

基于移动节点的无线传感器网络节点定位新算法^①

刘晨旭^② 刘 云^③

(北京交通大学电子与信息工程学院通信与信息系统北京市重点实验室 北京 100044)

摘 要 针对现有基于移动节点的无线传感器网络节点定位算法精度不高、能耗大的问题,提出了一种新的利用移动节点定位未知节点的算法。该算法通过移动节点在未知节点所处区域按照一定的移动模式进行移动,周期性地广播信标点的位置信息,未知节点接收信标点,收集信标点的位置信息;根据信标点的位置信息和接收信号的强度,同时结合移动节点的移动规律,利用几何原理,对未知节点的位置进行多次限定,从而实现未知节点的定位。仿真结果表明,与其他定位算法相比,该算法能有效地提高节点的定位精度、稳定性和能量利用效率。

关键词 无线传感器网络, 移动节点, 定位算法, 接收信号强度, 几何原理

0 引 言

节点定位技术是无线传感器网络应用的支撑技术之一,在网络覆盖、节点部署、节点交换、对象追踪等很多方面都发挥了相当关键的作用。近年来,研究人员提出了一些基于移动节点定位未知节点的算法,研究表明,使用移动节点进行定位要比使用静态节点定位更加有效和精确。Ssu 等人提出了一种基于移动节点的定位算法,即 Range-free 算法^[1],该算法基于几何原理中的“弦的垂直平分线经过圆心”的性质,选择性地求出两组移动信标点位置连线的垂直平分线的交点,并用该交点的坐标作为未知节点坐标的估算值。Ssu 的算法对不恰当信标点的选择会导致弦的垂直平分线偏离未知节点,出现定位大幅度偏差。为了克服这种状况,Ssu 等人提出了一个弦的选择方法,限定弦的长度必须超过一个门限值。虽然利用门限值能够提高节点定位的精确度,但大大提高了网络的能量消耗。Liang 等对 Ssu 的算法进行了改进,利用 Levenberg-Marquardt 方法得到初始位置,然后利用高斯方法反复进行计算,使得节点定位的结果更加优化,但反复的计算带来了较大的能量损耗^[2]。Zhang 等充分利用了方向性天线某一方向的信息回收率高和覆盖范围小等特性,

提出了一种基于带有方向性天线的定位算法^[3]。Chen 等人通过移动节点的定位功能确定未知节点的参考点,利用最小均方差(MMSE)算法和参考点的位置信息估算未知节点的位置,实现了较好的定位精度和较少的能量消耗^[4]。Chen 等人利用移动节点和静态节点之间合作,考虑到节点的交替利用性,对节点信号的利用实现最优化,实现了定位算法克服了无线不规则性和障碍物的影响^[5]。Lee 等人针对移动节点精度会导致大幅度定位偏差的状况,提出了利用几何计算精确计算未知节点的位置,有效地提高了定位精度^[6]。这些算法都是根据移动节点产生的信标点的具体信息来计算未知节点的具体位置。本研究主要是通过移动节点的运动模式与信标点的能量信息相结合,对 Ssu 的算法进行改进,提出一种新的基于移动节点的定位算法。该算法利用三个信标点的位置信息,通过移动节点的移动模式、信标点的能量信息以及几何原理,限定未知节点所在的区域,从而估算出未知节点的具体位置,并且实现了降低网络能耗的状况。

1 算法策略

1.1 移动节点的移动策略

为了定位网络内的未知节点,移动节点以固定

① 863 计划(2011AA010104-2)和国家自然科学基金(61071076)资助项目。

② 男,1986 年生,博士生;研究方向:无线传感器网络,智能电网;E-mail: 09111001@bjtu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: liuyun@bjtu.edu.cn

(收稿日期:2011-10-13)

的速度在网络检测区域中按照随机航线点(random waypoint, RWP)运动模型^[7]进行直线运动,移动方向是随机产生的。因此,移动节点的运动轨迹是一系列的直线组成的。另外,移动节点按照一定周期向周围广播信标点,相邻的信标点之间的距离是相同的。每个信标点携带着具体的位置信息,以此作为未知传感器节点定位的参考。图 1 示出了移动节点移动的一个轨迹范例,移动节点按照周期 t 向周围广播信标点,相邻信标点之间的距离是 d 。其中,信标点 B_1, B_2, B_3, B_4 处在未知节点的感应范围内,信标点的位置信息能够被未知节点接收到。

