

DV-Hop 定位算法在随机传感器网络中的应用研究

嵇玮玮 刘中

(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

摘要: DV-Hop 节点定位算法是一种重要的与距离无关的定位算法。在各向同性的密集网络中, DV-Hop 可以得到比较合理的定位精度, 然而在随机分布的网络中, 节点定位误差较大。该文根据 DV-Hop 算法定位过程, 在平均每跳距离估计、未知节点到各参考节点之间距离的计算和节点位置估计方法等 3 个方面进行了改进, 分析和仿真了不同改进措施和综合改进的定位性能。结果表明, 与有关方法相比, 该文提出的改进措施可极大地提高节点定位精度。此外, 该文改进措施不改变 DV-Hop 算法的定位过程, 因此不需要增加网络通信量和额外硬件支持, 是理想的与距离无关算法。

关键词: 传感器网络; DV-Hop 算法; 节点定位

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0970-05

Study on the Application of DV-Hop Localization Algorithms to Random Sensor Networks

Ji Wei-wei Liu Zhong

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: DV-Hop algorithm is one of the important range-free localization algorithms. The algorithm performs better in isotropic density sensor networks, however, it has larger location errors in randomly distributed networks. According to the localization principle of the DV-Hop algorithm, this paper proposes three improvements including the estimation of average single hop distance, the calculation of distance between unknown nodes and reference nodes and the estimation of node positions. These improvements can be used independently or jointly to replace the corresponding steps in the DV-Hop algorithm. The localization performances are analyzed in theory and with simulations. The results show that the proposed improvements can greatly enhance the localization accuracy of the unknown nodes. In addition, the proposed schemes do not change the localization process of the DV-Hop algorithm, and hence they need no further communication resource and additional hardware requirement.

Key words: Sensor network; DV-Hop; Node localization

1 引言

传感器节点定位是无线传感器网络应用研究的一个重要方面。人们可以利用 GPS 信号对传感器节点进行定位。但是, GPS 模块价格昂贵、能量消耗大, 而且受工作环境的限制, 所以在传感器网络中一般不采用 GPS 来对全部节点进行定位。比较有效的方法是通过已知部分位置的节点来对其它节点进行定位。

在过去的研究中, 人们已发展了多种无需 GPS 信号来对传感器节点进行定位的方法^[1]。根据定位过程中是否需要测量实际节点间的距离, 定位算法可以分为基于距离的定位算法^[2-7]和距离无关的定位算法^[6-15]。前者需要测量相邻节点间的绝对距离或方位, 并利用节点间的实际距离来计算未知节点的位置; 后者无需这些测量信息, 而是根据网络连通性等信息, 利用节点间的估计距离计算节点位置。与基于距

离的定位算法相比, 距离无关的定位算法具有成本低、功耗小、抗测量噪声能力强以及硬件设备简单等优势, 且可提供可接受的定位精度, 因此近年来倍受关注。业已发展的距离无关的定位算法主要有质心算法^[8]、凸规划算法^[9]、DV-Hop 算法^[10, 11]、Amorphous 算法^[12]、MDS-MAP 算法^[13, 14]和 APIT^[15]算法等无需任何基础设施的定位算法。

在上述算法中, DV-Hop 定位算法具有方法简单, 定位精度较高等优点, 它是利用距离矢量路由和 GPS 定位的思想提出的一系列分布式定位方法之一^[10, 11]。DV-Hop 算法由 3 个阶段组成: 首先, 使用典型的距离矢量交换协议, 使网络中所有节点获得距参考节点的跳数。其次, 在获得其它参考节点位置和相隔跳距后, 参考节点计算网络平均每跳距离, 并将其作为一个校正值广播至网络中。当接收到校正值后, 节点根据跳数计算与参考节点之间的距离。最后, 当未知节点获得与 3 个或更多参考节点的距离时, 根据三边测量法或极大似然估计法来计算未知节点的位置。

DV-Hop 算法的定位精度主要依靠估计的平均每跳距离

的精确度,因此,对于各向同性的密集网络,可以得到合理的平均每跳距离,从而能够达到适当的定位精度。但对于网络拓扑不规则的随机分布传感器网络来说,定位误差比较大^[10]。文献[16,17]分别从获得跳数的方法以及定位两方面对 DV-Hop 算法进行了改进。文献[16]的 Partial-range-aware 方法利用节点接收到的能量信息对节点间的跳数进行量化,细化节点间的跳数;文献[17]的 Hop-Terrain 方法则在节点定位时,利用节点与其邻近节点的测量距离对节点定位进行优化。这两种改进方法的不足是都需要知道除节点间跳数以及参考节点位置之外的额外信息。Partial-range-aware 方法需要能量信息;而 Hop-Terrain 方法需要测量节点间的距离以提高节点的定位精度,但当距离测量误差达到 40% 时反而会增加节点定位误差。

