

在动态水环境中基于熵的无线传感器网络路由算法

邹 赛^{1,2}, 汪文勇², 唐 勇¹, 张 骏¹

(1. 电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731; 2. 重庆电子工程职业学院软件学院 重庆 沙坪坝区 401331)

【摘要】随着人们对水环境的日益关注以及无线传感器网络技术的成熟, 如何使用无线传感网络对水环境进行监控成为一项重大课题。该文在动态水环境中, 基于正方体网格剖分思想提出了一种以熵为尺度来衡量路径稳定性的QoS路由算法(EWSQoS), 该算法使用正方体网格对信息收集区域进行剖分, 再在此基础上寻找到达Sink节点的最短网格, 最后利用“熵”来选择路由, 减少了重建路由(或路由修复)的次数, 在网络拓扑频繁变化的环境中尽可能地提供QoS保证。经仿真实验与性能分析表明, EWSQoS算法与Long-term、DBR、DTN等算法比较, 在路由重建次数、路由成功率、网络能耗、网络延时方面具有更优性能。

关键词 熵; 网格剖分; QoS; 传感器网络

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.014

Routing Algorithm of Wireless Sensor Network Based on Entropy Standard in Dynamic Water Environment

ZOU Sai^{1,2}, WANG Wen-yong², TANG Yong¹ and ZHANG Jun¹

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. School of Software Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering Shapingba Chongqing 401331)

Abstract How to apply wireless sensor network to monitor the water environment has become an important subject. Based on the theory of square grid partition, this paper proposes a routing algorithm with the yardstick of entropy to evaluate the stability of route in the dynamic water environment. In this algorithm, the information collecting area is subdivided by means of cube grid, the shortest route to sink node in the grid is searched, and the router is chosen by means of entropy to reduce the number of reconstructing routers or repairing routers and possibly provide QoS guarantee in the environment in which network topology ration changes frequently. The stimulated experiment and performance analysis prove that EWSQoS algorithm takes more advantage than Long-term, DBR, and DTN algorithms in the fields of the number of reconstructing routers, success rates of routers, energy consumption of network, and network latency.

Key words entropy; grid partition; quality of service; sensor network

物联网的出现, 给人们生活带来了深刻的变化, 实现了人与人、人与物、人和虚拟世界、人和现实世界的联系。传感器网络属于物联网的一种, 实现了信息融合, 改善了生活质量^[1-2]。由于环境的不确定性, 需要布置许多传感器节点协同工作, 对大规模传感器网络的研究引起大家广泛关注, 使得无线传感器网络的研究得到了飞速发展^[3-4]。随着人们对水环境的日益关注, 传感技术的成熟, 如何使用传感网络对水质进行监控有重大的现实意义^[5-9]。

因动态水环境中的节点位置是不断变化的, 则路由也会随之调整, 对网络稳定性影响较大, 采用

何种策略在数据源节点和目的节点间建立一条相对稳定数据传输路径是一个难点。目前水面路由协议一般可分为主动路由协议、按需路由协议和地理路由协议3种。主动路由协议由基站周期性广播路由信息包建立路由, 文献[10]在水下3D网中对主动路由作了研究, 它实现简单, 可以有效避免信道拥塞, 保证传输质量。但对网络规模适应性差, 节点频繁移动也会导致路由维护开销大; 按需路由根据需要临时建立路由, 因此更适合大规模水面移动网络。文献[11]提出一种适用于水面存在多个漂浮基站随水流漂移的3D网络路由协议, 但构建基站的成本太

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-09-10

基金项目: 国家发改委CNGI二期项目(CNGI-09-01-07); 国家863项目(2008AA01A303); 国家973项目(2009CB320505); 2014年重庆市教委科学技术研究项目; 重庆市“十二五”教育规划课题(2013-ZJ-077); 教育部中国移动科研基金(MCM20123041, MCM20122011); 重庆市科技计划(CSTC2013yykfA40003)

作者简介: 邹赛(1981-), 男, 副教授, 主要从事计算机网络方面的研究。

高。地理路由协议利用节点的地理信息实现路由, 它的路由效率较高、代价小, 但不适用于动态水环境。除了上述路由外, 针对水下信道具有时断时续和稀疏网的特点, 文献[12]对DTN(delay/disruption tolerant network)技术应用用于水下路由进行了研究, 然而水下传感器网络的一个最显著的特点是其频繁的流动性, 故所选满足QoS约束的路径可能在数据传送完成之前断掉, 需要重建路由或者进行路由修复。文献[13]在Ad hoc网络中提出了一种表征路径寿命(稳定性)的新尺度——熵, 能够长时间运行, 对动态水环境中的传感器网络的稳定性有很好的借鉴作用。

