

文章编号: 2095-4980(2016)02-0219-05

航天发射场电力传输线 WSN 定位算法与仿真

徐以福

(中国西昌卫星发射中心 试验技术部, 四川 西昌 615000)

摘要: 为了准确、快速地查找航天发射场电力传输线故障的位置, 在电力传输线上安装传感器用于故障定位。由于这些传感器呈线性分布, 所以采用传统的 DV-Hop 算法进行传感器节点定位时, 会导致定位失效。为此, 提出一种改进的 DV-Hop 定位算法, 该算法将电力传输线上的传感器等间距分布, 计算最小跳步获得未知节点到信标节点的物理距离, 采用双曲线定位算法求解出未知节点的坐标位置。最后, 通过应用仿真, 结果表明: 改进的 DV-HOP 算法比传统的其他传感器定位算法的定位精确度高, 且性能更加稳定, 能够实现发射场电力传输线故障的快速、准确定位。

关键词: 传感器定位算法; 无线传感网络; DV-Hop 算法; 电力传输线

中图分类号: TN391.9

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0219

Wireless sensor network localization algorithm of power transmission line in aerospace launch spot and simulation

XU Yifu

(Experiment Technology Department, Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan 615000, China)

Abstract: In order to accurately and quickly find the fault location of power transmission line in aerospace launch spot, the sensors are installed in transmission line to locate the fault position. These sensors are linearly distributed, which will lead to localization failure when the traditional DV-Hop algorithm is adopted to locate the sensor node. Therefore, an improved DV-Hop localization algorithm is put forward, which distributes the sensors of power transmission line in equal distance. The physical distance from unknown node to beacon node is acquired by calculating the minimum hop. The coordinates of unknown node are solved by hyperbola localization algorithm. Finally, through the application simulation, the results demonstrate that the localization accuracy of improved DV-Hop localization algorithm is higher than that of other traditional sensor localization algorithm, and its performance is more stable, which can realize the quick and accurate fault location of power transmission line in launch spot.

Key words: sensor localization algorithm; wireless sensor network(WSN); DV-Hop algorithm; power transmission line

在航天发射任务中, 电力传输线作为整个发射场供电的重要环节, 事关发射任务的成败。由于发射场电力传输线具有传输距离长、跨越地理条件复杂等特点, 当发生故障时, 通过人工巡线的方式查找故障点既耗时又耗人力, 且故障排查的周期较长, 不能满足航天发射任务对电力系统的需求。因此, 为了降低人工巡线的工作量, 准确定位故障, 通常在发射场电力传输网中安装多个传感器, 组成无线传感器网络对电网的运行状态进行监测, 确保发射场电力系统安全、稳定地运行。在无线传感器网络中, DV-Hop 定位算法^[1]是一种经典的定位算法, 它具有能耗低、算法简单等优点, 因而得到了广泛的应用。但是, 由于航天发射场电力传输线中的传感器节点呈线性分布, 传统的 DV-Hop 定位算法不能直接应用于发射场电力传输线的传感器节点定位。因此, 本文在传统 DV-Hop 定位算法的基础上, 提出一种改进的 DV-Hop 定位算法, 以适应航天发射场电力传输线故障定位的需要, 并通过应用仿真, 检验算法的可行性和实用性。

1 传统的 DV-Hop 定位算法

传统的 DV-Hop 定位算法的基本思想是：假设信标节点与未知节点的物理距离为 d ，信标节点到未知节点的最短路径跳数为 n ，网络平均每跳的距离为 l ，则可计算出信标节点到未知节点的物理距离为： $d = n \times l$ ，然后利用极大似然估计法^[2]或者三边测量法^[3]获得节点的位置信息。整个算法主要分为以下 3 步：

第 1 步：广播位置。信标节点向其所有的邻居广播自身的位置信息，并将数据包的跳数字段初始值设置为 0。无线传感器网络中的其他节点接收各个信标节点的位置信息，将最小跳数保存，并将跳数字段的跳步数加 1 后把数据包转发给邻居节点。

第 2 步：计算信标节点的平均跳距。设无线传感器网络中 2 个信标节点 i, j 的位置坐标分别为： (x_i, y_i) ， (x_j, y_j) ，它们之间的最小跳数为 n_{ij} ，那么信标节点 i 在网络中的平均跳距为 \bar{l}_i ：

$$\bar{l}_i = \frac{\sum_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{i \neq j} n_{ij}} \quad (1)$$

