

水下光无线传感器网络的连接性分析与定位技术

向劲松, 胡东洋*, 李长萍

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 针对水下光无线传感器网络(UOWSN)节点的传输范围受限和间歇性连接的问题, 利用多跳通信扩大传输范围来增强网络连接性, 提出一种网络节点定位算法。首先, 将 UOWSN 建模为三维(3D)随机缩放模型图, 并根据网络节点数、通信范围以及光发散角推导了该模型下网络节点的连接性概率表达式; 然后, 利用接收信号强度(RSS)定位算法修正距离矢量跳数(DV-Hop)定位算法来解决网络节点的定位问题, 并与现有方案进行分析对比。仿真结果表明提出的定位算法的性能明显优于标准的 DV-Hop 算法和 Hybrid DV-Hop 算法。

关键词: 水下光无线传感器网络; 网络连接性; 距离矢量跳数算法; 接收信号强度算法; 节点定位

中图分类号: TN914 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)04-0001-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Connectivity analysis and location technology of underwater optical wireless sensor networks

XIANG Jingsong, HU Dongyang*, LI Changping

(College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem of limited transmission range and intermittent connection of nodes in underwater optical wireless sensor network (UOWSN), a network node localization algorithm is proposed by using multi-hop communication to expand the transmission range to enhance network connectivity. Firstly, the UOWSN is modeled as a three-dimensional (3D) random scaling model graph, and the connectivity probability expression of the network nodes under the model is derived according to the number of network nodes, communication range and optical divergence angle. Then, the received signal strength (RSS) location algorithm modified distance vector hop (DV-Hop) localization algorithm is used to solve the localization problem of network nodes, and compared with the existing schemes. The simulation results show that the performance of the proposed localization algorithm is significantly better than the standard DV-Hop algorithm and Hybrid DV-Hop algorithm.

Key words: underwater optical wireless sensor network; network connectivity; distance vector hop algorithm; received signal strength algorithm; node location

0 引言

随着海洋经济占各国经济的比重越来越高, 各国开发和利用海洋资源的热情逐年提升, 使得水下光无线传感器网络(UOWSN)成为了重点研究方向^[1]。目前,

UOWSN 广泛地应用在灾难预警、污染物监控、水文数据的检测和采集、海洋资源勘测、辅助导航以及海洋军事等领域^[2]。在众多应用领域中, 只有获取所部署节点的坐标位置信息, 才能提供有效的检测。因此, 如何精准地检测出 UOWSN 中部署节点的位置尤为重要。

在过去的几十年中, 对 UOWSN 的连接性和覆盖范围问题主要以声波的形式进行了深入研究。文献[3]提出了一种基于连接支配集的策略, 结果表明传感器节点的连接性和覆盖范围随着其密度和传输范围的增加也随之提高。文献[4]利用蚁群优化算法在考虑节点分布随机性的情况下最大化地实现网络部署的连接性。然而, 由于水声信道传输时延长、信号带宽受限

收稿日期: 2020-09-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61571072)资助。

作者简介: 向劲松(1975—), 男, 四川达州人, 博士, 教授, 硕士生导师, 现任教于重庆邮电大学通信与信息工程学院, 主要研究方向为激光通信等。主持或主持完成了多项国家自然科学基金、国家 863 项目及省部级项目, 在国内外光学期刊及会议上发表论文数 10 篇, 其中 SCI/EI 检索 20 余篇, 授权发明专利 3 项。

* 通信作者: 胡东洋(E-mail: 2088613539@qq.com)。



和传输速率低等缺点,使得声波通信已经无法满足人类对海洋资源探索的需求。文献[5]考虑了一种二维空间(2D)下的 UOWSN 连接性方案,并推导出节点间连通性概率的闭式表达式。考虑到当光信号在实际的水下空间以一定的角度进行全向传输时,此时的 2D 空间模型则显得过于理想化,本文在此基础上将其推广至三维(3D)空间,并分析此空间下的连接性。