由于传感器节点一般通过电池驱动, 节点数量众多, 部署在水环境中, 从而使得替换节点电池或者对节点电池进行充电都是不可行的。因此, 在单个节点能量受限、生存时间较短的情况下, 如何延长整个网络系统的生存时间, 保证网络路由质量, 是动态水环境无线传感器网络设计中的一个重要挑战。因此在水环境无线传感器网络的QoS路由中选择长寿的路径显得非常重要。本文基于熵, 提出了一种延时约束最小费用动态水环境中完全分布式无线传感器网络QoS路由算法。

1 问题分析及模型描述

在动态水环境中, 随着水流的移动及自然界风的作用力, 用来监测的传感器节点按一定的速度、方向进行移动。由于水下的地形环境不一样, 流动水的阻力也不一样, 所以每个地方的水流速度不一样, 从而导致传感器节点运动的速度、方向可能不太一样。整个监测区域内传感器节点在建立初期能够正常通信, 经过一段时间运行后以前的中继节点可能已经发生移动, 或者节点本身发生了移动, 数据不能转发, 需要重新建立路由, 这样的结果导致丢包率大大上升。寻找一条长时间稳定的路径才能解决该问题, 而在信息论中, 熵表示的是不确定性的量度, 用来消除不确定性的东西。借助熵的概念, 可转化为如下问题: 寻找一条从开始到结束一组节点相对位移最少的量作为熵, 来衡量路径稳定性。

模型设定如下: 节点携带有限能量的电池, 节点可能由于水流的冲击、河流地形的阻力等因素影响而移动。抽象WSN拓扑为一个三维的无向图 (V, E) , 其中 V 、 E 分别表示节点、链接的集合。对于任意节点 $i \in V$, 当前节点能量记作 $e(i)$, 节点 i 的当前

覆盖半径记作 $r(f)$, 通信半径为 R , 且 $R \geq 2r(f)$; 节点以最大功率 P 进行信号发射时能覆盖半径为 $R(P)$ 的球面区域, 节点 i 的运动速度记作 $U(i)$ 。节点 X 到 Y 的路径 $\text{path}(X, Y)$ 记作 $(X_1, X_2, \dots, X_{k-1}, X_k, \dots, Y)$ 形式, 其中任意相邻两节点 X_{k-1} 、 X_k 相互位于对方的通信范围内, 把节点 i 通信范围内的所有节点的集合记为 $S(i)$ 。

2 熵尺度

在动态水环境中的传感器网络, 设计QoS路由算法的最重要的一个问题是如何设计能够适应网络拓扑快速改变的路由算法, 即希望选择一条稳定的路径或者长寿的路径。为此, 需要提出一种尺度来衡量路径的稳定性或者路径的寿命。由于整个网络相关节点都处在运动当中, 如果每条路径上相关的节点相对运动位移越少, 则整个网络越稳定。本文取3个量衡量它们相对运动情况: 各个移动节点的位置、速度及其覆盖半径和传感半径。假定 a 、 b 为相邻的两个节点, 经过 t 时刻, a 节点的相关特征向量表示为:

$$r_a = \text{pos}(a, x, y, t_0), \text{pos}(a, x, y, t_n), u(a, t_0), u(a, t_n) \quad (1)$$

式中, r_a 表示节点 a 在 t_0 和 t_n 时刻的相关特征量, $\text{pos}(a, x, y, t_0)$ 、 $\text{pos}(a, x, y, t_n)$ 分别是节点 a 在 t_0 和 t_n 时刻的位置向量; $u(a, t_0)$ 、 $u(a, t_n)$ 分别是节点 a 在 t_0 和 t_n 时刻的速度向量。

基于式(1), 可以定义经过 t 时刻后 a 、 b 的相对位移量的特征值为:

$$\text{RL}_{a,b} = \frac{(\text{pos}(b, x, y, t_n) - \text{pos}(a, x, y, z, t_n))}{/(\text{pos}(b, x, y, t_0) - \text{pos}(a, x, y, z, t_0))} \quad (2)$$