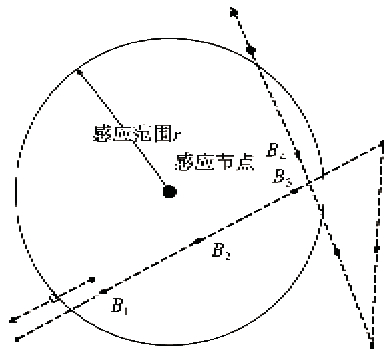


图 1 移动节点的移动轨迹

1.2 信标点的选择策略

本文的算法至少选择三个信标点对未知节点进行定位,移动节点在移动过程中周期性地广播信标点的位置信息,信标点携带的信息包括移动节点的 id、位置坐标、信号的发射时间 T_{send} 等。当未知节点接收到信标点时,检查未知节点的信标点列表中是否存在该移动节点的信标点信息。若不存在,则把移动节点的信标点的信息增加到列表中;若存在,检查两个信标点信号的发送时间,如果两个信标点的发送时间的差大于移动节点广播信标点的周期,则表明移动节点在移动过程中有一段时间不在未知节点的感应范围内,那么未知节点列表上原有的信标点被选为定位所需的信标点,反之,则替换掉原有的信标点的位置信息。信标点的选择策略就是选择信标点离开未知节点感应范围前的最后一个位置,作为定位算法使用的位置信息,如图 2 所示, B_1, B_2, B_3 是已经选择的信标点。

按照信标点的选择策略,移动节点离开未知节点感应范围前,信标点的位置到未知节点感应范围的边界的距离必然小于等于移动节点每周期的移动距离 d 。因此,选择的这三个信标点位置都是在以未知节点为圆心,以 r 和 $r - d$ 为半径的环形区域内。

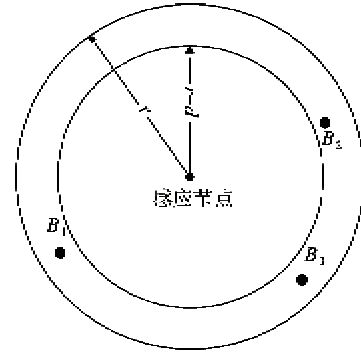


图 2 信标点的选择策略

同时,未知节点也同样在以信标点为圆心,以 r 和 $r - d$ 为半径的环形区域内。

1.3 网络环境设置

在网络环境中,移动节点发出的信标点信号能量是相同的,传输过程中信号强度服从接收信号理论方程: $P_R(d) = P_T - PL(d_0) - 10\eta \lg(d/d_0) + X_\sigma$, 其中 P_R 是接收信号的强度, P_T 是发送信号时的强度, d_0 是一个距离常数, d 是信号传输的距离, X_σ 是服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。信号传输距离的不同,必定会导致未知节点接收到的信号强度不同。根据以上公式,可以得出结论:信号传输距离越长,信标点信号到达未知节点时消耗的能量就会越多,未知节点接收到的信号强度就相对较少。因此,根据未知节点接收到的信标点信号强度可以对未知节点的位置区域进行一定的限定,如图 3 所示。图中 A 和 B 是已经选择的信标点, N 是未知节点,直线 PQ 是信标点 A, B 连线的垂直平分线。已知接收信号的强度 $P(A) > P(B)$ 。按照本文对网络环境的假设,未知节点 N 到达信标点 A 的距离小于 N 到达 B 的距离,即 $L(NA) < L(NB)$ 。所以, N 的位置在直线 AB 的垂直平分线的靠近 A 的一侧,即未知节点 N 应该处于区域 1 内。反之,当 $P(A) < P(B)$ 时,未知节点 N 处于区域 2 内。

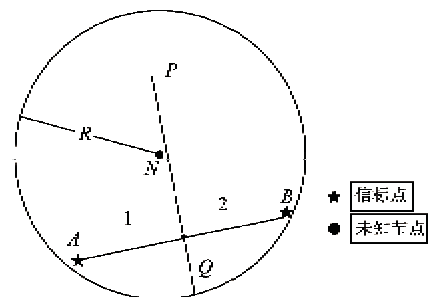


图 3 接收信号强度对未知节点位置的限定

2 算法描述

算法实现的步骤具体描述如下:

(1) 移动节点在整个网络中按照设定的模型移动:移动节点基于随机航线点(RWP)运动模型进行直线移动,周期性发送信标点,信标点携带的信息包括移动节点的编号、位置坐标等。同时,信标点信号的发射能量都是相同的,便于保证信标点信号的一致性。

