

基于 RSSI 和改进 MCL 算法的移动节点定位跟踪设计

孔素真, 孙雅娟

(河南牧业经济学院 信息工程系, 郑州 450011)

摘要: 由于传统节点定位方法大多针对静止传感器网络, 不能适用于网络结构和节点位置动态变化的移动传感器网络, 提出了一种基于 RSSI 测距和改进的 MCL (Monte Carlo Localization) 算法的移动传感器节点定位跟踪方法; 首先描述了经典 MCL 算法和接收信号强度 RSSI 测距方法, 然后设计了一种改进的 MCL 算法, 将传统的 MCL 方法预测粒子位置的过程即预测和滤波两个阶段, 更新为锚节点 TTL 受控泛洪方式广播自身位置、采用拉格朗日插值法预测节点下一时刻的位置和速度、求取锚盒采样区域、k 跳锚节点粒子滤波和根据预测下一时刻的节点位置和速度与当前时刻的位置信息确定各粒子权重的 5 个阶段; 采用仿真器 MCL-Simulator 进行仿真, 结果证明: 文中方法能有效实现移动节点的定位, 与其它方法相比, 具有较小的平均定位误差, 具有很强的可行性。

关键词: 移动节点; 定位跟踪; 蒙特卡罗; 粒子

Locating and Tracking for Mobile Sensor Node Based on RSSI and Improved MCL Algorithm

Kong Suzhen, Sun Yajuan

(Information Engineering Department, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Aiming at the traditional localization method usually aiming at the static wireless sensor network, can not suit the mobile sensor network with dynamic changing network structure and node distance, a locating and tracking method for mobile sensor node was proposed based on RSSI and improved MCL. Firstly, the RSSI ranging distance method and classic MCL was introduced, then an improved MCL algorithm was proposed by renewing the process of classic MCL such as predicating and filtering to five stages as anchor node broadcast its position using limit TTL flooding protocol, using Lagrange interpolation to predict the position and speed in the next time, obtaining anchor sampling area, particle filter and according the predicting position and speed in the next time and the current position to weight particle. The experiment was simulated in the MCL-Simulator shows the method in this paper can realize the node moving, compared with the other methods, it has less average locating error, so it has big feasibility.

Key words: mobile node; locating and tracking; Monte Carlo; particle

0 引言

无线传感器网络是由监测区域中的传感器节点通过无线自组织的方式连接而成, 已经成功地应用于国防军事、环境监测、智能安防等领域^[1-2]。

目前已有的定位^[3]系统主要可以分为基于测距 (Ranged-Based)^[4-5]的方法和无需测距 (Range-Free)^[6-7]的方法两类。但都仅适合静止传感器网络, 算法精度随着节点运动而急剧下降。

文献 [8] 设计了一种针对低锚节点密度的移动传感器网络的节点定位方法。文献 [9] 通过判断式筛选出定位精度高的节点, 通过裁剪蒙特卡罗盒限定样本范围, 最后通过粒子滤波对节点进行精确定位。文献 [10] 设计了针对移动无线传感器网络提出了一种改进的蒙特卡罗定位方法, 通过对采样区域进行改进, 并对节点以往位置信息进行插值获得节点位置和速度。

上述算法能克服传统定位方法无法解决移动传感器网络的缺点, 但其缺点是当锚节点密度低时定位精度不高, 同时需要大量计算, 为此, 本文设计了一种改进的基于 MCL 的节点定位方法, 并通过实验证明了其有效性。