由物理学速度与位移关系, 可得:

$$\begin{cases} \text{pos}(a, x, y, z, t_n) = \text{pos}(a, x, y, t_0) + u(a, t_0)t \\ \text{pos}(b, x, y, z, t_n) = \text{pos}(b, x, y, t_0) + u(b, t_0)t \end{cases} \quad (3)$$

把式(3)代入式(2)得:

$$\text{RL}_{a,b} = \left\{ \frac{(u(b, t_0) - u(a, t_0))t}{(\text{pos}(b, x, y, z, t_0) - \text{pos}(a, x, y, z, t_0))} \right\} + 1 \quad (4)$$

基于此, 构造特征向量:

$$\begin{aligned} \text{RRL}_{a,b} &= 1 + |u(b, t_0) - u(a, t_0)|t \div \\ &|\text{pos}(b, x, y, z, t_0) - \text{pos}(a, x, y, z, t_0)| = \\ &1 + |u(b, t_0) - u(a, t_0)|t \div \\ &\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中每隔一个时间间隔, 相对位置向量和相对速度向量被计算和更新。整条路径的特征向量为:

$$\text{RRL}_{a, \text{sink}} = \sum_{i=1}^{\text{sink}} \text{RRL}_{i-1, i} \quad (6)$$

基于式(6)定义, 定义熵为:

$$\text{Entropy} = \text{path}(x, y) \cdot (u(b, t_0) - u(a, t_0)) \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得:

$$\text{Entropy} \sum_{k=x, t=t_0}^{k=y, t=T} [U(k, t_0) - U(k+1, t_0)] t \quad (8)$$

当熵接近于零时, 整条路径最为稳定。

3 QoS路由选择算法

整个算法分为3个步骤, 先把信息收集区域进行网络剖分, 剖分后sink节点把所有信息进行广播, 使得每个节点知道其所取的网格及位置; 接着对每一个网格进行分布式运算, 寻找每个网格sink节点一条或几条最短网格路径, 为使网络正常工作时, 整体网络传输能量消耗最少, 规定只能是两个相邻的网格才能传输数据, 最后基于熵的思想寻找一条适合路径, 经过一段时间运行后, 利用熵对路径进行自动修补, 即节点失效后整个网络路由结构自愈。

1) 网格的剖分。

在水流的影响下, WSN节点处于位置不固定状态, 因此节点的定位计算需要不断地进行, 为方便计算, sink节点首先将其目标区域剖分为正方体网格, 对给定区域 G 计算其最大长度 l 、宽度 w 和高度 h , 将子区域 P 划分为 $\lceil 2(l+r)/\sqrt{2}r \rceil \times \lceil 2(w+r)/\sqrt{2}r \rceil \times \lceil 2(h+r)/\sqrt{2}r \rceil$ 个正方体, 并将得到的剖分信息广播给网络中的所有传感器节点^[14], 其中 $\lceil x \rceil$ 为大于等于 x 的最小整数, 并对网格进行编号, 如图1所示, 每个网格表示为 $W_{x,y,z}$, 节点的位置信息记作 $\text{pos}_{x,y,z}$, 显然, 按上述方法构造的每个正方形, 其外接圆的半径正好为传感器节点的传感半径的一半。由假定条件可知, 在同一个网格内部的节点都能够覆盖整个网格, 且相邻的两网格内的节点能够自由通信。按三维三标方法对网格进行编码, 最靠近sink的格点为 $W_{0,0,0}$, 具体方法如图1所示; 同时把整个网格内的节点进行编号, 并记作集合 $\text{SW}(P_i)$, $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 。

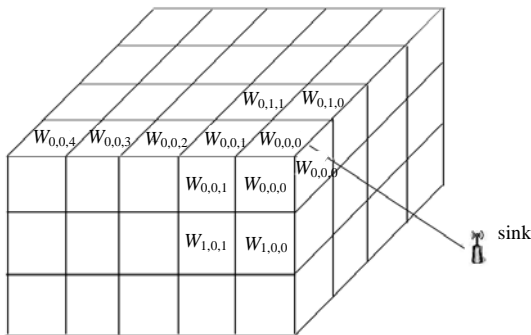


图1 网络的剖分图

2) 最短网格路径的确定。

由简单的数学知识可知, 两点间直线距离最短, 而在立方体的网格中则对角线距离最短, 所以网格最短路径可转化为求对角线的网格数与 (x,y,z) 轴的平移的网格数(如图2所示), 具体方法如下:

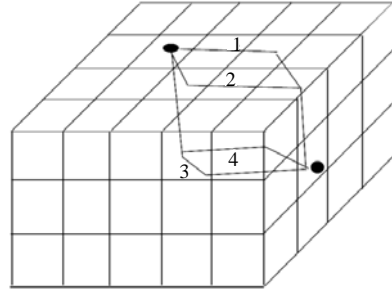


图2 最短网格路径的确定

① 从图1可知, 每个网格到原点对角线的格数为网格坐标值的最少值, 即表示为:

$$\text{Num}_d = \min(|w_{i,x}|, |w_{i,y}|, |w_{i,z}|) \quad (9)$$

式中, Num_d 为网格 i 到网格 $W_{0,0,0}$ 的网格数; $|w_{i,x}|, |w_{i,y}|, |w_{i,z}|$ 分别为网格 i 的 (x,y,z) 的坐标的绝对值。

② 在图2中标明了4条相关的最短路径, 从而可分别得知 x 、 y 、 z 方向的位移量为:

$$\begin{cases} \text{Num}_{dx} = |w_{i,x}| - \text{num}_d \\ \text{Num}_{dy} = |w_{i,y}| - \text{num}_d \\ \text{Num}_{dz} = |w_{i,z}| - \text{num}_d \end{cases} \quad (10)$$

式中, Num_{dx} 、 Num_{dy} 、 Num_{dz} 为网格 i 到网格 $W_{0,0,0}$ 的 (x,y,z) 轴的网格数。

③ 从式(9)和式(10)可得一条最短网格路径:

$$\text{path}(w_i - w_0) \in \{w_{i,x,y,z}, w_{i,x,y,z-1}, \dots, w_{0,0,0}\} \quad (11)$$

式中, $\text{path}(w_i - w_0)$ 为网格 W_i 到 W_0 具体经过的网格; d 为 Num_d 的简写。

同理可求其他相关路径。

3) 基于熵的路径收集、调度、维护策略。

① sink节点向信息收集区域发出查询请求, 最外层进行信息处理。把集合 $\text{SW}(P_i)$ 编号最小的节点设为active, 同一网格内其余节点设为Sleep。

② active节点按步骤2)中所建立的各条最短网格路径, 建立熵尺度, 所选取节点设为active, 同一网格内其余节点设为sleep, 一直到达 $W_{0,0,0}$ 节点, 即sink节点, 路由路径建立成功。

③ 经过一段时间运行后, 节点先计算所在位置, 计算公式如式(12)所示并且把同一网格的节点编为一簇:

$$\begin{cases} w_x = \lfloor p_x \rfloor \\ w_y = \lfloor p_y \rfloor \\ w_z = \lfloor p_z \rfloor \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\lfloor p_x \rfloor$ 、 $\lfloor p_y \rfloor$ 、 $\lfloor p_z \rfloor$ 分别为节点 p_{xyz} 的 (x,y,z) 轴坐标的向下取整值, w_x 、 w_y 、 w_z 为网格 $W_{x,y,z}$ 的 (x,y,z) 轴坐标。

④ active 节点离开网格后, 在网格内重新计算熵尺度, 选择熵最小的节点为 active 节点; 当熵值相同时, 选用编号最小的节点为 active 节点。

⑤ 当下一个网格没有节点时, 对相邻的 25 个网格内的 active 节点进行熵值计算, 如图 3 所示, 选择熵值最小的节点为两条路共有的路由转发节点。

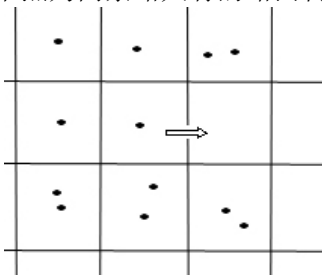


图3 路由转发节点的下一跳网格为空

⑥ 除进入网格外, 相邻 25 个网格都没有节点时, 此条路径通信结束。

4 仿真实验及性能分析

为了评估算法的性能, 使用 C# 语言设计了仿真程序。假设每个节点的能量为 100 00 J, 收集 1 个单位信息所需能耗 1 J, 节点感知所需能耗 0.5 J, 接收单位信息所需能耗 8 J, 发送单位信息所需能耗 20 J, 整个信息收集区域为 $10 \times 10 \times 10$ 个单位空间, 节点的速度值在实验 1 中匀速, 方向随机; 在实验 2 中速度值和方向都随机。