第 3 步：坐标计算。信标节点将其在网络中的平均跳距在整个无线传感器网络中进行广播，每个未知节点仅保存最先到达的平均跳距值，将其转发给邻居节点，并将后续接收到的网络平均跳距值丢弃。这种分发策略保证了绝大多数的未知节点只接收最近距离信标节点的平均跳距值。那么，网络中的任意未知节点 k 结合接收到的平均跳距值 \bar{l}_i 和到记录的信标节点的最小跳数 n_{ik} ，即可计算出未知节点到信标节点 i 的物理距离 d_{ik} ：

$$d_{ik} = \bar{l}_i \times n_{ik} \quad (2)$$

最后，当未知节点计算出自身到 3 个或 3 个以上信标节点的物理距离后，利用极大似然估计法或者三边测量法计算出未知节点的具体位置。

2 算法的改进

2.1 DV-Hop 算法的不足

传感器在航天发射场电力传输线中的分布情况如图 1 所示。

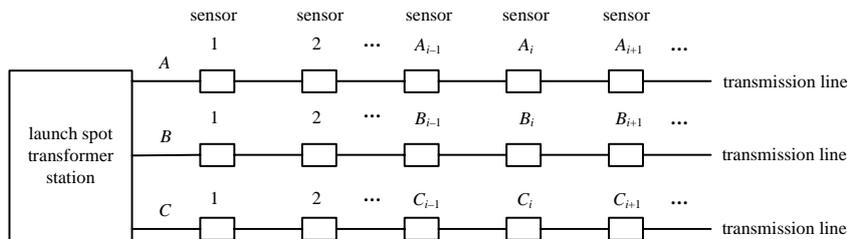


Fig.1 Distributing chart of sensors in launch spot power transmission line

图 1 发射场电力传输线的传感器分布图

这些传感器呈线性分布，采用传统的 DV-Hop 算法进行未知节点的定位时，如果 3 个信标节点均处于同一条传输线，则算法在求解平均跳距时会出现一个方程失效的情况，导致无法对电力传输线中的传感器进行定位。例如，传感器 A_{i-1}, A_i, A_{i+1} 处于同一个传输线，未知节点的坐标设为 (x, y) ，则：

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_{i-1})^2 + (y - y_{i-1})^2} = d_{i-1} \\ \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = d_i \\ \sqrt{(x - x_{i+1})^2 + (y - y_{i+1})^2} = d_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

求解出未知节点的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_{i-1} - x_{i+1}) & 2(y_{i-1} - y_{i+1}) \\ 2(x_i - x_{i+1}) & 2(y_i - y_{i+1}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{i-1}^2 - x_{i+1}^2 + y_{i-1}^2 - y_{i+1}^2 + d_{i+1}^2 - d_{i-1}^2 \\ x_i^2 - x_{i+1}^2 + y_i^2 - y_{i+1}^2 + d_{i+1}^2 - d_i^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

显然，由于 3 个信标节点处于同一传输线，导致方程式(3)中的 3 个方程相互不独立，最终导致公式(4)的求解失败。因此，需要对传统的 DV-Hop 算法进行改进，以适应发射场电力传输线的传感器定位需要。

2.2 改进的 DV-Hop 算法

在安装发射场电力传输线的传感器时，将传感器在电力传输线上等间距分布，且相邻节点间的间距必须略小于传感器的通信距离，这样保证相邻节点能够进行通信组网。传感器未知节点与信标节点之间的物理距离可以通过跳步数乘以传感器间的距离获得，最后，采用双曲线定位技术^[4]计算未知节点的坐标。

在发射场电力传输线上选取一小段，如图 2 所示。设传输线上相邻传感器节点之间的等间距值为恒值 S ，在电力传输线中有 2 个信标节点 M, L ，其余节点安装普通的传感器，假设传感器节点 P 发生故障，其定位过程如图 2 所示。

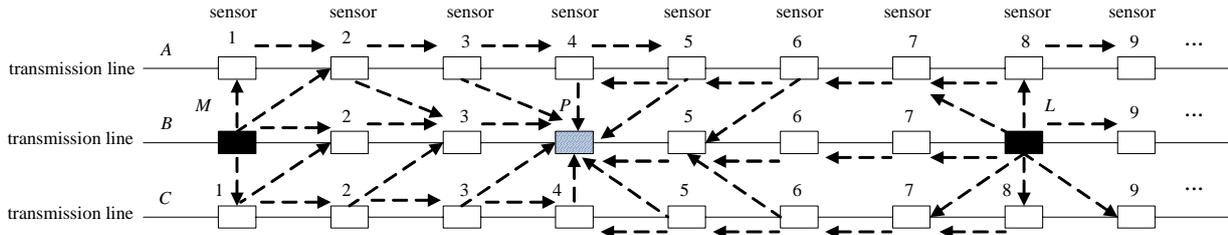


Fig.2 Router of sensors in launch spot power transmission line
图 2 发射场电力传输线上传感器的路由