除了连接性问题之外,UOWSN 中节点的定位也非常重要,二者之间的关系是实现众多应用的前提^[5-6]。目前,UOWSN 中常用的定位方案有到达时间(TOA)、到达时差(TDOA)以及接收信号强度等^[7]。文献[8-9]提出一种新型混合声光的 UOWSN 定位技术,兼顾声光通信的优势以提高节点测量精度。文献[10]假设光学无线通信链路为全向的情况下针对光码分多址网络研究了一种接收信号强度(RSS)和 TOA 的 UOWSN 定位方法,结果表明在异步条件下,RSS 的定位性能优于 TOA;而在同步条件下,二者体现的性能优势相反。文献[11]在考虑测距异常的情况下提出了一种基于 RSS 的 UOWSN 鲁棒性定位方案,并优化了参考节点的位置。然而,这些定位方案都没有考虑由于有限的传输距离导致的节点之间的连接性问题。文献[12]考虑了一种 Hybrid DV-Hop 的定位算法,首先将邻居节点之间的 RSS 测量值转化为一跳估计距离,然后将已定位的传感器节点充当参考节点,并用于其余传感器节点的后续定位;虽然该方法利用了网络节点的强连接性和高密度性特点扩大了定位范围,但是也将导致后续定位的节点精度进一步降低。

针对以上缺陷,本文首先建立一种基于 3D 水下光无线通信链路网络模型进行连接性分析,其次提出一种利用 RSS 定位算法修正标准的 DV-Hop 算法的网络节点定位算法,最后验证所提算法的优越性。

1 UOWSN 模型

1.1 网络模型

本文搭建一个 3D 水下光无线通信网络模型,该网络模型由漂浮在服务水域上不同深度的节点组成。假设每个光学无线节点分布在有限区域内遵循泊松点过程 (PPP),如图 1 所示。其中,蓝色圆圈表示嵌入在海底的具有窄光束扫描角的光学传感器节点;绿色圆圈表示光

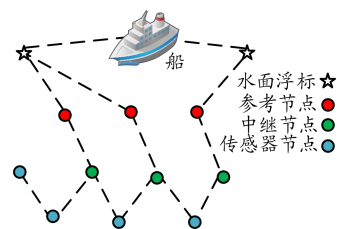


图 1 3D UOWSN 模型

学传感器节点,这是具有较宽光束扫描角度的中继节点;红色圆圈是参考节点并具有较强的通信能力,能够与以五角星表示的表面浮标和中继节点进行信号传输。水面浮标通过射频介质与水面站或船舶通信以传输感测数据。

1.2 水下光无线信道模型

水下水生介质由不同浓度的不同元素组成,这些元素悬浮或溶解在水中,使得发射的光在其传播期间遭受严重的吸收和散射效应^[13]。本文参考 Haltran 模型^[9],将消光系数 $c(\lambda)$ 建模为吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b(\lambda)$ 的组合,即 $c(\lambda)=a(\lambda)+b(\lambda)$,其中 λ 是工作波长。

水下环境中的光学链路通常以直视链路(LOS)、反射链路和逆反射链路的形式存在。为了简化计算,本文主要考虑在 LOS 条件下的损耗模型,确定接收到的光功率。文献[14]给出了一个考虑发射机功率、望远镜增益和损耗乘积的有效模型,其接收到的光功率 P_r 计算方式如下:

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \exp\left(\frac{-c(\lambda)d_{ij}}{\cos\theta_{ij}}\right) \frac{B_{rj} \cos\theta_{ij}}{2\pi d_{ij}^2 (1 - \cos\theta_{0i})} \quad (1)$$

其中, P_t 是节点 i 的传输功率, η_t 和 η_r 分别是发射机和接收机的光学效率, d_{ij} 是节点 i 和 j 之间的传输距离, θ_{ij} 是接收机平面与发射机轨迹之间的角度, B_{rj} 是接收机的孔径面积, θ_{0i} 是节点 i 和 j 之间的发散角。LOS 中,设可达到的数据速率为 R_j^i ,由式(1)可获得节点 i 与 j 之间的估计距离 $\hat{d}_{ij}$ ^[14]为:

$$\hat{d}_{ij} = \frac{2\cos\theta_{ij}}{c(\lambda)} W_0 \left[\frac{c(\lambda)}{2\cos\theta_{ij} \sqrt{\frac{2\pi ThcR_j^i (1 - \cos\theta_{0i})}{\eta P_t \eta_r \eta \lambda B_{rj} \cos\theta_{ij}}}} \right] \quad (2)$$

其中, $W_0(\cdot)$ 是 Lambert W 函数的实部值^[15], T 为脉冲持续时间, η 为检测器计数效率, r_j 为有效接收的光子数, h 为普朗克常数。