1) 实验 1

每个节点的速度值 $U(i) \in \{0.001 \text{ 单元格/s} \sim 1 \text{ 单元格/s}\}$, 方向随机; 在初使时每个网格最少存在 10 个节点, 节点的具体位置随机, 每秒完成一次数据的收集、传送, 整个网络的能量消耗、路径失效情况如图 4~图 6 所示。从图中可以看出, 节点速度值的改变, 对整个网络能量消耗影响不大, 因为在网络中能量的消耗主要在传送数据, 而在传送过程中节点的跳数基本不变, 所以能量消耗差别不大; 而路径失效的次数与节点的速度存在很大的关系, 当速度越快, 路径失效的次数就越多, 而重建路径需要消耗能量, 所以路径查询能量消耗就越多。

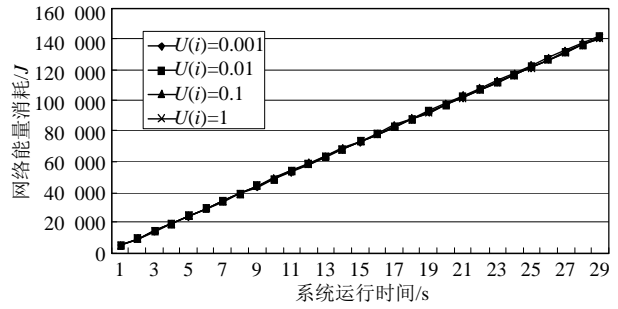


图4 随时间运行网络能量消耗图

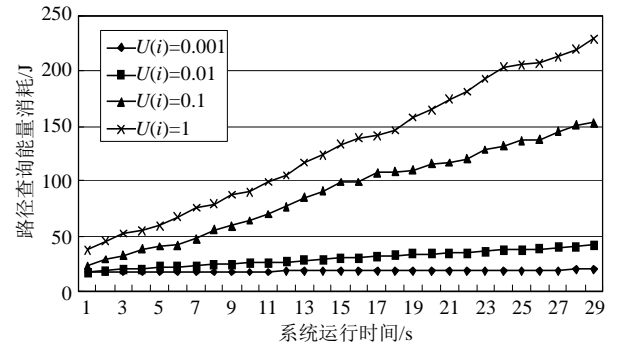


图5 随时间运行网络路径查询能量消耗图

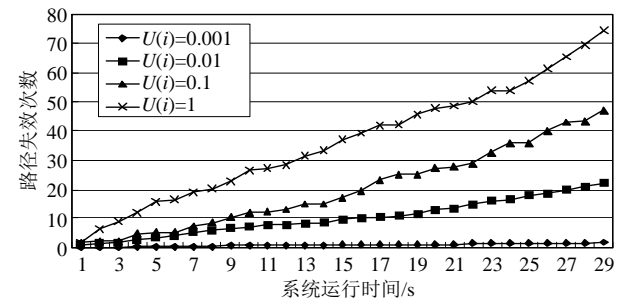


图6 随系统时间运行路径失效图

2) 实验 2

每个节点的速度值和方向都随机, 速度值的取值范围 $U(i) \in \{0.001 \text{ 单元格/s} \sim 1 \text{ 单元格/s}\}$, 在初使时每个网格最少存在 10 个节点, 节点的具体位置随机, 每秒完成一次数据的收集、传送, 整个网络的能量消耗、路径失效情况如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出能量消耗基本是成正比例增长的, 网络稳定性方面越到后面越不稳定。

