

基于多通信半径加余弦定理的 DV-Hop 算法的改进

尼迎波 陈元琰 叶娟 王明

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院 广西 桂林 541004)

摘要 为了提高 DV-Hop 定位算法的定位精度,提出了一种基于多通信半径加余弦定理的 DV-Hop 改进算法。该算法的改进体现在两个方面:1)采用多通信半径广播位置,多次广播,细分跳数,使得未知节点与信标节点之间的最小跳数更加准确;2)在估计未知节点与对应信标节点的距离后,根据余弦定理调整和校正了估计跳距。在同样的仿真环境下将改进算法与经典算法进行了对比,仿真结果表明改进算法有效地提高了传感器节点的定位精度。

关键词 WSN, DV-Hop, 余弦定理, 跳数, 跳距

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Improvement of DV-Hop Algorithm Based on Multiple Communication Radii and Cosine Theorem

NI Ying-bo CHEN Yuan-yan YE Juan WANG Ming

(School of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract In order to improve the positioning accuracy of DV-Hop positioning algorithm, an improved DV-Hop algorithm based on multiple communication radii and cosine theorem was proposed. The improvement of the algorithm is reflected at two aspects. Firstly, the algorithm uses multiple communication radii to broadcast locations, multiply broadcast, subdivide hop counts, and makes the minimum hop count between unknown nodes and beacon nodes more accurate. Secondly, the algorithm adjusts and corrects estimated hop distance by cosine theorem after estimating the distance between the unknown node and the corresponding beacon node. The improved algorithm was compared to classical algorithm under the same simulation environment, the simulation results show that the improved algorithm effectively increases the positioning accuracy of the sensor nodes.

Keywords WSN, DV-Hop, Cosine theorem, Hop count, Hop distance

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)被认为是近年来研究的热点之一^[1],在过去几年已经有很多国内外学者对此展开了研究,无线传感器网络得以迅速发展^[2]。无线传感器网络可以应用在很多领域,如健康医疗、公共或工业检测追踪、环境监测、智能家居、国防军事等领域^[3-7]。这些领域都将对人类的生活和社会的发展产生深远的影响。

WSN 通过传感器节点进行监测、控制等一系列活动。传感器节点要知道自己的位置才会更有意义,但是信标节点的成本比未知节点的成本更贵,全部用成信标节点不太现实,此时就需要定位技术的支撑,通过少量的信标节点计算出周围的未知节点的位置。其中,无需测距定位方法成本低、网络生存能力强,定位精度基本上能满足实际应用的需要,因此具有更大的实用价值和发展前景,是目前研究的重点之一^[8]。常用的无需测距定位算法有质心算法、DV-Hop 算法、APIT 等,其中, DV-Hop 定位算法不仅成本低,而且实现简单。

很多学者都对定位算法提出了诸多改进,提高了定位精度。例如,文献^[9]提出了使用最近的信标节点的平均跳距离

来计算未知节点,引入了门限 M ,使用 M 跳内的信标节点的加权平均跳距来计算未知节点的平均跳距。文献^[10]提出了一种基于信标节点辅助的分布式定位算法,该算法利用信标节点的功率控制,提出了使用全网信标节点校正单个信标节点的平均每跳距离。文献^[11]对传统 DV-Hop 定位算法提出了两个方面的改进:1)对节点间的跳数值的校正;2)对平均每跳跳距进行修正。文献^[12]提出了将加权 DV-Hop(WDV-Hop)与加权双曲线定位算法(WH)相结合的思想。节点定位是无线传感器网络的研究热点之一,而高精度定位被认为是无线传感器网络最具有挑战的热点之一。本文也是以提高定位精度为目的,对 DV-Hop 算法提出改进并提高其定位精度。

2 DV-Hop 定位算法与分析

2.1 DV-Hop 定位算法

DV-Hop(Distance Vector-Hop)算法是由美国罗格斯大学(Rutgers University) Niculescu 等于 2003 年提出的距离矢量路由机制,是一种基于多跳测距的无距离测距技术^[13]。

该算法的定位过程由 3 个阶段组成^[13-16]:

本文受面向节点移动的无线多媒体传感器网络路由算法研究基金(11163065)资助。

尼迎波(1992-),女,硕士生,主要研究方向为计算机网络, E-mail: 642433629@qq.com; 陈元琰(1961-),男,博士生,教授,主要研究方向为计算机网络、计算机软件与理论; 叶娟(1993-),女,硕士生,主要研究方向为计算机网络; 王明(1995-),男,硕士生,主要研究方向为计算机网络、人工智能, E-mail: 19645338@qq.com(通信作者)。

(1) 获取未知节点与信标节点之间的最小跳数。

无线传感器网络中的信标节点通过洪泛算法向全网广播自身位置信息分组,洪泛结束后,所有信标节点都将获得其他信标节点的位置信息与彼此间的最小跳数。

(2) 计算未知节点与信标节点的距离。

信标节点根据获得的其他信标节点间的位置信息和相应的最小跳数,估算自身平均跳距:

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

其中, (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别为节点 i 和节点 j 的位置坐标, h_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的跳数距离。

未知节点选择距其最近的信标节点的自身跳距信息,再计算与信标节点之间的估计距离,未知节点到信标节点的距离为:

$$d_{ij} = HopSize_i \times h_{ij} \quad (2)$$

其中, $HopSize_i$ 为未知节点选定的距自己最近的信标节点的自身跳距。

(3) 计算未知节点的坐标位置。

未知节点在获得 3 个或 3 个以上信标节点的距离后,利用三边测量法^[17]或极大似然估计等数学方法计算自身坐标。

2.2 DV-Hop 算法的定位误差分析

在 DV-Hop 算法中,节点间的距离使用的是信标节点间的平均每跳距离与跳数的乘积来表示未知节点和信标节点之间的距离。

网络节点结构示意图如图 1 所示,其中 B_1, B_2, B_3 为信标节点,其他的为未知节点, $B_1(x_1, y_1)$ 和 $B_2(x_2, y_2)$ 之间的距离为 $d_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$, $B_2(x_2, y_2)$ 和 $B_3(x_3, y_3)$ 之间的距离为 $d_2 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$, 则信标节点 B_2 的平均每跳距离 $d_{HopB_2} = (d_1 + d_2) / (2 + 6)$, 此时由于路线长度长短曲折不一,计算出来的 B_2 的平均每跳距离与实际平均每跳距离有误差,经过多跳的累积误差会更大。用直线之间的距离除去节点之间的跳数所得到的平均跳距经过计算后误差略大。

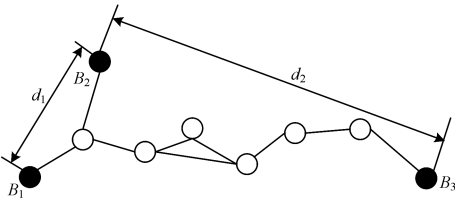


图 1 网络节点结构示意图

3 算法的改进

本文在 DV-Hop 定位算法的基础上,提出了一种基于多通信半径加余弦定理的 MCDV-Hop 算法。MCDV-Hop 算法(多通信半径及余弦定理 DV-Hop 算法)的思想为:首先,采用多通信半径广播位置,记录下其他信标节点的位置、跳数、跳次,获得节点间的最小跳数;然后,估计未知节点与对应信标节点的距离,利用余弦定理^[18]对估计跳距进行调整;最后,在得到 3 个或更多的信标节点位置信息后用三边测量法计算出坐标。

3.1 多通信半径精确最小跳数

信标节点设有 4 个通信半径,分别为 $0.25R, 0.5R, 0.75R, R$, 如图 2 所示。信标节点 A 到节点 B 的最小跳数为 0.5, 信标节点 A 到节点 C 的最小跳数为 0.75。如果算法只是采用一个通信半径 R , 那么信标节点 A 到节点 B 和到节点 C 的最小跳数均为 1, 这样采用多通信半径进行细化跳数,降低误差可使得跳数更加精确,而未知节点只有一个通信半径 R 。

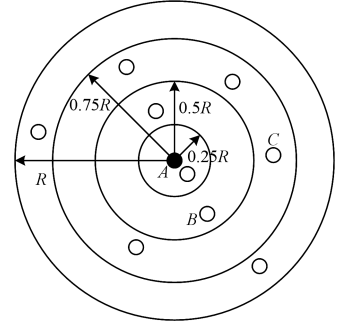


图 2 4 通信半径

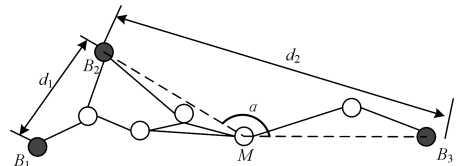
每次洪泛广播信标节点都会消耗大量的通信能量。由于无线传感器节点的能量有限,本文算法仅在通信半径为 R 时使用洪泛广播,通信半径为 $0.25R, 0.5R, 0.75R$ 时只是信标节点发送信息。