2 UOWSN 的连接性分析

一般把通信网络的连接看作是由一组顶点和一组边的无向图组成的模型,其中节点集和光学链接集分别由具有基数 N 的顶点集和相应的边集表示^[16]。在网络中,一般将节点度定义为节点的链路数,孤立节点的节点度为空,最小节点度 $d_{\min}$ 则定义为节点度中的最小值。对于这些指标通常要采用空间节点分布模型进行量化,其中简单的泊松点过程则被广泛地使用^[17]。根据该模型得出 3D 的 PPP 节点的孤立概率^[18]为:

$$P_{iso}=1-\int_0^R \frac{4\pi\rho r^2}{\Gamma(1)} \exp\left(-\frac{4\pi\rho r^3}{3}\right) dr = \exp\left(-\frac{4\pi\rho R^3}{3}\right) \quad (3)$$

其中, R 为节点通信半径, ρ 为节点密度, r 为节点间的实际通信距离。由于光信号在水下 3D 空间中通信具有一定的方向性,除了上式 2 个影响因素外,还需要考虑到光源的发散角 φ ,以此来评估 UOWSN 的 K -连接概率。由此,本文推导出具有方向性传输的 3D UOWSN 节点的孤立概率表达式为:

$$P_{iso}=1-\int_0^R \frac{\pi\rho r^2(1-\cos\varphi)}{\Gamma(1)} \exp\left(-\frac{\pi\rho r^3(1-\cos\varphi)}{3}\right) dr = \exp\left(-\frac{\pi\rho R^3(1-\cos\varphi)}{3}\right) \quad (4)$$

在 3D UOWSN 中没有节点被孤立的概率为:

$$P(d_{min}>0)=\left[1-\frac{\pi\rho R^3(1-\cos\varphi)}{3}\right]^N \quad (5)$$

因此,UOWSN 中每个节点的最小 K -连接概率如式(6)所示。

$$P(d_{min}\geq K)=\left[1-\sum_{i=0}^{K-1} \frac{\left(\frac{\pi\rho R^3(1-\cos\varphi)}{3}\right)^i}{i!} \exp\left(-\frac{\pi\rho R^3(1-\cos\varphi)}{3}\right)\right]^N \quad (6)$$

利用文献[5]中的式(18)即可得出节点间的多跳连接概率。当所有的节点对之间存在 K 条相互独立的路径时,即该网络为 K 连接, $P(K\text{-连接})=P(d_{min}\geq K)$ 。

3 UOWSN 定位系统

因为海底资源的探索只有获取精确的节点位置信息才具有意义,所以掌握节点坐标的位置信息对于设计精确的定位算法和将收集的数据与传感位置相关联至关重要。为了获得理想的定位性能,必须有更好的网络连接性,因为连接良好的网络可以更好地实现节点间的距离估计,从而能明显地减少定位错误。但是,UOWSN 的有限连接对获取网络中整个节点的准确位置信息提出了诸多挑战,尤其是传输距离的限制、方向的随机性和发射角的大小等问题。为此本文在考虑网络连接性的基础上提出一种分布式定位系统,采用标准的 DV-Hop 定位算法,利用距离矢量路由协议对全网广播,使得有限范围内的节点获取跳数与跳距信息从而估计距离,并通过 RSS 定位算法进行误差修正,以最小二乘法的方式求取最终定位坐标。

3.1 标准 DV-Hop 算法基本原理

标准的 DV-Hop 定位算法原理步骤如下:

步骤一:参考节点向邻居节点广播数据包,未知

节点记录参考节点到它的最小跳数,忽略来自同一参考节点的较大跳数,然后将跳数加 1,并转发给邻居节点。重复以上步骤,直到各个节点获得最小跳数。

步骤二:根据所有参考节点记录的其它参考节点的自身位置信息,利用式(7)估算出参考节点的平均每跳距离,并在网络中广播传输,其定义如下:

$$L_{HopSize_i} = \frac{\sqrt{\sum_{i \neq j} (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum_{i \neq j} h_{ij}} \quad (7)$$

其中, h_{ij} 表示参考节点 i 与 j 之间的最小跳数, (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别为参考节点 i 和 j 的位置坐标。假设平均每跳距被未知节点 X_k 接收,由于节点间的最小跳数 h_{ik} 由步骤一得到,便可估算出未知节点到参考节点间的距离 d_{ik} ,具体计算方式如式(8)所示。

$$d_{ik} = L_{HopSize_i} \times h_{ik} \quad (8)$$

步骤三:未知节点获得 3 个及以上参考节点的距离后,即可通过多边定位法或最大似然法计算出未知节点的坐标信息。

3.2 基于 RSS 定位算法改进的 DV-Hop 算法

在标准的 DV-Hop 算法中,网络中的节点分布不均将导致较大的定位误差,而且光传输信号在水下受到严重的衰减。为考虑这一实际场景,本文采用了 RSS 定位算法对 DV-Hop 算法进行跳数与平均跳距修正。