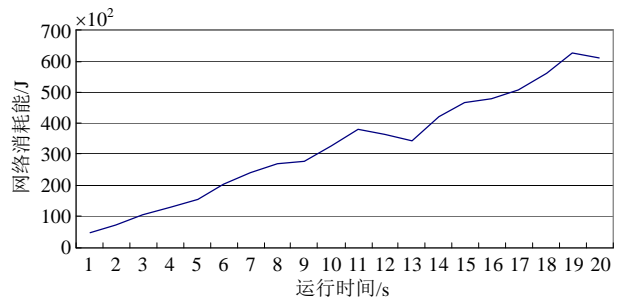


图7 随时间运行网络能量消耗图

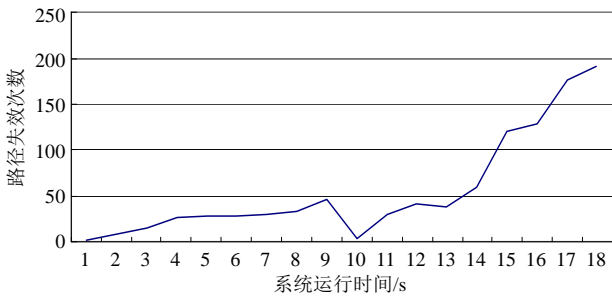


图8 随系统时间运行路径失效图

为了验证EWSQoS算法的性能，对路由重建次数、路由成功率、网络能耗、网络延时等4个性能尺度与文献[4]的Long-term算法、文献[5]的DBR算法、文献[7]的DTN算法进行比较，具体情况如图9~图12所示。

其中路径重建次数是指数据连接请求成功建立路由到完成数据传送之间所需重建路由的次数(在本仿真中，假设在出现路径错误之后就重建路由)；路由成功率是成功建立的连接数与总的连接请求数的百分比值；网络延时主要由收集数据包的延时、一个传感节点到下一个传感节点的传播延时、传播路径重建延时3部分组成。

图9给出了各种算法路径重建次数的仿真结果。仿真中假设当出现由于节点移动性所引起的路径错误时就重建路由(实际上，更有效的方式是进行路径修复)，因此路径重建的次数也在一定程度上表征了路径的稳定性。从图中可知，EWSQoS算法的路径重建次数最低；DTN算法的路径重建次数在开始运行时低于Long-term算法，后期基本差不多；DBR算法的路径重建次数最高。这表明EWSQoS算法所提出的熵尺度的确是衡量路径寿命(稳定性)的尺度，并且能够选出长寿(即稳定)的满足QoS要求的路径。

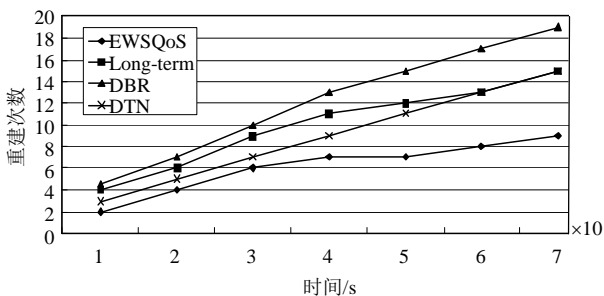


图9 路径重建数

图10给出了各种算法的路由成功率的仿真结果。可以看出几种算法的路由成功率相差不多，EWSQoS算法稍微优于其他算法。在拓扑结构高度动态变化的环境中，EWSQoS与DTN算法不需要维持某些全局状态，是一个不完全分布式的路由算法，

仅仅依靠局部信息选择路由，因此，能够取得比Long-term算法和DBR算法更好的路由成功率。

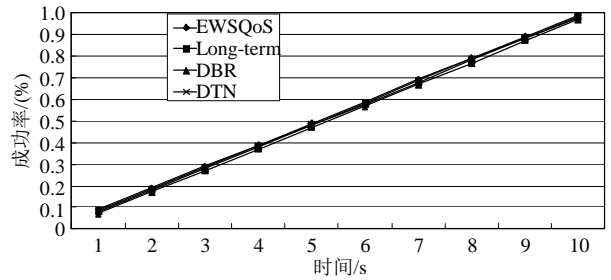


图10 路由成功率

图11给出了各种算法路由时能量消耗的仿真结果。在网络建立时能量消耗数相差不多，网络运行稳定后EWSQoS算法能量消耗远远少于其他算法。主要是因为它采用了最大跳数限制，经过两次排序过滤等多种机制减少了路由消息开销，从而使得整个网络稳定长寿。