1 MCL 算法

蒙特卡罗节点定位 (Monte Carlo Localization, MCL) 是由 Hu 等首次提出^[11], MCL 方法充分利用了节点^[12]的移动性进行定位, 是一种与测距无关的算法, 能对非线性和非高斯状态进行次优贝叶斯估计, 将节点出现在某个位置的后验概率密度分布函数通过加权粒子表示为:

$$p(x_t | z_{1...t}) = \sum_{i=1}^N w_i \delta(x_t - x_i) \quad (1)$$

其中: x_i 表示当前时刻预测的粒子位置, w_i 表示每个粒子对应的权值, 由于粒子当前的位置和权重与前一时刻的粒子位置以及当前观察信息符合马尔科夫过程, 因此, 当状态转移概率和观察似然函数分别为 $p(x_t | x_{t-1})$ 和 $p(z_t | x_t)$, 节点位置估计的后验概率可以表示为:

$$p(x_{t-1} | z_{1...t-1}) \rightarrow p(x_t | z_{1...t-1}) \rightarrow p(x_t | z_{1...t}) \quad (2)$$

MCL 算法的流程可以表示为预测和过滤两个阶段。

收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-02-22。

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目 (122102210487)。

作者简介: 孔素真 (1972-), 女, 河南滑县人, 硕士, 实验师, 主要从事 WSN 定位技术方向的研究。

(1) 预测：假设 $t-1$ 时刻时节点位置为 l_{i-1} ，节点最大运动速度为 v_{max} ，样本个数为 Q ，则 t 时刻时节点位置集合 L_t 位于以 l_{i-1} 为圆心和 v_{max} 为半径的圆形区域，从圆形区域中选择指定数目的样本点作为 L_t 。

(2) 过滤：根据移动节点与一跳锚节点和二跳锚节点之间的距离约束，将 L_t 中不符合要求的样本点删除，得到更新的样本集 L_t ，判断样本集 L_t 中的样本数是否小于 Q ：

如果小于，则循环执行 (1) 和 (2) 直到 L_t 中的过滤后的样本数为 Q ；

否则，对样本进行加权求平均，估算出节点位置。

上述算法存在的不足为：

(1) MCL 算法仅利用了前一时刻的节点位置，没有利用以前的更多历史时刻的信息；

(2) 算法的采用区域仅设定以上一时刻节点位置为圆心，以 v_{max} 为半径的圆形区域，没有利用更多的锚节点来减小粒子位置范围，从而提高预测的精度。

2 基于 RSSI 测距和改进 MCL 算法移动节点定位

2.1 RSSI 测距

接收信号强度指示 (Received Signal strength indicator, RSSI) 能指示当前介质中电磁波能量，而 RSSI 测距原理则是将收发节点之间的信号衰减程度转换为信号传播距离，然后依据已知节点坐标和它们之间的距离计算节点位置。

在监测环境中，RSSI 传播信号受到多路径和非视距等因素的影响，衰减量会因为环境变化而发生变化，因此通过对数一常态模型来对信号传输进行建模，如下所示：

$$PL(d_{ij}) = \overline{PL}(d_0) + 10\rho\lg\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + \mu_\sigma \quad (3)$$

式中， d_0 为近地参考距离， d_{ij} 为未知节点 i 和已经节点 j 之间的距离， $\overline{PL}(d_0)$ 表示传播距离为 d_0 时，未知节点 i 接收到的已经节点 j 的信号强度 (dB)， $PL(d_{ij})$ 表示传播距离为 d_{ij} 时未知节点 i 接收到的已经节点 j 的信号强度 (dB)， ρ 为路径损耗系数， μ_σ 满足均值为 0 方差为 σ^2 的高斯分布，其单位为 dB。

将式 (3) 两边取对数，则未知节点 i 收到的 RSSI 值与它与已知节点距离 j 的对应关系可以表示为：

$$RSSI(d_{ij}) = \delta_0 - 10\rho\lg d_{ij} + \mu_\sigma \quad (4)$$

在式 (4) 中， $RSSI(d_{ij})$ 为未知节点 i 收到的已经节点 j 发射信号的 RSSI 值， δ_0 表示发射信号传播距离为 d_0 时的接收信号功率，其可以表示为：

$$\delta_0 = 10\lg P_r(d_0) \quad (5)$$

因此，未知节点 i 和已经节点 j 之间的距离可以表示为：

$$d_{ij} = 10^{\frac{\delta_0 - RSSI(d) + \mu_\sigma}{10 \cdot \rho}} \quad (6)$$