本文针对 DV-Hop 节点定位算法的过程,从以下 3 个方面进行改进:(1)利用最小均方准则求得平均每跳距离;(2)采用对应于不同参考节点的平均每跳距离计算未知节点到各参考节点的距离;(3)将未知节点与参考节点的范围作为节点定位的约束条件。与上述文献中提出的改进方法不同,本文提出的改进都无需获得额外信息,因此不需要增加任何额外的硬件设施。计算机仿真表明,本文提出方法的定位精度优于基本 DV-Hop 定位算法,且在不增加网络通信量及硬件设施的情况下可以获得与 Partial-range-aware 改进方法相当的改进效果,显著提高了对随机分布传感器网络中节点定位的性能,有效节约了成本。

2 DV-Hop 算法简介^[10]

图 1 是一个由 9 个节点组成的小型传感器网络,其中, L_1, L_2, L_3 为 3 个参考节点,其余为未知节点。下面以未知节点 A 为例,来阐述 DV-Hop 定位算法。

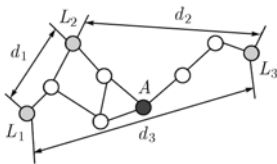


图 1 网络结构

首先,参考节点向邻居节点广播包括自身位置信息与跳数的数据包(记初始跳数值为 0)。接收节点记录它到每个参考节点的最小跳数,忽略来自同一个参考节点的较大跳数的数据包。然后将跳数值加 1,并转发给邻居节点。通过这个方法,网络中的所有节点都能够记录下到每个参考节点的最小跳数。对于节点 A 来说,其到参考节点 L_1, L_2, L_3 的跳数值分别为 3, 2, 3。

然后,每个参考节点根据记录的其他参考节点的位置信息和相距跳数,利用下式估算平均每跳的实际距离

$$HS_i^D = \frac{\sum_{j=i} d_{i,j}}{\sum_{j=i} h_j} \quad (1)$$

其中 $d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, (x_i, y_i) 是参考节点 i 的坐标, h_j 是参考节点 i 与 j ($i \neq j$) 之间的跳数。对图 1 的网络,各参考节点估计的平均每跳距离分别为: $HS_1^D = (d_1 + d_3)/(2 + 6)$, $HS_2^D = (d_1 + d_2)/(2 + 5)$, $HS_3^D = (d_3 + d_2)/(6 + 5)$ 。

参考节点将计算的平均每跳距离广播至网络中,未知节点仅记录接收到的第一个平均每跳距离,并转发给邻居节点。未知节点接收到平均每跳距离后,根据记录的跳数,计算到每个参考节点的跳段距离。对于未知节点 A 来说,因为其到参考节点 L_2 的跳数最小,最先接收到 L_2 发出的平均每跳距离,所以, A 到参考节点 L_1, L_2, L_3 的估计距离分别为: $\hat{d}_1 = 3 \times HS_2^D$, $\hat{d}_2 = 2 \times HS_2^D$, $\hat{d}_3 = 3 \times HS_2^D$ 。

最后,未知节点根据到各个参考节点的跳段距离,利用三边测量法或极大似然估计法计算自身坐标。

3 DV-Hop 算法的改进

本节,从距离估计及定位这两个阶段对 DV-Hop 算法进行了改进。需要指出的是,改进方法并不改变 DV-Hop 算法的定位过程。

3.1 基于最小均方误差准则求得平均每跳距离 (DV-Hop(A))

传统方法都是基于无偏估计准则来计算平均每跳距离 HS_i^D 的值,即通过使式(2)的值为零来求得

$$f_1 = \frac{1}{M-1} \sum_{j=i} (d_{i,j} - HS_i^D \cdot h_j) \quad (2)$$

其中 M 为参考节点的个数。使用这种方法得到的 HS_i^D 估计值,其估计误差均值为零。然而,在一般情况下,误差服从高斯分布,根据参数估计理论,作为估计子误差的代价函数,使用均方误差比只使用方差或偏差更为合理^[18]。因此本文提出基于最小均方误差准则来计算平均每跳距离,即通过使下式最小化来求平均每跳距离 HS_i^N 值。

$$f_2 = \frac{1}{M-1} \sum_{j=i} (d_{i,j} - HS_i^N \cdot h_j)^2 \quad (3)$$

令 $\frac{\partial f_2}{\partial HS_i^N} = 0$, 可得到基于最小均方误差准则的平均每跳距离的估计值为:

$$HS_i^N = \frac{\sum_{j=i} h_j d_{i,j}}{\sum_{j=i} h_j^2} \quad (4)$$

通过上述分析,对图 1 中的参考节点 L_1, L_2, L_3 , 分别应用最小均方误差准则,可得到其平均每跳距离估计值分别为: $HS_1^N = (2d_1 + 6d_3)/(2^2 + 6^2)$, $HS_2^N = (2d_1 + 5d_2)/(2^2 + 5^2)$, $HS_3^N = (6d_3 + 5d_2)/(6^2 + 5^2)$ 。