第 1 步：广播位置。设置信标节点 M, L 的跳数初始值为 0，并将其位置信息向它们的邻居节点广播。邻居节点收到信标节点的数据包后，将跳数自动加 1，并沿着信号传输方向向下一个邻居节点广播位置信息。

第 2 步：计算最短路径。利用 Dijkstra 算法^[5]求解信标节点到未知节点的最短路径。考虑到 $Hop(L, P)$ 的计算方法与 $Hop(M, P)$ 相似，所以，下面以 $Hop(M, P)$ 的计算为例，介绍最短路径的计算过程。在图 2 中，信标节点 M 沿着信号传播方向能够直接到达故障节点 P 的传感器有 $C3, C4, B3, A3, A4$ ，按照下面递推公式计算最短路径 $Hop(M, P)$ 。

$$Hop(M, P) = \min[Hop(M, C_3), Hop(M, C_4), Hop(M, B_3), Hop(M, A_3), Hop(M, A_4)] + 1 \quad (5)$$

然后，按照同样的方法，分别逐层计算 $Hop(M, C_3), Hop(M, C_4), Hop(M, B_3), Hop(M, A_3), Hop(M, A_4)$ ，最后得到 $Hop(M, P)$ 。

第 3 步：计算物理距离。由于传感器在电网传输线上等距离分布，传感器之间的距离为 S ，则信标节点 M, L 分别到故障节点 P 的物理距离 d_{MP}, d_{LP} 为：

$$d_{MP} = S \times Hop(M, P) \quad (6)$$

$$d_{LP} = S \times Hop(L, P) \quad (7)$$

第 4 步：定位未知节点。故障节点的定位采用双曲线定位算法^[6]。设第 i 个信标节点的坐标为 (x_i, y_i) ，未知节点的坐标为 (x, y) ，用 D_i 表示信标节点与未知节点之间的距离，并且，在求解双曲线方程组时，采用 Chan 算法^[7]，该算法具有计算量小、定位精确度高等优点，其运算过程如下：

首先，计算出未知节点相对于第 i 个信标节点与第 1 个信标节点的距离差 $D_{i,1}$ ：

$$D_{i,1} = D_i - D_1, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

其中，

$$D_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$D_i = Hop[(x_i, y_i), (x, y)] \times S \quad (10)$$

其次，对距离线性化处理。结合式(8)和式(9)，可得到下列等式：

$$(D_{i,1} + D_1)^2 = x_i^2 + y_i^2 - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \quad (11)$$

由于第 i 个信标节点的位置 (x_i, y_i) 和第 1 个信标节点的位置 (x_1, y_1) 是已知的，所以由式(9)有：

$$D_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \quad (12)$$

将式(11)左边展开，将式(12)代入，并令 $x_{i,1} = x_i - x_1, y_{i,1} = y_i - y_1, k_i = x_i^2 + y_i^2, k_1 = x_1^2 + y_1^2$ ，那么式(11)可变形为：

$$x_{i,1}x + y_{i,1}y + D_{i,1}D_1 = \frac{1}{2}(k_i - k_1 - D_{i,1}^2) \quad (13)$$

最后，求解式(13)的线性方程组，就可得到未知节点的坐标位置。

3 应用仿真及分析

3.1 应用参数设置

选取发射场中的 1 000 m 电力传输线作为实验对象, 在该段传输线上安装 200 个传感器, 分 7 种情况配置信标节点在整个传感器节点中的比率为: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%。在同一条传输线上, 各个传感器节点按照 10 m 间隔等距分布, 各个传感器节点的路由均采用泛洪方式^[8], 其通信半径为 15 m, 确保各个传感器仅能与相邻的节点进行通信。以 Matlab7 作为仿真工具, 对改进算法的定位精确度和稳定性进行仿真实验。