3.2 余弦定理校正平均跳距

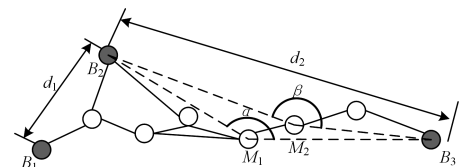
$Jump_times$ 是两个信标节点之间的跳次, $Jump_num$ 是两个信标节点之间的跳数,且 $Jump_times = Jump_num / 0.25$ 。

(1) 中间节点的选择

选择连接到每个信标节点最小跳数的传输路线,然后选择路线的中间节点。如图 3 所示,如果 $Jump_times$ 为奇数,则选择路径的中间节点即可;如果 $Jump_times$ 为偶数,则选择路径中间的两跳共同作为中间节点。其中,中间节点和信标节点连接所形成的夹角为 $\alpha, 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。



(a) 信标节点 B_2 和 B_3 之间的跳次为奇数



(b) 信标节点 B_2 和 B_3 之间的跳次为偶数

图 3 角度调整跳距

(2) 夹角 α 范围的证明

角度与传输路径距离示意图如图 4 所示,点 A 和 B 之间有两条路线可以到达,路线 1 是 $AC-CB$, 路线 2 是 $AD-DB$ 。显而易见, $\beta > \alpha, AC + CB$ 较 $AD + DB$ 更接近 AB 的值,故当角度越大时传输路径的距离越接近两点之间的直线距离,在本文算法中表明它的角度越小,绕行的路径越远,估计的跳距会导致更多的偏差;当这个角度接近 180° 时,绕的路径越近,

跳距会更加接近真实值。因此,夹角 α 的范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时最为理想。

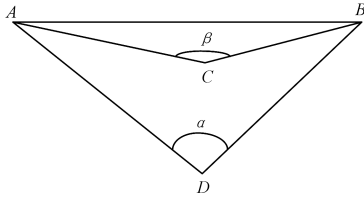


图4 角度与传输路径距离示意图

(3) 余弦定理求校正值

如图3所示,中间节点的选择有两种,故计算也分为两种情况,第一种是 $Jump_times$ 为奇数,第二种是 $Jump_times$ 为偶数。

1) 跳次 $Jump_times$ 为奇数

如图3(a)所示, $|B_2B_3|$ 为 B_2 到 B_3 的直线距离, $|B_2M|$ 是 B_2 到 M 的距离, $|B_3M|$ 是 B_3 到 M 的距离,且 $|B_2B_3| = d_2$,但是 $|B_3M|$ 是未知的。由于节点 M 是路线的中间节点,因此可以设 $|B_2M| = |B_3M| = d_{BM}$,根据余弦定理有下列式子:

$$\begin{aligned} |B_2B_3|^2 &= |B_2M|^2 + |B_3M|^2 - 2 \cdot |B_2M| \cdot |B_3M| \cdot \cos\alpha \\ d_2^2 &= d_{BM}^2 + d_{BM}^2 - 2 \cdot d_{BM} \cdot d_{BM} \cdot \cos\alpha \\ d_2^2 &= 2d_{BM}^2(1 - \cos\alpha) \end{aligned}$$

则 B_2 到 M 的距离和 B_3 到 M 的距离 d_{BM} 的值为:

$$d_{BM} = d_2 / \sqrt{2(1 - \cos\alpha)}$$

则平均跳距 $hop_distance$ 为:

$$\begin{aligned} hop_distance &= \frac{2d_{BM}}{Jump_num} \\ hop_distance &= \frac{2d_2}{\sqrt{2(1 - \cos\alpha)} Jump_num} \end{aligned} \quad (3)$$