(2) 未知节点接收信标点的位置信息并储存:当移动节点进入到未知节点的感应范围内时,未知节点接收到移动节点广播的信标点,按照信标点的选择策略,未知节点不断地更新信标点列表,把符合选择策略的信标点存储起来,用于节点的定位。

(3) 根据几何原理,对未知节点所在区域的限定:根据信标点的选择策略,未知节点都位于以信标点的位置为圆心,以 r 和 $r-d$ 为半径的环形区域内。不同信标点决定的环形区域不同,两个环形相交的地方就是未知节点所在区域。我们选择3个信标点 B_1, B_2, B_3 , 坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 。由于未知节点的感应半径为 r , 移动节点每次移动的距离为 d , 所以未知节点必然位于以信标点 B_1, B_2 为圆心, r 和 $r-d$ 为半径的圆环的区域内,感应节点的位置就位于以下两个环形的相交的区域:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \leq r^2 \\ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \geq (r-d)^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \leq r^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \geq (r-d)^2 \end{cases} \quad (1)$$

由于移动节点周期移动距离 d 和信标点之间距离 D 的不同,可以使得两个环形相交的范围不同,得到3种不同的相交情况,其中 B_1, B_2 两个信标点之间的距离为 $D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ 。讨论如下:

(i) 当 $2r-d < D < 2r$ 时,两个环形只有外圆才能相交,如图4所示。其中,两个环形外圆的交点为 P_1, P_2 , 环形相交构成了区域 AP , 即未知节点所在区域。

(ii) 当 $2(r-d) < D < 2r-d$ 时,两个环形外圆相交且内圆与另外一个环形的内圆相交,如图5所示。其中,两个环形得到交点为 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$, 构成了相交区域 AP , 即未知节点所在区域。

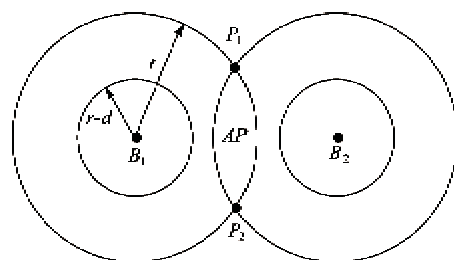


图4 情况 i 的未知节点的估算区域

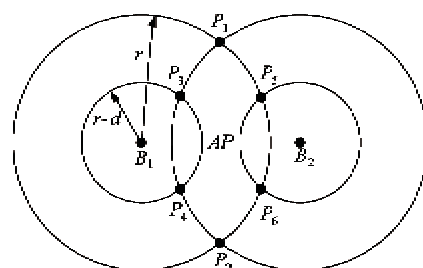


图5 情况 ii 的未知节点的估算区域

(iii) 当 $d < D < 2(r-d)$ 时,两个环形的内圆和外圆都相交,得到未知节点的所在区域 A_P 和 A_Q , 如图6所示。

由于情况(i)、(ii)不适宜本文算法设定的前提,因此在遇到情况(i)、(ii)时,重新选择信标点,一直到选择的信标点之间的距离 D 以及移动距离 d 的数值满足情况(iii)的要求。

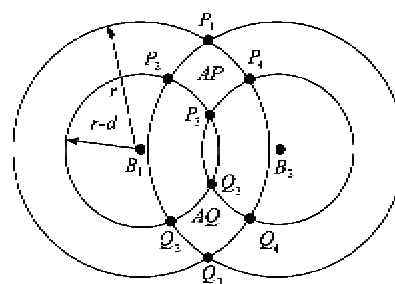


图6 情况 (iii) 的未知节点的估算区域

如图6所示,情况(iii)中确定的未知节点的区域是两块分离的区域,因此需要根据第3个信标点 B_3 来确定。首先,先计算出环形相交的区域的交点 P_1, P_2, P_3, P_4 和 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 然后根据质心公式计算出区域的质心位置,得到两个区域的质心 P_m, Q_m 。如果 $||B_3 - P_m|| - (2r-d)/2| < ||B_3 - Q_m|| - (2r-d)/2|$, 则选择区域 P_1, P_2, P_3, P_4 为未知节点的估算区域,反之则选择区域 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 。在本文中,我们假设估算的未知节点位置处在区域 P_1, P_2, P_3, P_4 中。