3.2 结果分析

1) 定位精确度

为了比较改进的 DV-Hop 算法与传统的 DV-Hop 算法的定位精确度, 这里引入平均定位误差(Average Error, AVER)的概念。平均定位误差越低, 算法的定位精确度越高。假设在传输线上的未知传感器节点的实际坐标为 (x_i, y_i) , 算法解算出的坐标为 (x'_i, y'_i) , 未知传感器节点的个数为 m , 则平均定位误差为:

$$AVER = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}}{m} \quad (14)$$

下面, 采用常用的 3 种传感器节点定位算法: 凸规划算法^[9]、APIT 算法^[10]、DV-Hop 算法对发射场传输线中的未知传感器节点进行定位, 求解其平均定位误差, 并与改进的 DV-Hop 算法进行比较, 平均定位误差比较结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 随着信标节点在整个电力传输线中分布比率的提高, 未知节点接收到的信息量越来越多, 所以 4 种算法的平均定位误差呈下降的趋势。当信标节点所占比率低于 20% 时, DV-Hop 算法的定位精确度高于 APIT 算法和凸规划算法, 当信标节点所占比率高于 25% 时, DV-Hop 算法的定位精确度却低于凸规划算法和 APIT 算法, 这主要是由于随着信标节点的增加, 信标节点在传输线中出现 3 个以上的信标节点共处 1 条传输线的概率增加, 使得 DV-Hop 算法在求解平均跳距时失效, 导致参与算法的有效的信标节点数下降, 最终致使 DV-Hop 算法的平均定位误差上升, 定位精确度下降。与 DV-Hop 算法、凸规划算法、APIT 算法相比, 本文的改进 DV-Hop 算法的平均定位误差明显降低, 定位精确度提高约 30%。当信标节点所占比率低于 20% 时, 本文改进的 DV-Hop 算法平均定位误差降低较为明显, 当信标节点所占比率高于 25% 时, 随着信标节点所占比率的增加, 改进的 DV-Hop 算法的平均定位误差降低较少, 这主要是由于改进的 DV-Hop 算法在跳步值估算上的误差是不可避免的, 当未知节点接收到的信息量足够的情况下, 该算法的定位误差主要由跳步值估算误差引起。

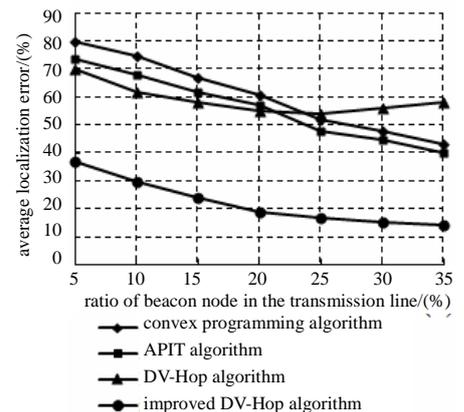


Fig.3 Average localization error comparison of the four algorithms

图 3 四种算法的平均定位误差对比

2) 稳定性

在发射场电力传输线的 200 个传感器中, 安装信标节点 60 个, 占总传感器节点的 30%, 为了检验算法的稳定性, 用不能通信的非法节点代替发射场电力传输线中的传感器节点, 考查非法节点的加入对算法定位精确度的影响。分以下 3 种情况讨论非法节点的分布状况: 非法节点全部替代信标节点; 非法节点部分替代信标节点; 非法节点全部替代一般传感器节点。比较 3 种情况下 DV-Hop 算法和改进的 DV-Hop 算法的定位情况, 定位结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着加入的非法节点增加, DV-Hop 算法和改进的 DV-Hop 算法的平均定位误差均增大, 定位精确度明显下降。但是, 在 3 种情况

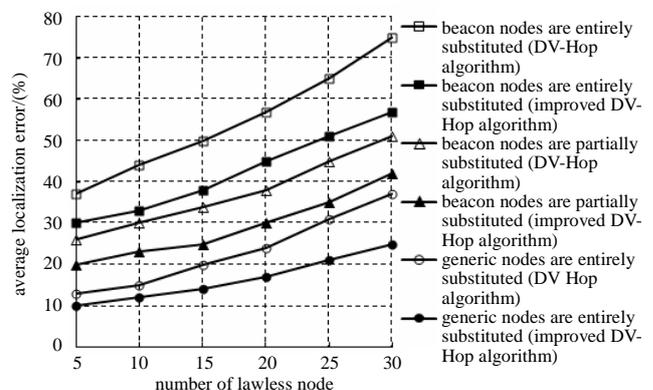


Fig.4 Lawless node's effect on localization precision on the three conditions

图 4 三种情况下非法节点对定位精确度的影响

下, DV-Hop 算法的平均定位误差增长较快, 改进的 DV-Hop 算法的平均定位误差增长较为平缓, 可见改进后的 DV-Hop 算法比原来的 DV-Hop 算法稳定, 改进后的算法抗非法传感器节点干扰的能力强, 更适合用于复杂环境下的传感器节点定位。