3.2.1 基于 RSS 定位算法修正的跳数

传统的无线传感器网络通常使用 DV-Hop 定位算法将在节点通信范围内的节点跳数值均设为 1,然后使用相同参考节点的平均跳距,虽然理论上 DV-Hop 算法估计出的距离相等,但在实际的可通信范围内节点间的跳数相差甚远。针对此问题,根据式(2),本文采用 RSS 定位算法通过可通信范围内邻居节点接收到的功率来估计二者之间的距离,并将其与节点的通信半径相比得出相对跳数,从而使得节点间的跳数精确化,具体表达式如式(9)所示。

$$C_{ij} = \begin{cases} \frac{\hat{d}_{ij}}{R}, \hat{d}_{ij} \leq R \\ \infty, \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

其中, C_{ij} 为当前节点 i 到达下一节点 j 所需要的最小跳数。通过此方法很好地解决了因跳数不精准而造成的参考节点平均跳距不合理的问题,从而大大地降低了定位误差。

3.2.2 基于 RSS 定位算法修正的平均跳距

标准 DV-Hop 算法的平均跳距是以节点间的欧

式距离除以跳数计算而来,而在实际的节点间通信距离并不是以直线形式存在,因此求得的平均跳距存在一定的误差,从而影响定位的精度。为解决这一问题,本文使用 RSS 定位算法估计的距离与实际距离之差除以跳数来修正平均跳距。即当每个参考节点接收到其它参考节点的广播信息后,通过式(2)将节点之间的 RSS 值转换为距离 $\hat{d}_{ij}$,然后将其与实际距离做差求解平均跳距误差,最后根据参考节点的平均跳距误差修正平均跳距,用 $L_{\text{new_HopSize}_i}$ 表示新的平均跳距,其计算过程如式(10)所示。

$$L_{\text{new_HopSize}_i} = L_{\text{HopSize}_i} + \frac{\sum_{i \neq j} |d_{ij} - \hat{d}_{ij}|}{\sum_{i \neq j} HC_{ij}} \quad (10)$$

对于未知节点来说,如果仅以最近参考节点的平均跳距进行计算将会造成此未知节点定位精度的不准确,进而影响整个传感网络节点的定位精度。因此,有必要考虑多个参考节点的平均跳距对未知节点的作用,并使得其各参考节点的权值之和始终为 1。假设未知节点总共收到 m 个参考节点的数据包,即相当于此时的未知节点是 m 连接的,然后将每个参考节点都赋予加权重 C_i ,计算方式如下:

$$C_i = \frac{1/L_{\text{new_HopSize}_i}}{\sum_{i=1}^m 1/L_{\text{new_HopSize}_i}} \quad (11)$$

由式(11)可知,参考节点平均跳距的加权值等于参考节点修正后的平均跳距的倒数除以各参考节点修正后的平均跳距之和。通过这个归一化的加权处理并结合参考节点的平均跳距可计算出未知节点的平均跳距 $L_{\text{HopSize_Avg}_i}$ 为:

$$L_{\text{HopSize_Avg}_i} = \sum_{i=1}^m L_{\text{new_HopSize}_i} \times C_i \quad (12)$$

对各个参考节点的平均跳距加权处理后,可以反映未知节点的平均每跳距离。因此,该算法能够更好地反映网络的实际平均每跳距离。

4 仿真分析

为验证所提改进算法的有效性,本文利用 Matlab 2014b 软件对标准 DV-Hop 算法和 Hybrid DV-Hop 算法^[12]进行对比分析,仿真实现的流程图如图 2 所示。

