k} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\sqrt{(x_k^{(j)} - x_k^*)^2 + (y_k^{(j)} - y_k^*)^2}}{\sqrt{x_k^{*2} + y_k^{*2}}}$$

其中, N 为 Monte Carlo 仿真次数.

图 1 给出了 TDOA-CTLS 算法的相对距离误差曲线.

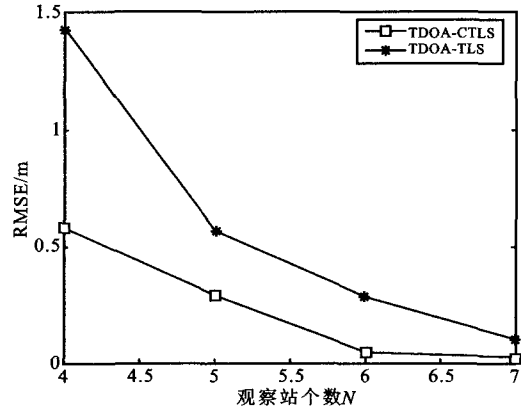


图 1 基于 TDOA 的 CTLS 和 TLS 算法的相对距离误差曲线

可以看出, TDOA-CTLS 算法在参考节点数少时,定位算法相对距离误差较大,但随着参考节点数目增多, TDOA-CTLS 算法定位误差也随之减小. 相比之下, TDOA-TLS 算法在参考节点不多时,相对距离误差比 TDOA-CTLS 要小,而当参考节点数目增多的情况下 TDOA-CTLS 算法性能优于 TDOA-TLS 算法.

下面的仿真中参考节点分布在的区域,如图 2 实心圆点所示. * 表示移动节点的真实位置, $\circ$ 表示通过 CTLS 算法估计出的结果.

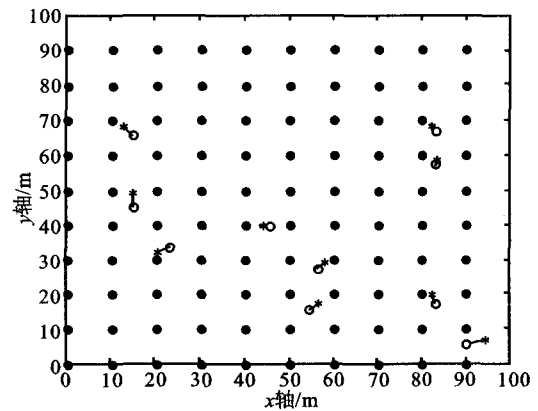


图 2 无线传感器网络拓扑及移动点定位图

总体上看,当移动节点靠近区域中心位置时,定位估算较区域边界处精确,但不排除如果中间有障碍物造成 NLOS, 从而影响定位算法的准确性.

图 2 是在 $0 \sim 100\text{m}$ 之间等间隔取 10 个节点(距离中心参考节点 5m 处开始),并且假定在没有噪声干扰的情况下进行定位算法仿真. 从图中可以看出 TDOA-CTLS 算法性能要优于 TDOA-TLS 算法^[11].

定位算法流程如图 3. 算法最后采用循环求精的方法对初始位置 $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$ 进行校正,基本原理是:

找一个使测距离与估算距离之间差异最小的样本,按照泰勒级数在近似位置 $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$ 展开,便可将位置偏移 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ 表示为已知坐标和距离测量值的线性函数.

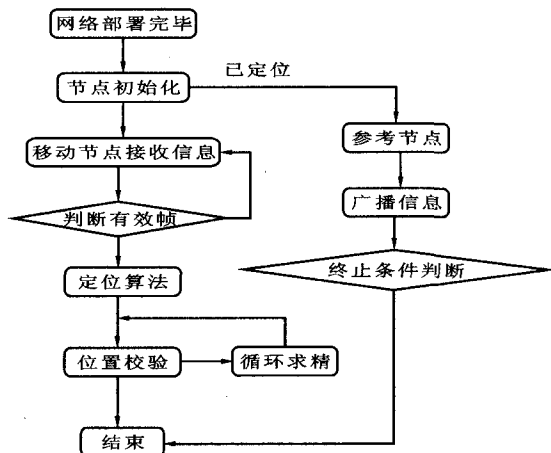


图3 算法流程图

如果精度不满足要求,可以将矫正后的坐标代替估计坐标,即: $\hat{x}_0 = \hat{x}_0 + \Delta x_0$,对位置进行进一步的矫正,直到 $\Delta x_0, \Delta y_0$ 小于规定的门限值结束.

参考文献:

- [1] Cullar D, Estrin D, Strvastava M. An overview of sensor network[J]. Computer, 2004, 37(8):41-49.
- [2] Warneke B, Last M, Liebowitz B, et al. Smart dust: communicating with a cubic - millimeter computer[J]. IEEE Computer Magazine, 2001, 34(1):44-51.
- [3] He T, Huang C, Blum B M, et al. Range-Free localization schemes for large scale sensor networks[C]// Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom). San Diego, California, USA: ACM Press, 2003: 81-95.
- [4] Hofman - Wellenhof, Lichtenegger H, Collins J. Global positioning system: theory and practice [M]. Austria: Springer Verlag, 1997.
- [5] Savvides A, Han C, Srivastava M. Dynamic fine grained localization in Ad-Hoc networks of sensors[C]// Proceedings of ACM MobiCom. Israel, 2001:166-179.
- [6] Niculescu D, Nath B. Ad Hoc positioning system (APS) using AOA[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. San-fransisco, 2003:1734-1743.
- [7] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in-building RF based user location and tracking system[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM. Isreal, 2000:775-784.
- [8] Niculescu D, Nath B. Localized positioning in Ad Hoc networks[C]// Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. [S. L.], 2003:267-280.
- [9] 史庭俊, 桑霞, 徐力杰, 等. 一种基于信任度的 DV-Hop 改进定位算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10): 100-102.
- [10] 孙利民. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [11] 马振强, 李国林. 符合 IEEE 802.15.4 标准的收发机结构设计[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1):173-175.

作者简介:

王 森 男, (1983-), 硕士. 研究方向为通信信号处理、无线传感器网络.

白文乐 男, (1967-), 副教授. 研究方向为无线通信信号处理、无线传感器网络、多载波通信.