2) 跳次 $Jump_times$ 为偶数

如图3(b)所示,设 B_2 到 B_3 的中点距离为 d_{BM} , B_2 到 M_1 的距离和 B_3 到 M_1 的距离为 d_{BM_1} , B_2 到 M_2 的距离和 B_3 到 M_2 的距离为 d_{BM_2} 。由于选择了两个节点同时作为中间节点,利用余弦定理同理可得, B_2 到 B_3 的中点距离 d_{BM} 为:

$$\begin{aligned} d_{BM} &= \frac{d_{BM_1} + d_{BM_2}}{2} \\ d_{BM} &= \frac{d_2 / \sqrt{2(1 - \cos\alpha)} + d_2 / \sqrt{2(1 - \cos\beta)}}{2} \end{aligned}$$

则可以推出平均跳距 $hop_distance$:

$$\begin{aligned} hop_distance &= 2d_{BM} / Jump_num \\ hop_distance &= \frac{d_2 / \sqrt{2(1 - \cos\alpha)} + d_2 / \sqrt{2(1 - \cos\beta)}}{Jump_num} \end{aligned} \quad (4)$$

最后,校正调整值 $correct_value$ 可由平均跳距、实际跳距和跳数得出:

$$correct_value = hop_distance - \frac{d_2}{Jump_num} \quad (5)$$

(4) 校正平均跳距

使用式(5)求出的跳距校正值 $correct_value$ 校正估计的平均跳距。

3.3 MCDV-Hop 算法流程

MCDV-Hop 算法流程图如图5所示。

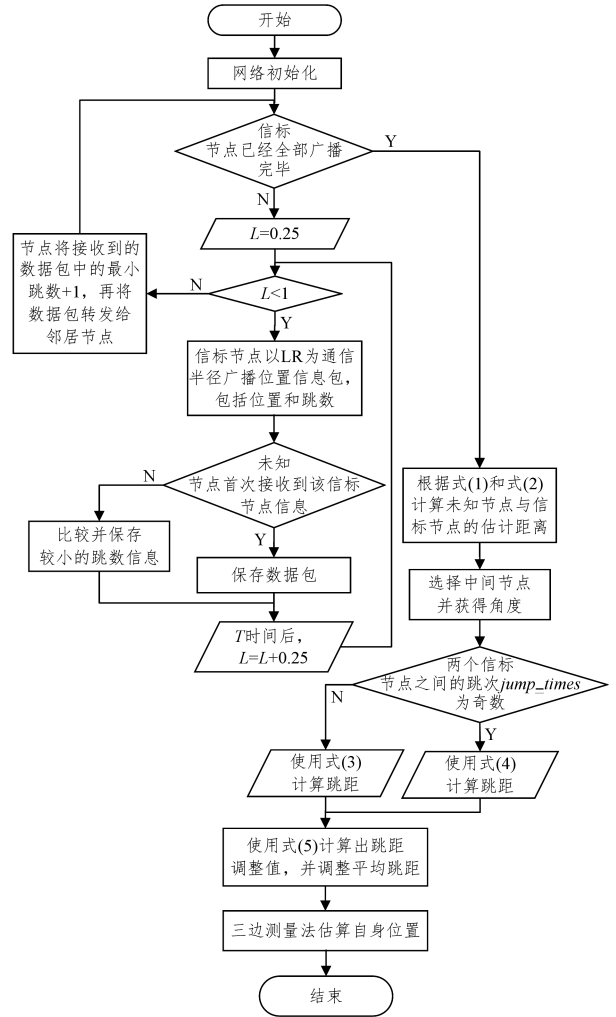


图5 MCDV-Hop 算法流程图

MCDV-Hop 算法的形式化描述如下:

(1) 网络初始化。启动网络,初始化信息,每个节点都将保留足够的存储空间,用于保存与每个信标节点的最小跳数和对应的跳次 $Jump_times$ 。

(2) 信标节点广播信息包。信标节点广播的自身位置数据信息包中包括信标节点的坐标、初始化的跳数和跳次字段等。信标节点第一次广播是以通信半径 $0.25R$ 的圆为范围广播,初始化的跳数字段为 0.25 ,跳次字段为 1 (跳次为整数),位置信息是信标节点自身的位置。第二次、第三次、第四次广播的通信半径分别是 $0.5R, 0.75R, R$,跳数分别为 $0.5, 0.75, 1$,跳次均为 1 。

(3) 信邻节点接收信息包。信邻节点先判断是否第一次接收到该信标节点发送的信息包,如果是第一次收到,则该节点直接存储接收到的数据信息包;如果不是第一次收到,则该节点将本次接收的最小跳数与之前存储的该信标节点的数据作比较,存储二者较小的信息包。当广播半径以 R 广播时,信邻节点将已有的数据信息包中的跳数和跳次分别加 1 ,其余信息不变,然后采用可控洪泛路由广播数据信息包。