3.2 采用对应于不同参考节点的平均每跳距离计算未知节点到各参考节点的距离 (DV-Hop(B))

当获得每个参考节点的平均每跳距离后,需要将其广播至网络中的其他节点。从文献[10]中可知未知节点接收到的平均每跳距离有两种方法:方法 1 中未知节点仅记录接收到

的第1个平均每跳距离,并转发给邻居节点;方法2中未知节点记录其到每个参考节点的不同平均每跳距离。虽然节点接收到的平均每跳距离有两种方法,但业已发展的算法在讨论节点接收的平均每跳距离时都采用了方法1。此方法确保了绝大多数节点从最近的参考节点接收平均每跳距离值,也就是说,在方法1中将从最近参考节点接收的平均每跳距离作为整个网络的平均每跳距离。但由于网络中节点分布的随机性,需要尽可能多地利用网络中的信息,采用方法2将具有比采用方法1更优越的性能。基于以上考虑,本文采用方法2来记录平均每跳距离。于是A到参考节点 L_1, L_2, L_3 的估计距离分别为: $\hat{d}_1 = 3 \times \text{Hopsize}_1, \hat{d}_2 = 2 \times \text{Hopsize}_2, \hat{d}_3 = 3 \times \text{Hopsize}_3$,其中 Hopsize_i 为 HS_i^D 或 HS_i^N 。

3.3 利用未知节点与参考节点的范围作为约束条件,优化求解节点位置(DV-Hop(C))

现有的DV-Hop算法在对未知节点进行定位时,只是根据节点到各个参考节点的跳段距离来对节点进行定位。事实上,未知节点到各个参考节点的跳段距离的估计值总存在误差,这将最终造成较大的节点定位误差。比如未知节点X到某参考节点 R_i 的跳数为1,节点的通信半径为D,则X与 R_i 的距离应小于等于通信半径D,即 $|\mathbf{X} - \mathbf{R}_i| \leq D$ 。然而使用传统DV-Hop方法对节点X进行定位时却可能得到X的位置在 R_i 的一跳通信半径外的错误结论。为了避免这一错误的发生,本文提出在定位过程中将未知节点到最近参考节点的通信半径作为约束条件,从而达到有效提高节点定位精度的目的。对于图1中的未知节点A来说,由于其到参考节点 L_2 的跳数值为2,因此节点A应满足条件 $D \leq |\mathbf{X}_A - \mathbf{R}_2| \leq 2D$ 。

一般地,假设一个未知节点 N_u ,其位置为 $(x_u, y_u)^T$,此未知节点到其它参考节点的跳数为 L_i ,平均每跳距离为 Hopsize_i ,则可估算出此节点到各参考节点的距离 $d_i, i = 1, 2, \dots, M$,其中M为参考节点的个数。令 $K = \min\{L_1, L_2, \dots, L_M\}, C_j$ 是其对应的参考节点, $j = 1, 2, \dots, M_1$,其中 M_1 为 C_j 的个数,则未知节点 N_u 的位置可通过下式得到:

$$\left. \begin{aligned} \min_{x_u, y_u} \sum_{i=1}^M ((x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 - d_i^2)^2 \\ \text{s.t. } \sqrt{(x_{C_j} - x_u)^2 + (y_{C_j} - y_u)^2} \leq D, K = 1 \text{ 或} \\ D \leq \sqrt{(x_{C_j} - x_u)^2 + (y_{C_j} - y_u)^2} \leq K \cdot D, \\ K \neq 1, j = 1, 2, \dots, M_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)是不等式约束的非线性优化问题,已有多种求解方法,如二次罚函数方法,内点障碍罚函数法,序列二次规划方法等。本文采用信赖域序列二次规划法(SQP)方法^[19]求解此式。