4.1 仿真环境参数设置

在进行仿真实验时,随机生成的传感器节点分布

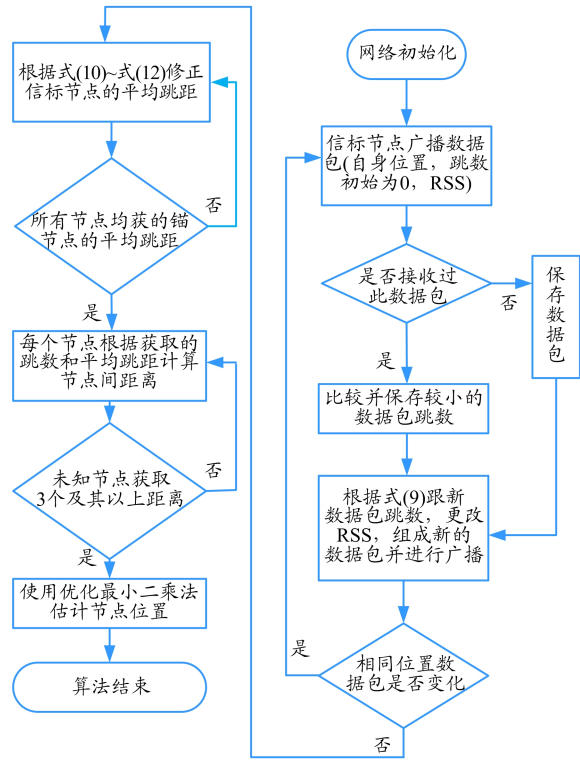


图2 仿真实现流程图

在体积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的网络区域中,每个节点具有相同的通信范围。因为节点的随机部署导致偶然误差的存在,所以在相同的仿真环境下进行 $k=1000$ 次实验取其平均值作为最终结果。为了更好地衡量定位算法的定位精度,本次实验仿真均采用统计的归一化定位误差(NLE)作为该算法的衡量指标,其定义如下:

$$NLE = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{M-m} \frac{\|X_i - \hat{X}_i\|}{M-m}}{kR} \quad (13)$$

其中, M 是网络节点数量, X_i 是未知节点的实际位置, $\hat{X}_i$ 是未知节点的估计位置。

4.2 UOWSN 连接性能评估

不同发散角下,连接率和半径的关系如图 3 和图 4 所示。可以看出,随着网络节点数、发散角和通信半径的增加,网络连接率也是逐渐增大的。因为这些参数的改变使得网络节点密度、覆盖率以及通信距离出现不同程度的增加,从而有效地提高了网络连接率;而在同等场景下,随着连接度 K 值的增加,需要更大的通信半径才能够维持网络连接度。网络连接度 K 的取值与 NLE 的关系如图 5 所示,可以清晰地看出在同等半径的条件下,随着网络连接度性能的提升节点 NLE 随之降低。

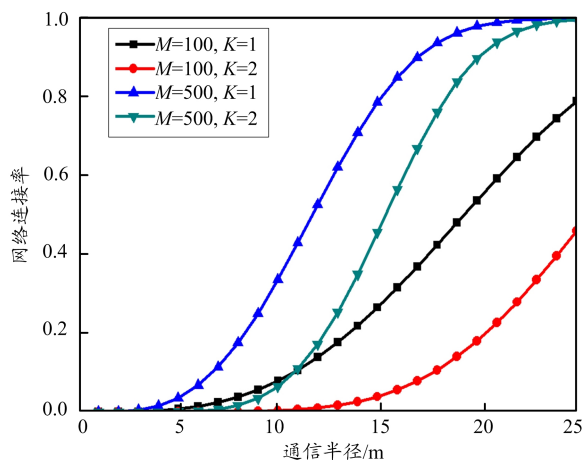
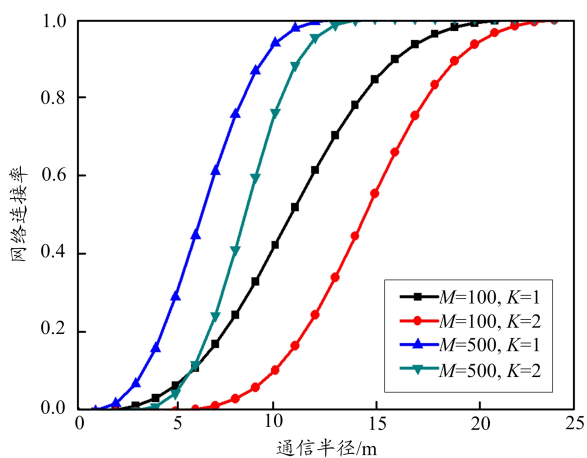
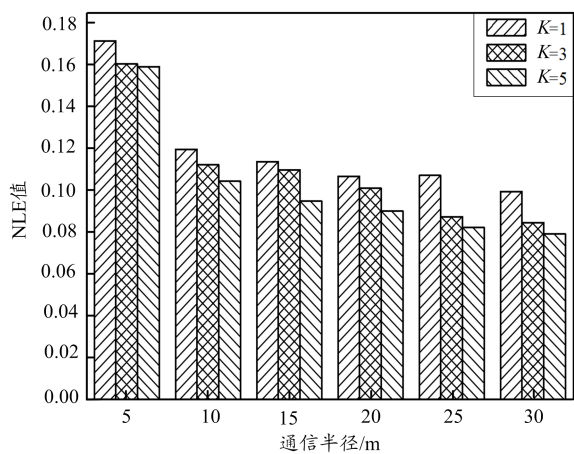
图3 连接率与半径的关系 ($\varphi=2\times\pi/9$)图4 连接率与半径的关系 ($\varphi=\pi/2$)