(4) 根据信标点的信号强度,再次对未知节点的所在区域进行限定:根据步骤(3)中选择出的信标点位置信息,利用它们的能量关系,在步骤(3)所得区域的基础上,根据能量信息对未知节点的区域再次进行限定。假设接收信号的强度 $P(A) > P(B)$,未知节点所在区域便再次限定为 $P_1P_2P_3$,如图 7 所示。

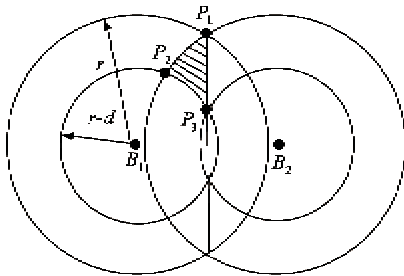


图 7 根据接收信号强度判断未知节点区域

(5) 根据选取的 3 个信标点,进行两两结合,重复上述的步骤(3)和(4),对感应节点的位置再次界定,得到区域三角形。根据 3 次计算感应节点定位得到 3 个区域扇形,得到重叠区域 QK_1P_3 ,计算重叠区域的质心 N ,即未知节点的估算位置。如图 8 所示。

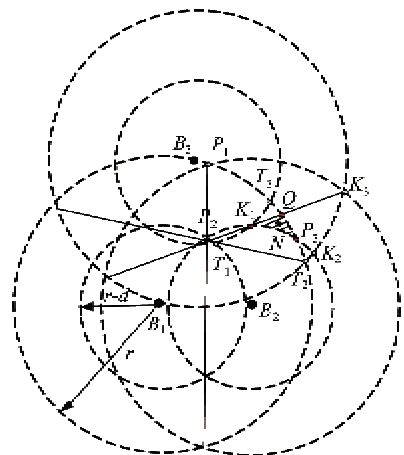


图 8 估算的未知节点的位置

无线传感器网络的应用场所和目的不同,对于节点定位精度的需求是不同的,因此按照定位精度的需求来确定选取信标点的数量。应用的场所对定位精度的要求越高,整个定位过程需要的信标点越多,重叠的区域就会越小,未知节点的定位就会越精确,但是定位所需能耗也会越大。

3 仿真和结果分析

由于 Liang、Chen 以及本文的算法都是在 Ssu 算法的基础上演变改进而来,具有较强的比较性和针对性,所以在仿真中通过与 Ssu、Liang 以及 Chen 的算法的性能进行比较,对本文算法进行评估和分析。在无线传感器定位算法中,定位误差可以表明定位算法的性能好坏,定位误差越小,算法精度越高。定位误差的定义如下:

$$\text{定位误差} = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} \|N_{\text{估算}}^i - N_{\text{实际}}^i\|}{n-m} \quad (2)$$

其中, n 代表网络中的节点总数, m 是信标点的数量。 $\|N_{\text{估算}}^i - N_{\text{实际}}^i\|$ 代表第 i 个未知节点的实际位置与估算位置的距离。为了提高仿真的真实性,本文的无线不规则性 (degree of irregularity, DOI) 模型^[6]表示如下:

$$K_i = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ K_{i-1} \pm \text{Rand} \times \text{DOI}, & 0 < i < 360, i \in N \end{cases} \quad (3)$$

其中, K 的值满足 $|K_0 - K_{359}| \leq \text{DOI}$ 。

图 9 对比了在不同 DOI 系数下各个算法的定位误差。当 DOI 的系数在 0.05 到 0.15 之间时, Ssu 的算法的定位误差有着很大的变动;当 DOI 系数大于 0.15 时, Ssu 的算法有着很大的定位误差,这说明 Ssu 算法有着很大的缺陷。Liang 的算法、Chen 的算法和本文的算法随着 DOI 系数的增大,定位误差都有着一定程度平稳的增加,但增幅不大。总的来说, Ssu 的算法的定位误差最大, Liang 的算法次之, Chen 的算法和本文的算法最小, Chen 的算法和本文的算法在 DOI 系数的稳定度上性能略好。