4 性能分析

本节通过计算机仿真来研究本文改进算法的性能,并同

有关方法进行了比较。考察在 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 区域内随机设置100个节点(包括参考节点与未知节点)的情形,研究在不同的通信半径(r)与参考节点比例条件下节点定位的性能。对不同节点的通信半径及参考节点比例,分别进行了100次网络仿真试验。设节点的真实位置为 \mathbf{X}_i ,估计位置为 $\hat{\mathbf{X}}_i$,记距离误差 $|\mathbf{X}_i - \hat{\mathbf{X}}_i|$ 为一次网络仿真时节点 i 定位误差,定义 $e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^K |\mathbf{X}_i - \hat{\mathbf{X}}_i| / (KN)$ 为所有未知节点的平均定位误差(其中K为未知节点的个数, $N = 100$), $\bar{e} = e/r$ 为对通信半径归一化的平均定位误差。

图2(a)-2(d)给出了在不同节点通信半径(15m, 20m, 25m和30m)时,采用本文提出的不同改进措施时得到的节点归一化平均定位误差结果,其中x轴表示参考节点占总节点数的比例。图中的DV-Hop(D)曲线是指综合本文提出的3种改进方法得到的节点定位结果。从图中可以看出,本文提出的3种改进措施都显著优于基本DV-Hop算法,且综合使用本文提出的3种改进方法DV-Hop(D)后,节点的平均定位误差最小,同基本DV-Hop算法相比降低了大约50%,这与文献[16]利用Partial-range-aware方法对节点进行定位的结论相一致。无论是基本DV-Hop还是本文的改进措施,随着通信半径的增大,节点的平均定位误差都随之增大,如图3所示。这是因为DV-Hop及其改进算法都是通过获得网络的平均每跳距离以及跳数情况进行定位的,而通信半径增大将导致平均每跳距离的估计误差变大,从而造成节点的定位误差的增大。但是,采用本文改进措施的DV-Hop算法在相同通信半径时的平均误差都明显小于基本DV-Hop。

与有关方法相比,本文方法除了估计精度高外,在通信开销和硬件复杂度方面也具有性能优势。表1给出了本文方

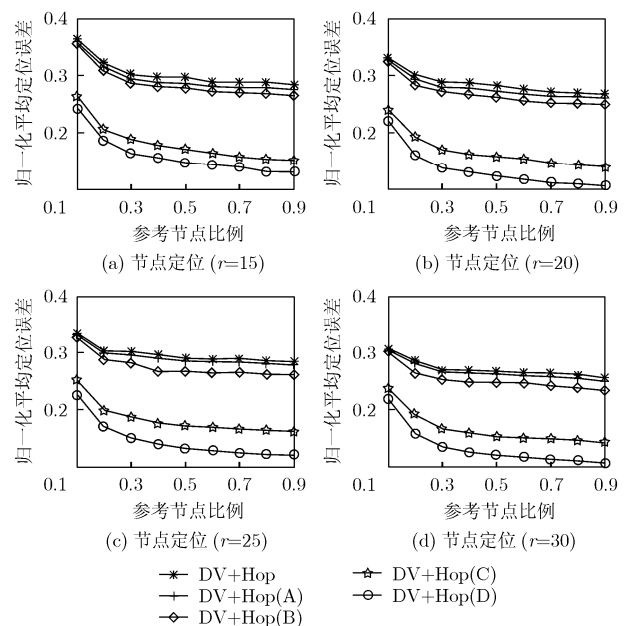


图2 节点归一化平均定位误差与参考节点比例之间的关系

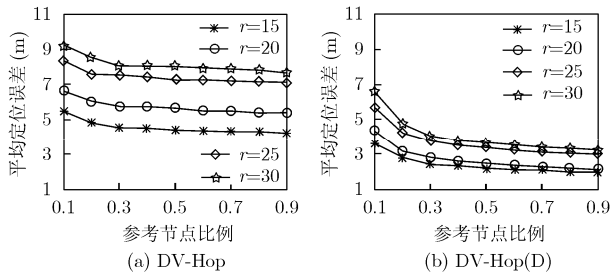


图3 节点平均定位误差与通信半径之间的关系

表1 各种算法的性能比较

性能	改进方法	DV-Hop 算法	Partial-range-aware 方法 ^[16]	Hop-Terrain 方法 ^[17]
定位精度	高	低	高	不定
通信开销	小	小	大	大
硬件复杂度	小	小	大	大
计算复杂度	大	小	一般	大

法与基本 DV-Hop 算法, 改进算法以及 Partial-range-aware 方法和 Hop-Terrain 方法的综合性能分析。

本文提出的改进方法能够有效提高 DV-Hop 算法的节点定位精度, 可以获得与 Partial-range-aware 改进方法相当的定位精度。Hop-Terrain 方法的节点定位精度主要依赖于求精阶段节点间测量距离的精度, 因此节点的定位精度变化范围较大; 当距离测量误差达到 40% 时反而会增加节点定位误差的缺点, 本文方法不需要距离测量的优点避免了这一情况的发生。