图5 连接度K与NLE关系图

4.3 UOWSN 定位结果分析

随机分布 100 个节点,参考节点的比例保持在 0.15,在不同通信半径情况下,各类算法的性能比较如图 6 所示。可以看出,随着节点通信半径逐渐增大,总体上看 3 种算法的归一化 NLE 都有所下降。当通信半

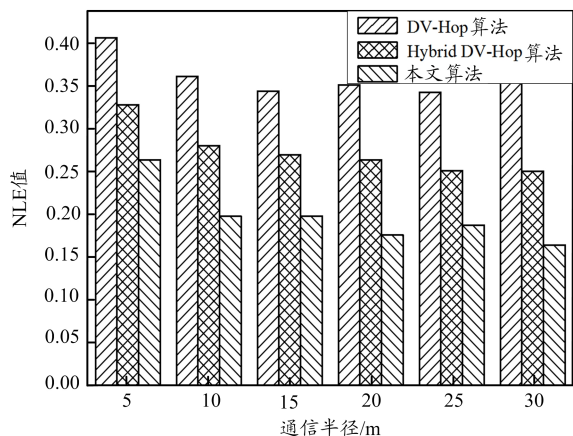


图6 通信半径与NLE关系图

径 $R=20$ m 时,3 种定位算法的 NLE 值为 0.35、0.26 和 0.17。本文的改进算法相比于标准的 DV-Hop 算法和 Hybrid DV-Hop 算法的定位误差分别平均下降了 51% 和 34%。由此可得,本文提出的算法具有较高的定位精度。

参考节点比例与 NLE 之间的关系如图 7 所示。随着参考节点比例的增加,3 种算法的 NLE 都在减小。当参考节点比例增加到 0.15 时,NLE 出现了增加的情况,当参考节点达到一定比例时,累计误差逐渐增加,所以最终导致 NLE 上升。比较 3 种算法,本文的算法仍为最优。参考节点比例为 0.15 时,本文改进算法相比于标准的 DV-Hop 算法、Hybrid DV-Hop 算法的 NLE 分别降低了 47% 和 31%。

节点总数与 NLE 之间的关系如图 8 所示。随着节点数量的增加,3 种算法的 NLE 都在减小。当节点总数在 120~180 之间变化时,本文算法相对于标准的 DV-Hop 算法和 Hybrid DV-Hop 算法的 NLE 改变最为直观,随后趋于平缓。这是因为随着节点密度的增