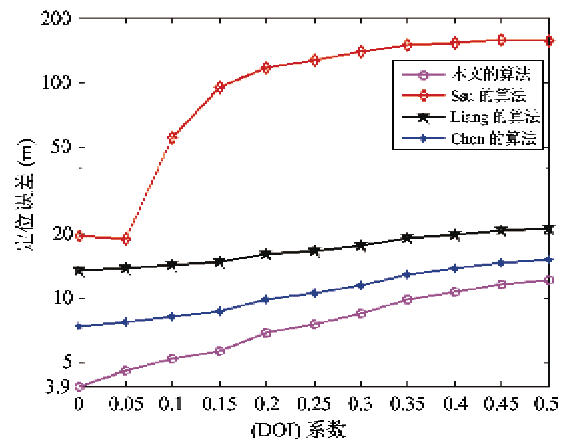


图 9 不同 DOI 系数下各个算法的定位误差对比

图 10 对比了在不同的移动节点分布比例下各个算法的定位误差情况。在移动节点定位误差的标准偏差相等的情况下,本文的算法在移动节点的分布比例达到 9%,性能几乎达到较高水平,定位误差达到了 5.9m,算法的性能大大优于 Ssu 的算法。分布比例大于 9% 时,随着分布比例的增大,定位误差逐渐降低,最小达到 3.4m。Liang 和 Chen 的算法与本文的算法相似,不需要较大的移动节点分布比例,就能达到算法的较好性能,定位误差最小分别达到了 11.9m 和 8.7m,相对于本文算法性能较差。然而,Ssu 的算法在移动节点分布比例达到 15% 之后,才能达到较高性能,对移动节点的分布比例有较高的要求,最小定位误差比本文的算法大 19.4m,导致整个无线传感器网络运行的成本较高。

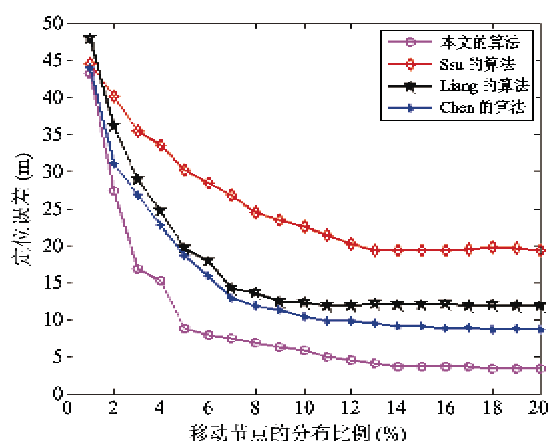


图 10 不同的移动节点分布比例下各个算法的定位误差对比

图 11 对比了移动节点的定位误差标准偏差不同的情况下各个算法的性能。图中数据显示,Ssu 的算法对于移动节点的定位精度依赖太大,若移动

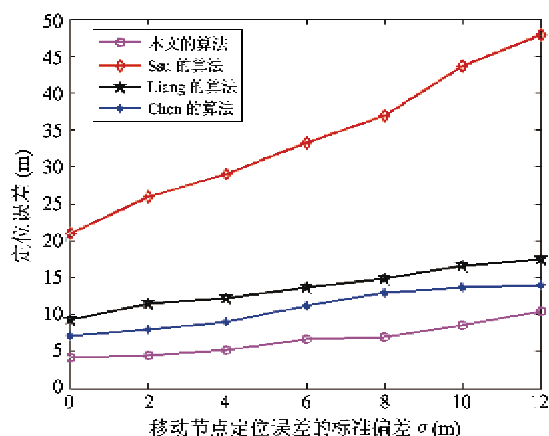


图 11 不同移动节点定位误差标准偏差情况下各个算法的定位误差对比

节点的定位误差出现一定幅度的增长,未知节点的定位会出现较大的误差。本文算法和 Liang、Chen 的算法相比,未知节点的定位误差并没有随着移动节点的定位精度变化而发生较大的变化。因此,在稳定度方面,本文算法的性能优于 Ssu 的算法,和 Liang、Chen 的算法性能相差不大。

图 12 显示,在移动节点分布比例为 10% 时,信号强度判断误差对未知节点定位的影响。算法的定位误差会随着接收信号强度判断误差的增大而提高。因为本文的算法根据接收信号的强度来判断未知节点的位置范围。根据几何计算出来的未知节点的区域都是对称的,然后再根据接收信号的强度来判断是对称的哪一方,所以一旦对接收信号强度判断出现错误,就把未知节点的位置判断成错的一方。因此,由图 12 所示,信号强度的判断误差对于算法的定位误差影响较大,这需要加强算法的纠错能力,这也是我们的定位算法未来要加强的地方。