2.2 锚节点 TTL 广播信息

初始时刻，锚节点通过泛洪方式发送自己的位置信息，根据网络中锚节点的密度，采用 TTL 对信息发送跳数 k 进行限制，当网络部署区域中的锚节点密度较大时，当锚节点密度较小时，设置较大的 k 值，否则，设置较小的 k 值，节点收到各锚节点发送的泛洪数据包后，将跳数信息、RSSI 强度信息和锚节点位置信息保存起来。

2.3 节点位置和速度预测

由于节点不会完全随机运动，节点运动过程也通常是平滑和连续的，因此，可以通过节点历史预测位置信息，采用插值

法对其在 t 时刻的位置和速度进行预测。

假设从 1 到 $t-1$ 时刻的节点的位置为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{t-1}, y_{t-1})$ ，则采用拉格朗日插值获得的节点在 t 时刻的位置可以表示为：

$$\begin{cases} x_t = \sum_{i=1}^{t-1} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^{t-1} \frac{t_i - t_j}{t_i - t_j} \right) x_i \\ y_t = \sum_{i=1}^{t-1} \left(\prod_{j=1, j \neq i}^{t-1} \frac{t_i - t_j}{t_i - t_j} \right) y_i \end{cases} \quad (7)$$

式中， (x_t, y_t) 表示 t 时刻时节点的预测位置，采用其对时间进行微分可以获得 t 时刻时节点在 x 方向的运动速度 v_{xt} 和 y 方向的运动速度 v_{yt} 。

2.4 锚盒采样区域

未知节点 i 在收到各锚节点的泛洪发送信息后，假设 k 跳锚节点的个数为 n_k ，则未知节点 i 在 t 时刻的采样区域即锚盒对应的 x 坐标的最大值 x_{max} 和最小值 x_{min} ，以及 y 坐标的最大值 y_{max} 和最小值 y_{min} 可以表示为：

$$\begin{cases} x_{max} = \min_{\sum_{j=1}^{n_k} (x_{mdej} - kr)} \\ x_{min} = \max_{\sum_{j=1}^{n_k} (x_{mdej} + kr)} \\ y_{max} = \min_{\sum_{j=1}^{n_k} (y_{mdej} - kr)} \\ y_{min} = \max_{\sum_{j=1}^{n_k} (y_{mdej} + kr)} \end{cases} \quad (8)$$

其中， (x_{mdej}, y_{mdej}) 为锚节点 j 的坐标值， r 为根据式 (6) 估计的未知节点与锚节点之间的平均距离，因此， kr 即为未知节点与二跳锚节点的距离。

为了对节点进行更为精确的定位，将上一时刻的节点位置考虑进来，则得到的锚盒子的尺寸如下所示：

$$\begin{cases} x_{max}' = \min(x_{max}, x_{t-1} - v_{max}) \\ x_{min}' = \max(x_{min}, x_{t-1} + v_{max}) \\ y_{max}' = \min(y_{max}, y_{t-1} - v_{max}) \\ y_{min}' = \max(y_{min}, y_{t-1} + v_{max}) \end{cases} \quad (9)$$

则最终得到的采样盒子如图 1 中灰色阴影部分所示。

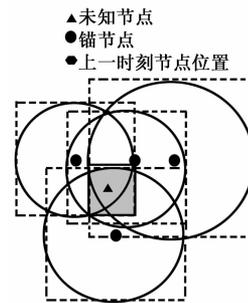


图 1 锚盒采样区域

从图 1 所示的锚盒采样区域中选取个数预设值为 M 的样本点进行粒子滤波。

2.5 粒子滤波

经典 MCL 滤波方法的滤波方法即为根据一跳和二跳锚节点 j 与未知节点 i 的距离来进行滤波，在文中由于引入了 k 跳锚节点，因此，将节点 j 与未知节点 i 的距离定义为：

$$0 \leq d(i, j) \leq R \wedge R \leq d(i, j) \leq 2R \wedge \dots \wedge d(i, j) \leq kR \quad (10)$$