(4) 估算未知节点与信标节点间的距离。根据式(1)和式(2)计算未知节点与信标节点间的估计距离。

(5) 选择中间节点并获得角度。选择连接到每个信标节点的最小跳数的传输路线,然后选择路线的中间节点。

(6) 计算信标节点间的跳距。当 $Jump_times$ 为奇数时,

使用式(3)计算跳距;当 $Jump_times$ 为偶数时,使用式(4)计算跳距。

(7)计算跳距调整值并调整平均跳距。使用式(5)计算跳距调整值 $correct_value$,使用 $correct_value$ 校正平均跳距。

(8)未知节点估算位置。未知节点在获得 3 个或更多的信标节点的距离后,利用三边测量法计算出自身的坐标。

4 MATLAB 仿真结果及分析

为了验证改进的 MCDV-Hop 算法的性能,采用了 Matlab 2014a 进行仿真,算法是在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的区域内进行仿真,传感器节点总个数是 100,且所有节点都能正常通信,由于节点坐标是随机生成的,对比结果是 100 次仿真结果的平均值。

平均相对定位误差公式为:

$$aver_error = \frac{\sum_{i=1}^{N-n} \|true_i - est_i\|}{R \times (N-n)} \times 100\% \quad (6)$$

其中, N 是节点数量, n 是信标节点数量, R 是通信半径, $true_i$ 表示实际坐标, est_i 表示估计坐标。

仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数

参数	数值
网络规模/ m^2	100×100
节点总个数/个	100
未知节点个数/个	70
节点个数/个	30
通信半径/m	30

为了将 MCDV-Hop 算法与 DV-Hop 算法进行有效的对比,本文的仿真在同一种环境参数下进行,具体环境参数参考表 1,且仿真的网络范围内节点都是随机散落的。

(1)信标节点密度对 DV-Hop 算法、PEDV-Hop 算法^[19]和 MCDV-Hop 算法中未知节点定位精度的影响对比

信标节点的密度会对算法的未知节点定位精度产生影响。仿真区域内信标节点的数量由 10 个变化为 40 个,间隔为 5 个,通信半径为 30 m。在其他模拟环境条件不变的情况下,对经典的 DV-Hop 算法、PEDV-Hop 算法和 MCDV-Hop 算法进行仿真比较,结果如图 6 所示,图 6 中的横坐标是信标节点数,纵坐标是未知节点相对平均定位误差。从图 6 中的仿真曲线可以看出,MCDV-Hop 算法有效地降低了定位误差。

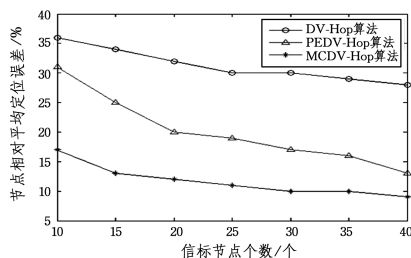


图 6 信标节点数变化对定位精度的影响

(2)通信半径对 DV-Hop 算法、PEDV-Hop 算法和 MCDV-Hop 算法中未知节点定位精度的影响对比

通信半径的大小决定了未知节点可以获得的信标节点的数量,当未知节点获得更多的信标节点位置时,定位结果更加精确。在通信半径为 20~50 m、间隔 5 m 的区间内,以 30 个

信标节点为例,对经典的 DV-Hop 算法、PEDV-Hop 算法和 MCDV-Hop 算法进行仿真比较,结果如图 7 所示,图 7 中的横坐标是通信半径,纵坐标是未知节点相对平均定位误差。由图 7 的仿真结果可以看出,通信半径的增大有效地降低了节点的相对平均定位误差。但是,在实际应用中是将改进算法作为主要方法,而不是增大通信半径。