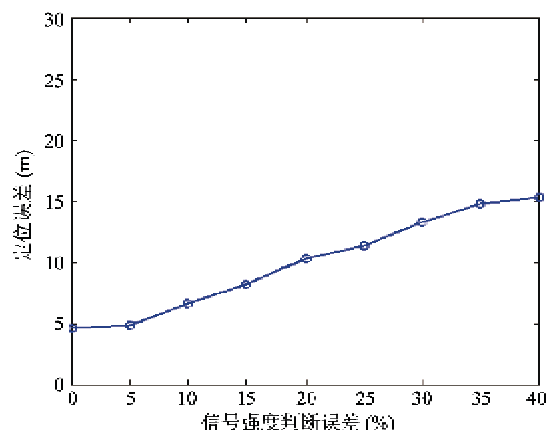


图 12 不同接收信号强度判断误差下的定位误差

图 13 表示各个算法随着网络运行时间的增加,各个网络能量消耗的比例。运行 Ssu 算法的网络能

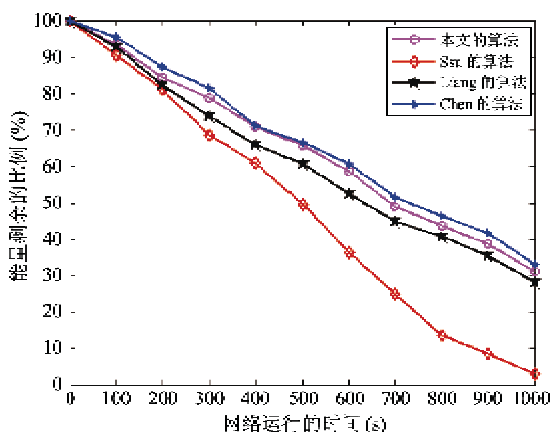


图 13 各个算法的网络能量消耗比例

量消耗得最快, Liang 和本文的算法次之, Chen 的算法最节能, 这说明本文的算法在计算负载上要大于 Chen 的算法, 在这方面还需要一定的改进。

综上所述, 本文提出的算法能够对无线传感器网络中的未知节点进行有效的定位, 相对于 Ssu、Liang 以及 Chen 的算法, 在定位误差、移动节点分布比例、稳定性以及能耗上有着一定的优势。

4 结 论

节点定位技术是无线传感器网络研究的一个重要方面。本文提出的新的无线传感器网络节点定位算法, 根据移动节点的定位功能和能量信息对未知节点的位置进行双重限制, 在定位误差、所需移动节点数量、稳定性上都有着较为不错的性能, 但在能耗方面还需继续改进。这也突显了当前无线传感器网络的瓶颈问题: 传感器的能量消耗问题。无线传感器的生命周期较短限制了其在实际应用中作用的发挥, 也对无线传感器的研究工作造成了很大的影响。因此, 未来的工作主要还是针对于如何能够在尽可能地降低传感器耗能的前提下, 更加精准地对未知节点进行定位。

参考文献

- [1] Ssu K F, Ou C H, Jiau H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(3): 1187-1197
- [2] Liang D, Severance F L. Position estimation with moving beacons in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Kowloon, China, 2007. 2317-2321
- [3] Zhang B L, Yu F Q. LSWD: localization scheme for wireless sensor networks using directional antenna. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(4): 2208-2216
- [4] Chen Y S, Lo T T. Efficient localization scheme with mobile anchors in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2010 International Computer Symposium*, Taipei, China, 2010. 541-546
- [5] Chen H Y, Shi Q J, Huang P, et al. Mobile anchor assisted node localization for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 2009. 87-91
- [6] Lee S, Kim E, Kim C, et al. Localization with a mobile beacon based on geometric constraints in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(12): 5801-5805
- [7] Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In: *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Dallas, USA, 1998. 85-97

A new node localization algorithm for wireless sensor networks based on mobile anchor points

Liu Chenxu, Liu Yun

(Beijing Key Laboratory of Communication & Information Systems, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

In consideration of the low accuracy and high energy consumption of existing mobile anchor point based node localization algorithms for wireless sensor networks, this study puts forward a new node localization algorithm based on mobile anchor points. When using the algorithm, mobile anchor points move across the network in a particular model and broadcast beacon messages with position information in a certain period. Unknown sensor nodes receive the beacons within the sensing range. Then, the beacons' locating information, received signal strength and the property of particular move model are used to estimate sensor nodes' location based on geometric principles. Simulation result shows that proposed localization algorithm is efficient in improving the localization accuracy, stabilization and energy utilization compared with other localization algorithms.

Key words: wireless sensor network, mobile anchor point, localization algorithm, received signal strength, geometric theory