4 结论

本文提出了一种改进的 DV-Hop 算法, 解决了航天发射场电力传输线传感器网络的信标节点共线时故障定位失效的问题, 并通过应用仿真, 结果表明该改进的 DV-Hop 算法比传统的凸规划算法、APIT 算法和 DV-Hop 算法的定位精确度高, 性能更稳定, 并通过多次航天发射任务检验, 该算法能够快速、准确地定位发射场电力传输线的故障位置, 提高了发射场电力系统的应急处置能力。在后续的研究中, 将进一步提高算法的跳步值估算精确度, 减小算法的定位误差。

参考文献:

- [1] 李云飞,江明,娄柯,等. 无线传感器网络中 DV-Hop 定位算法的改进[J]. 计算机工程与应用, 2014,50(3):79-81. (LI Yunfei,JIANG Ming,LOU Ke,et al. Improved DV-Hop localization algorithm in wireless sensor network[J]. Computer Engineering and Applications, 2014,50(3):79-81.)
- [2] 钟丽鸿,胡成全,金京姬. 基于 RSSI 极大似然估计定位算法的分析与实现[J]. 吉林大学学报(理学版), 2014,52(3):556-560. (ZHONG Lihong,HU Chengquan,JIN Jingji. Analysis and implementation of maximum likelihood estimation positioning algorithm based on RSSI[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2014,52(3):556-560.)
- [3] 高雷. 基于三边测量的分簇目标跟踪算法[J]. 计算机应用, 2014,34(6):1578-1581. (GAO Lei. Clustering target tracking algorithm based on trilateral measurement[J]. Journal of Computer Applications, 2014,34(6):1578-1581.)
- [4] 周玲,康志伟,何怡刚. 基于三角不等式的加权双曲线定位 DV-Hop 算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013,27(5):389-395. (ZHOU Ling,KANG Zhiwei,HE Yigang. Weighted hyperbolic positioning DV-Hop algorithm based on triangle inequality[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013,27(5):389-395.)
- [5] 唐显锭,冯辉,杨涛,等. 无线传感器网络中用于目标跟踪的节点规划算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):355-361. (TANG Xianding,FENG Hui,YANG Tao,et al. Sensor scheduling for target tracking in wireless sensor networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):355-361.)
- [6] 宋佳. 无线传感器网络 DV-Hop 定位算法的研究及改进[D]. 重庆:重庆理工大学, 2014:27-35. (SONG Jia. Research and improvement of DV-Hop localization algorithm in wireless sensor network[J]. Chongqing:Chongqing Science and Technology University, 2014:27-35.)
- [7] 李招华,汪毓铎,邵青. 基于 Chan 的 TDOA 三维定位算法[J]. 现代电信科技, 2014(11):36-40. (LI Zhaohua,WANG Yuduo,SHAO Qing. TDOA 3D positioning algorithm based on Chan[J]. Modern Science and Technology of Telecommunication, 2014(11):36-40.)
- [8] 肖东,魏丽萍,陈庚,等. 用于水声传感器网络自组织的询问式泛洪广播算法[J]. 应用声学, 2015,34(1):58-64. (XIAO Dong,WEI Liping,CHEN Geng,et al. Inquiring flooding broadcast algorithm for underwater acoustic sensor self-organization networks[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015,34(1):58-64.)
- [9] 任克强,庄放望. 移动锚节点凸规划定位算法研究及改进[J]. 传感技术学报, 2014,27(10):1406-1411. (REN Keqiang,ZHUANG Fangwang. Research and improvement of mobile anchor node localization algorithm based on convex programming[J]. Journal of Sensors and Technology, 2014,27(10):1406-1411.)
- [10] 何登平,范茂林. 一种基于 APIT 的无线传感器网络混合型定位算法[J]. 传感器与微系统, 2015,34(2):133-135. (HE Dengping,FAN Maolin. A mixed localization algorithm for wireless sensor networks based on APIT[J]. Transducer and Micro-system Technologies, 2015,34(2):133-135.)

作者简介:



徐以福(1979-), 男, 贵州省安顺市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为航天发射场供配电。
email:tougaoxcu@126.com.