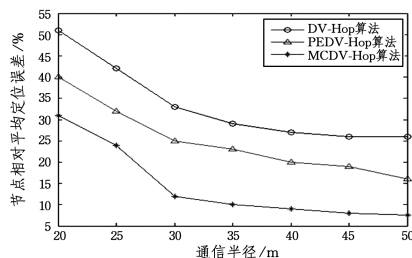


图 7 通信半径变化对定位精度的影响

结束语 通过对 DV-Hop 算法、PEDV-Hop 算法和改进的基于多通信半径及余弦定理的 MCDV-Hop 算法进行仿真,比较了相同环境参数下,信标(锚)节点密度和通信半径对未知节点定位误差的影响。从仿真结果可以看出,改进后的 MCDV-Hop 算法比传统的 DV-Hop 算法和 PEDV-Hop 算法具有更好的定位优势,提高了定位精度。这是因为基于多通信半径及余弦定理的 DV-Hop 算法相对于其他 3 种算法,不仅在跳数方面有更好的精确值,而且在估算好平均跳距后使用余弦定理校正距离,从而减少了相对误差。但减小算法的复杂性是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] LI Z, GU Y, TANG L, et al. Fire Hazard Location Algorithm for Large Place Based on Wireless Sensor Network[J]. Journal of Computers, 2014, 9(3): 711-716.
- [2] LV X, SUN X, ZHOU X, et al. DV-hop-MSO Based Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Engineering & Applications, 2007, 43(20): 312-316.
- [3] RAMADAN R A, HAGRAS H, NAWITO M, et al. The Intelligent Classroom: Towards an Educational Ambient Intelligence Testbed[C]// Sixth International Conference on Intelligent Environments. IEEE, 2010: 344-349.
- [4] EL-BENDARY N, FOUAD M M M, RAMADAN R A, et al. Smart Environmental Monitoring using Wireless Sensor Networks[M]// Wireless Sensor Networks: From Theory to Applications, 2013.
- [5] EROL-KANTARCI M, MOUFTAH H T. Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 314-325.
- [6] SEEMA A, REISSLEIN M. Towards Efficient Wireless Video Sensor Networks: A Survey of Existing Node Architectures and Proposal for A Flexi-WVSNP Design[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(3): 462-486.
- [7] BARCELO-ORDINAS J M, CHANET J P, HOU K M, et al. A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture[C]// Ecpa Conference, 2013.
- [8] 史龙, 王福豹, 段渭军, 等. 无线传感器网络 Range-Free 自身定位机制与算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(23): 127-130.

- [9] HU Y, LI X. An improvement of DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2013, 53(1):13-18.
- [10] 陶志勇, 魏强, 刘影. 多功率锚节点辅助的 DV-Hop 定位算法[J]. *计算机工程与应用*, 2014(21):121-124, 156.
- [11] 夏少波, 邹建梅, 朱晓雨, 等. 无线传感器网络 DV-Hop 定位算法的改进[J]. *计算机应用*, 2015(2):340-344.
- [12] MASS-SANCHEZ J, RUIZ-IBARRA E, CORTEZ-GONZÁLEZ J, et al. Weighted Hyperbolic DV-Hop Positioning Node Localization Algorithm in WSNs[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(1-23):5011-5033.
- [13] NICULESCU D, NATH B. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2003, 22(1-4):267-280.
- [14] NICULESCU D, NATH B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA[C]// *Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*. IEEE, 2003:1734-1743.
- [15] NAGPAL R, SHROBE H, BACHRACH J. Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network[C]// *Information Processing in Sensor Networks, Second International Workshop (IPSN 2003)*. Palo Alto, CA, USA, 2003:333-348.
- [16] 邹佳顺, 张永胜. 无线传感器网络中关于 DV-Hop 定位算法的改进[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(3):147-150.
- [17] SHI W, JIA C, LIANG H. An improved DV-Hop localization algorithm for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Online Engineering*, 2010, 9(6):2232-2236.
- [18] WU H, DENG M, XIAO L, et al. Cosine Theorem-based DV-Hop Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. *Information Technology Journal*, 2011, 10(2):239-245.
- [19] 唐静静. 无线传感器网络非测距定位算法研究[D]. 南宁: 广西师范大学, 2016.