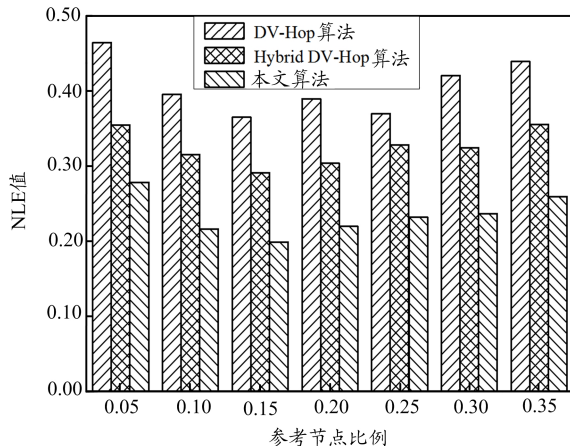


图7 参考节点比例与NLE关系图

加, 缩短了一跳传输距离, 光信号受到的衰减更小, 从而使得修正的跳数更为精准, 最终使得估计位置更贴近实际值。

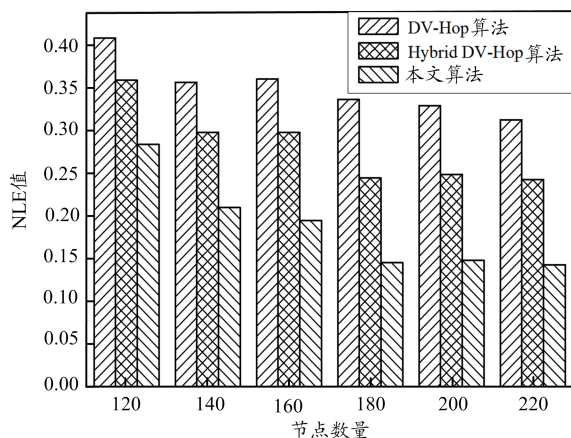


图8 节点数量与NLE关系图

5 结束语

本文设计了一种UOWSN通信链路的3D模型, 通过分析网络中节点的数量、通信半径以及光发散角等特性推导出了该网络模型下的连接性概率表达式。此外, 在标准DV-Hop定位算法的基础上, 提出了一种用RSS测距技术修正的分布式算法, 从未知节点到信标节点的跳数与距离出发, 对其误差修正。仿真验证表明: 本文所提算法相比于标准的DV-Hop算法和Hybrid DV-Hop算法均有明显的优势。由于水下环境的复杂性对水下光信号会产生严重的影响, 因此亟需研究一种符合实际水下光信号传输的信道模型, 这也将是本文下一步研究重点。

参考文献:

- [1] 敖琨, 姚猛, 马春波. 基于MIMO的水下LED光通信系统的设计[J]. 光通信技术, 2017, 41(9): 24-27.
- [2] ZENG Z, FU S, ZHANG H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.
- [3] SENEL F, AKKAYA K, EROL-KANTARCI M, et al. Self-deployment of mobile underwater acoustic sensor networks for maximized coverage and guaranteed connectivity[J]. Ad hoc networks, 2015, 34(11): 170-183.
- [4] WANG H, LI Y, ZHANG L, et al. A self-deployment algorithm for

maintaining maximum coverage and connectivity in underwater acoustic sensor networks based on an ant colony optimization [J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1479-1485.

[5] SAEED N, CELIK A, ALOUINI S, et al. Performance analysis of connectivity and localization in multi-hop underwater optical wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(11): 2604-2615.

[6] VAVOULAS A, SANDALIDIS H G, VAROUTAS D. Underwater optical wireless networks: a k-connectivity analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(4): 801-809.

[7] 黄胜, 宁博文, 向劲松, 等. 基于强度组合与距离加权的室内可见光定位算法研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(8): 1-6.

[8] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURI T Y, et al. Energy harvesting hybrid acoustic-optical underwater wireless sensor networks localization [J]. Sensors, 2018, 18(2): 51-66.

[9] SAEED N, CELIK A, AL-NAFFOURI T Y, et al. Localization of energy harvesting empowered underwater optical wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(5): 2652-2663.

[10] AKHOUNDI F, MINOOFAR A, SALEHI J A. Underwater positioning system based on cellular underwater wireless optical CDMA networks[C]//2017 26th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), April 7-8, 2017, Newark, USA. New York: IEEE, 2017: 1-3.

[11] SAEED N, AL-NAFFOURI T Y, ALOUINI M S. Outlier detection and optimal anchor placement for 3D under water optical wireless sensor network localization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 611-622.

[12] OMAR C, GHULAM M B, ROOBAAE A. A hybrid DV-Hop algorithm using RSS for localization in large-scale wireless sensor networks[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1469-1483.

[13] HALTRIN V I. Chlorophyll-based model of seawater optical properties [J]. Applied Optics, 1999, 38(33): 6826-6832.

[14] SHLOMI A, DEBBIE K. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(3): 530-539.

[15] CORLESS R M, GONNET G H, HARE D E G, et al. On the lambert W function[J]. Advances in Computational Mathematics, 1996, 5(1): 329-359.

[16] PENROSE MD. On k-connectivity for a geometric random graph[J]. Random Structures and Algorithms, 1999, 15(2): 145-164.

[17] BETTSTETTER C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network [C]//The 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MOBIHOC), June 9-11, 2002, Lausanne, Switzerland. New York: ACM, 2002: 80-91.

[18] HAENGGI M. On distances in uniformly random networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(10): 3584-3586.