基本 DV-Hop 算法在定位时采用的是最小二乘法, 而本文的改进算法中采用了信赖域序列二次规划法(SQP), 因此, 本文提出的改进方法与 Partial-range-aware 方法及 Hop-Terrain 方法一样, 计算复杂度都比基本算法有所增加。

然而, 本文提出的改进算法因为并不改变基本 DV-Hop 算法的定位过程, 且无需额外信息, 因而, 与基本 DV-Hop 算法相比, 通信开销与硬件设施并没有增加。相反, Partial-range-aware 方法与 Hop-Terrain 方法由于需要额外的信息来提高节点的定位精度, 大大增加了网络中节点的通讯开销与硬件复杂度。因此, 本文提出的改进方法不失为一种只需付出较少的代价却可以大大改善随机网络中节点定位精度的有效方法。

5 结束语

为了提高 DV-Hop 算法在随机分布传感器网络中的定位性能, 本文对 DV-Hop 算法的距离估计和定位两个方面提出了 3 点改进措施。从分析与仿真结果可以看出, 综合考虑定位精度、通讯开销、计算复杂度以及硬件设施等方面性能, 本文提出的改进方法与基本 DV-Hop 算法、Partial-range-aware 方法以及 Hop-Terrain 方法相比, 都具有较强的优势,

只需付出较少的代价就可以明显提高随机网络中的节点定位精度。

参考文献

- [1] Capkun S, Hamdi M, and Hubaux J P. Gps-free positioning in mobile ad-hoc networks. Proc. Hawaii Int. Conf. on System Sciences, Maui, HW, USA, 2001: 3481-3490.
- [2] Girod L and Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing. Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS), Maui, Hawaii, USA, 2001: 1312-1320.
- [3] Priyantha N, Chakraborty A, and Balakrishnan H. The cricket location-support system. Proc. Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), Boston, MA, USA, 2000: 23-43.
- [4] Savvides A, Han C C, and Srivastava M B. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. Proc. 7th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), Rome, Italy, 2001: 166-179.
- [5] Savvides A, Park H, and Srivastava M. The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. Proc. 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications(WSNA), Atlanta, GA, 2002: 112-121.
- [6] Niculescu D and Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA. Proc. of IEEE the INFOCOM, San Francisco, CA, USA, 2003: 1734-1743.
- [7] Bahl P and Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. Proc. of the IEEE INFOCOM, Tel Aviv, Israel, 2000: 775-784.
- [8] Bulusu N, Heidemann J, and Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*, 2000, 7(5): 28-34.
- [9] Doherty L, Pister K, and Ghaoui L. Convex position estimation in wireless sensor networks. Proc. of the IEEE INFOCOM, Anchorage, AK, USA, 2001: 1655-1663.
- [10] Niculescu D and Nath B. Ad-hoc positioning system(APS). Proc. of the IEEE GLOBECOM, San Antonio, 2001: 2926-2931.
- [11] Niculescu D and Nath B. DV Based Positioning in Ad hoc Networks. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003, 22(1-4): 267-280.
- [12] Nagpal R. Organizing a global coordinate system from local information on an amorphous computer. Tech. Report A.I. Memo 1666, MIT A.I. Laboratory, Aug. 1999.
- [13] Shang Y, Ruml W, and Zhang Y, *et al.* Localization from mere connectivity. Proc. of the fourth ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), Annapolis, MD, USA, 2003: 201-212.

- [14] Shang Y and Ruml W. Improved MDS-based localization. Proc. of the IEEE INFOCOM, Hongkong, 2004: 2640-2651.
- [15] He T, Huang C, and Blum B M, *et al.* Range-free localization schemes in large scale sensor networks. Proc. of the 9th Annual International Conference On Mobile Computing And Networking (MOBICOM), San Diego, California, USA, 2003: 81-95.
- [16] Li X, Shi H, and Shang Y. A partial-range-aware localization algorithm for ad-hoc wireless sensor networks. Proc. of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN), Tampa, FL, 2004: 77-83.
- [17] Savarese C, Rabaey J, and Langendoen K. Robust positioning algorithm for distributed ad-hoc wireless sensor networks. Proc. of the USENIX Technical Annual Conference, Monterey, CA, 2002: 317-327.
- [18] 张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2002: 40-42.
- [19] Fletcher R. Practical Methods of Optimization. New York: John Wiley & Sons, 1987: chapter 10.
- 嵇玮玮: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为传感器网络及其信号处理.
- 刘 中: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代信号处理、传感器网络、混沌与信息动力学.