(上接第 314 页)

进一步观察可以发现, 在每个案例的基于连接的传播模型中, 通过加权图计算出的路线会导致网络更易受感染。然而, 在所有案例中, 尽管并不是所有方案都采用最短路径, 总体的平均路径长度仍相对接近, 且关键阈值并没有明显偏离 τ_c 的下界(见定理 3)。

结束语 许多传播过程都是沿着特定路径发生的, 且依赖于特定传播源作为物理传播媒介从一个节点传到另一个节点。本文通过考虑传播源的量和分布建立了基于路径的传播模型, 尽管建模方法具有一般性, 但本文重点研究社交网络环境, 并用数据包代替传播源。在以 Miegheem 研究^[12]为基础的建模上延伸, 本文不再考虑节点的整体行为, 而是分别对每个节点进行分析, 并使分析框架的复杂度降为多项式级别。本文引入了传播特性矩阵 C , 来表示网络交通强度及分布和路由协议计算所得路径的共同影响, 从而描述传播行为, 进而发现基于路径传播的关键阈值等于矩阵 C 的谱半径的倒数(即 $\tau_c = 1/\mu_{\max}^C$)。基于连接的传播中, 传播在很大程度上是由拓扑结构 A 决定的, 而基于路径的传播不同, 其影响因素主要与交通量和通往终点的路由路径有关, 这就为在同一个网络结构中控制传播行为提供了两个“调节钮”: 1) 通过交通工程、规范政策和进入率控制等技巧来调整交通强度; 2) 通过改变系统中的路由协议来构建不同的路径选择。基于此, 本文进一步推导出了 τ_c 的条件边界, 其受系统交通量和路由协议信息的可获得性所限制, 因此网络管理者可利用这些手段修改边界来根据需要控制传播过程。此外, 由于对每个节点分别进行考虑, 本文还可以很容易地列出网络中最容易受传播感染的节点, 该节点层面的信息可以被用作设计免疫或保护机制时的新型中心度量。本文通过推断连接权重集合和跟踪路由数据, 将该体制应用于 3 个现实网络中, 来体现其适用性。基于本文模型, 关键传播阈值随着 λ 的增加而逐渐减小, 这再次证实了 Paster 的研究^[11]中关于社交网络中的传播衰减具有极高的鲁棒性的观点。由于本文建模方法具有一般性, 因此可以很容易地延伸并用来模拟不同的传播模型。

参考文献

- [1] We Are Social. Digital in 2016 Report[R/OL]. <http://wearesocial.com/special-reports/digital-in-2016>, 2016-01-27.
- [2] 中国互联网信息中心(CNNIC). 第 39 次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL]. <http://www.cnnic.cn/>, 2017-01-22.
- [3] 新浪微博数据中心. 2015 微博用户发展报告[R/OL]. <http://data.weibo.com/report/reportDetail?id=333>, 2016-11-10.
- [4] KEPHART J O, WHITE S R. Measuring and modeling computer virus prevalence[C]// *1993 IEEE Computer Society Symposium on Research in Security and Privacy*, 1993. Proceedings. IEEE, 2002:2.
- [5] NIKOLOSKI Z, DEO N, KUCERA L. Correlation Model of Worm Propagation on Scale-Free Networks[J]. *Complexus*, 2006, 3(1-3):169-182.
- [6] COLIZZA V, VESPIGNANI A. Epidemic modeling in metapopulation systems with heterogeneous coupling pattern: theory and simulations[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2008, 251(3):450-467.
- [7] ONNELA J P, CHRISTAKIS N A. Spreading paths in partially observed social networks[J]. *Phys. Rev. E*, 2012, 85(3 Pt 2):036106.
- [8] MELONI S, ARENAS A, MORENO Y. Traffic-driven epidemic spreading in finite-size scale-free networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(40):16897-16902.
- [9] YANG H X, WU Z X, WANG B H. Suppressing traffic-driven epidemic spreading by edge-removal strategies[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2013, 87(6):064801.
- [10] XIONG F, LIU Y, ZHANG Z J, et al. An information diffusion model based on retweeting mechanism for online social media[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(30/31):2103-2108.
- [11] ZHAO L, WANG Q, CHENG J, et al. Rumor spreading model with consideration of forgetting mechanism: A case of online blogging LiveJournal[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2011, 390(13):2619-2625.
- [12] PANTAZOPOULOS P, KARALIOPOULOS M, STAVRAKAKIS I. Centrality-driven scalable service migration[C]// *International Teletraffic Congress*. International Teletraffic Congress, 2011:127-134.
- [13] MIEGHEM P V. Performance Analysis of Communications Networks and Systems[M]. Cambridge University Press, 2006.
- [14] Rocketfuel. An ISP Topology Mapping Engine[R/OL]. <http://research.cs.washington.edu/networking/rocketfuel>.