式中, $d(i, j)$ 表示根据式 (6) 计算的未知节点 i 与锚节点 j 之间的距离, 当其距离不满足公式 (10) 所述的条件时, 该样本可以保留, 否则重新从图 1 所示的采样区域中选择若干采样点, 继续进行滤波, 直到符合过滤条件的采用点达到预设值 M 为止。

2.6 位置估计

在选择了指定数目的粒子后, 就采用粒子位置的加权平均和表示粒子的位置估计值:

$$x_t = \sum_{i=1}^M l_i / M \quad (11)$$

式中, l_i 为第 i 个采样粒子位置, $1/M$ 为第 i 个采样粒子的权值。

式 (11) 对每个样本取相同的权值, 为了对其进行改进, 将通过拉格朗日插值获得的 $t+1$ 时刻粒子的运动位置 x_{t+1} 与当前位置 x_t 的夹角 $\vec{\theta}$ 以及当前时刻粒子的运动方向 v_t , 当前位置 x_{t+1} 为 x 轴, 以锚盒内接圆心为圆点建立坐标系, 以将粒子划分为权值区域:

当位于区域 1 时, 即 x_{t+1} 与 x_t 之间的角度为 $\vec{\theta}$ 时, 权值最大, 设为 w_1 ;

当位于区域 2 时, 即 x_{t+1} 与 x_t 之间的角度为 $90 + \vec{\theta}$ 时, 权值次之, 设为 w_2 ;

当位于区域 3 时, 即 x_{t+1} 与 x_t 之间的角度为 $180 + \vec{\theta}$ 时, 权值小于 w_2 , 设为 w_3 ;

否则, 权值最小为 w_4 。

其中, w_1, w_2, w_3 和 w_4 满足: $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$, 如图 2 所示。

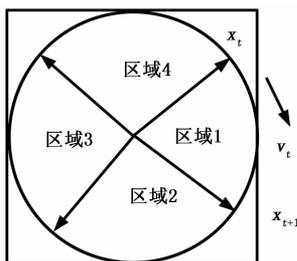


图 2 权值划分区域

因此, 最终的移动节点位置估计值可以表示为:

$$x_t = \sum_{i=1}^4 w_i \left(\sum_{j=1}^{n_i} l_j / n_i \right) \quad (12)$$

3 仿真实验

为了对文中方法进行验证, 采用仿真器 MCL-Simulator 进行仿真, 将 300 个节点随机部署在 400×400 之间的矩形区域中, 其中, 所有节点通信半径 R 为 40, RSSI 取值范围为 $(-98 \text{ db}, -15 \text{ db})$, 节点移动最大速度 v_{\max} 为 2.3 m/s, 粒子样本最大数目预设值 M 为 50, 将文中方法与文献 [9] 和文献 [10] 方法进行对定位误差率随锚节点密度变化和移动节点速度变化的情况进行仿真和比较, 其中, 节点定位误差为:

$$E = \frac{(x - x_i)}{R} \quad (13)$$

式中, x 表示待定位节点的真实值, x_i 表示节点位置估计值。

节点平均定位误差随锚节点密度变化的曲线得到的结果如

图 3 所示。

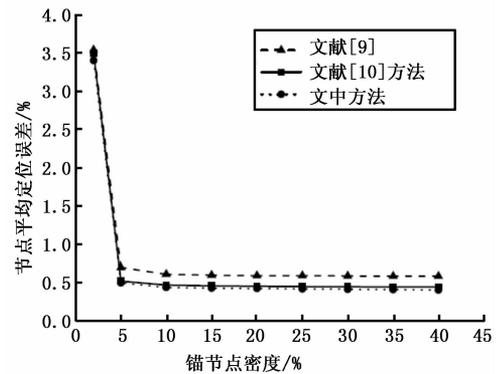


图 3 定位精度随锚节点密度变化曲线

从图 3 中可以看出, 3 种方法在锚节点密度小于 0.03 时定位误差较大, 在锚密度大于 0.03 后, 节点平均定位误差均随着锚节点密度增加而降低, 但文中方法的定位精度在仿真期间始终最高, 同时文中方法收敛速度最快, 在锚节点密度为 0.05 时就已经趋于收敛。

节点平均定位误差随节点运动速度变化的曲线如图 4 所示。

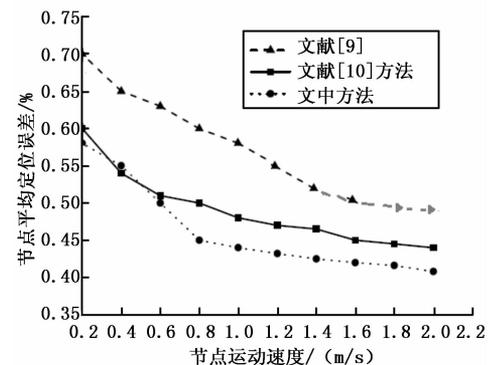


图 4 定位精度随节点运动变化曲线

从图 4 中可以看出, 随着节点运动速度的增加, 3 种方法的节点定位精度均降低, 但文中方法对应的平均定位误差仍然最低, 这是因为文献 [9] 随着速度增加, 采样区域增加, 因此, 采用成功率反而降低, 因此具有较大的误差; 而文献 [10] 通过锚节点限制了采样区域, 因此误差较文献 [9] 降低, 文中方法通过锚节点和上一时刻节点位置共同确定锚盒, 同时根据 k 跳锚节点进行过滤, 根据预测的运动方向和位置进行样本赋权, 因此, 具有较高的定位精度。

4 结语

传感器节点的位置信息对于监测区域的无线传感器网络的监测性能至关重要, 为了实现对移动节点的定位, 文中提出了一种基于 RSSI 和改进 MCL 的移动节点跟踪定位方法。首先给出了将 RSSI 信号强度转化为节点与锚节点距离的方法, 然后对传统的 MCL 算法从预测下时刻位置和速度、确定锚盒采用区域、粒子滤波和位置估计等方面进行改进。仿真实验表明, 文中方法能准确地实现移动节点, 较其它方法具有较小的节点定位误差。

(下转第 1643 页)

表 1 3 种 δ 星座方案的星座参数

输入参数	方案一	方案二	方案三	备注
星座类型	0	0	0	代表星座
卫星总数	10	10	10	代表卫星颗数
相位参数	0	0	0	单位:°
轨道平面数	10	5	2	代表轨道面数
轨道类型	0	0	0	代表回归轨道
回归天数	8	8	8	单位:天
轨道倾角	42	42	42	单位:°
轨道高度	4 182	4 182	4 182	单位:km
起始升交点赤经	59.5	59.5	59.5	单位:°
起始近地点幅角	0	0	0	单位:°
起始真近点角	0	0	0	单位:°

表 2 3 种方案的覆盖结果

指标	方案一	方案二	方案三
区域覆盖时间百分比(%)	15.13	52.74	94.75
区域覆盖百分比(%)	100.00	100.00	100.00
区域覆盖次数	40	65	30
区域总覆盖时间(s)	104 601.50	364 510.50	654 930.53
区域平均覆盖间隙(s)	13 966.64	5 537.11	1 250.67
区域平均覆盖时间(s)	2 615.03	5 607.85	21 831.02
区域最大覆盖间隙(s)	43 217.53	16 341.50	3 199.09
同时覆盖区域的最大卫星数	3	2	1
同时覆盖区域的最小卫星数	1	0	0
区域覆盖平均响应时间(s)	71.85	28.09	5.82

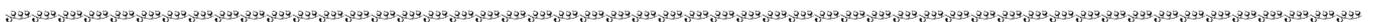
6 结束语

本文设计了一种卫星组网可视化仿真系统，介绍了系统

的总体结构和信息流程，设计了系统的星下点计算模型、覆盖角计算模型等关键模型，并利用该系统进行了卫星组网仿真实验。该系统可实现多种组网方案下的卫星组网可视化，给出组网星座的对地通信覆盖性能指标值，并将该系统仿真得到的结果与 STK 仿真软件运行结果进行比较，其计算精度比 STK 软件的计算结果提高 12%。该仿真系统实现了空间卫星组网的可视化，提高了组网评估能力，具有重要的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 郭文韬, 郭道省, 李 湘, 等. HAPS 系统与卫星通信系统综合组网研究 [J]. 无线通信技术, 2012, (1): 26-32.
- [2] 董加强, 任 松. 基于 OpenGL 的卫星在轨运行可视化仿真系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (6): 824-826.
- [3] 韩晓东, 翟正军, 陆艳洪. 基于 PCI 总线的多功能可定制数据采集系统 [J]. 测控技术, 2011, 30 (10): 15-18.
- [4] 赵 砚. 低轨星座的目标跟踪算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [5] 杨平利, 黄少华, 江 凌, 等. 卫星运行三维场景及星下点轨迹可视化研究 [J]. 计算机工程与科学, 2012, 34 (5): 101-106.
- [6] 沈 峰. 卫星星座网络路由算法研究及可视化平台设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [7] 李朝瑞. 卫星星座链路选择方法仿真 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [8] 张育林, 范 丽, 张 艳. 卫星星座理论与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.



(上接第 1639 页)

参考文献：

- [1] Gomez C, Paradells J. Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies [J]. Consumer communications and networking, 2010 (6): 92-101.
- [2] 魏叶华, 李仁发, 罗 娟, 等. 基于动态网格划分的移动无线传感器网络定位算法 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45 (11): 1920-1927.
- [3] Mrityunjay S, Monika S, Niranjana L, et al. A tree based routing protocol for mobile sensor networks (MSNs) [J]. International journal on computer science and engineer, 2010, 2 (15): 55-60.
- [4] 孙泽宇, 亢金轩, 李 蒙. 基于 WSN 改进 RSSI 井下定位算法设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1758-1763.
- [5] Lee E F, Chen W, Li X. A study of radio signal behaviors in complex environments [R]. Michigan: Computer Science Department, Michigan State University, 2006.
- [6] Liu J C, Wang W X, Shang Y T. An Improving Localization Algo-

- rism for wireless sensor networks based on DV-Hop [A]. Proceedings of the international conference on measurement, information and control [C], Harbin, 2012.
- [7] 朱 博, 陈 曙. 一种无线传感器网络质心定位改进算法 [J]. 传感器技术学报, 2010, 23 (6): 868-872.
- [8] 王 洁, 王洪玉, 高庆华, 等. 一种适用于移动传感器网络的增强型蒙特卡罗定位跟踪算法 [J]. 2010, 4 (32): 865-858.
- [9] 梅 举, 陈 涤, 辛 玲. 基于蒙特卡罗的移动传感器节点定位优化算法 [J]. 传感技术学报, 2013, 5 (26): 689-694.
- [10] 叶飞虎, 沈 航, 曹 磊, 等. 移动无线传感器网络采样区域自调整的 MCL 定位算法 [J]. 计算机科学, 2011, 12 (38): 49-53.
- [11] Hu L X, Evans D. Localization for Mobile Sensor Networks [A]. Proceedings of ACM MobiCom [C], Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2004: 45-57.
- [12] 蒲晓湘, 刘珍杰. WIA-PA 网络中的基于节能的 AODV 路由算法改进 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1246-1248.