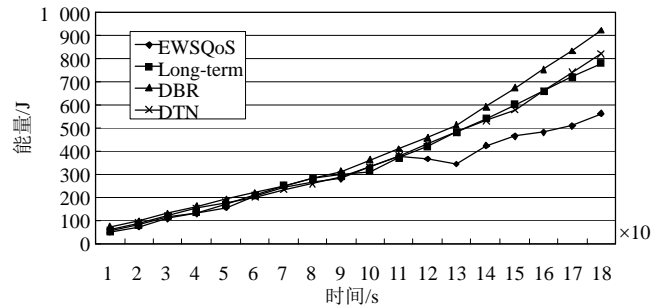


图11 能量消耗数

图12给出了各种算法的网络延时仿真结果。从图中可以看出随着原始数据量的增加，各算法的网络延时相应增大。Long-term算法和DBR算法有最大的网络延时，EWSQoS算法网络延时最少。

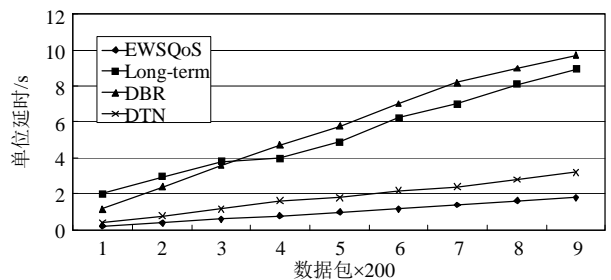


图12 网络延时

5 总结

本文针对动态水环境中的节点位置是不断变化而引起路由路径调整问题进行了研究，基于熵的思想提出了一种在数据源节点和目的节点间建立相对稳定数据传输路径路由算法。该算法减少了重建路由(或路由修复)的次数，在网络拓扑频繁变化的环境中尽可能地提供QoS保证，经仿真实验与性能分析

表明, EWSQOS算法与Long-term、DBR、DTN等算法比较在路由重建次数、路由成功率、网络能耗、网络延时方面具有更优性能。

参 考 文 献

- [1] ZOU Q M, QIN L J, MA Q Y. The application of the internet of things in the smart grid[J]. *Materials Science and Information Technology*, 2012, 433(440): 3388-3394.
- [2] BEZDEK J C, RAJASEGARAR S, LECKIE C, et al. Anomaly detection in environmental monitoring networks[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2011, 5(6): 52-58
- [3] TOPCUOGLU H, ERMIS M, BEKMEZCI I, et al. A new three-dimensional wireless multimedia sensor network simulation environment for connected coverage problems[J]. *Simulation Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 2012, 88(1): 110-122.
- [4] CHEN F, DELANNAY D, de VLEESVHOUWER C. An autonomous framework to produce and distribute personalized team-sport video summaries: a basketball case study[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(6): 1381-1394.
- [5] HUNG C C, PENG W C, LEE W C. Energy-aware set-covering approaches for approximate data collection in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2012, 24(11): 1993-2007.
- [6] HU Tian-si, FEI Yun-si. QELAR: a machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(6): 796-809.
- [7] ZHONG Zhou, ZHENG Peng. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(3): 335-348.
- [8] LUO Han-jiang, GUO Zhong-wen. LDB: Localization with directional beacons for sparse 3D underwater acoustic sensor networks[J]. *Journal of Networks*, 2010, 1(5): 28-38.
- [9] LI Mo, LIU Yun-hao. Iso-Map: Energy-efficient contour mapping in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2010, 5(22): 699-710.
- [10] JIANG P, HUANG Qing-bo, WANG Jian-zhong. Research on wireless sensor networks routing PrOtOcol for water environment monitoring in wetlands[C]//International Conference on Innovative, Computing, Information and Control. [S.l.]: IEEE, 2006: 251-254.
- [11] POMPILI D, MELODIA T, AKYILDIZ I F. A resilient routing algorithm for long-term applications in underwater sensor network[C]//Proc of the MedHoc Net. New York: ACM, 2006: 298-309
- [12] YAN H, SHI Z J, CUI J H. DBR: Depth-based routing for under water sensor networks[G]//I NCS 4982. Berlin: Springer, 2008: 72-86.
- [13] CHANDRASEKHAR V, SEAH W K, CHOO Y S, et al. Localization in underwater sensor networks: survey and challenges[C]//Proc of the 1st ACM Int Workshop on Underwater Networks 2006. New York: ACM, 2006.
- [14] GUO Z, COLOMBI G, WANG B, et al. Adaptive routing in underwater delay/disruption tolerant sensor networks [C]//Proc of the 5th IEEE/IFIP Annual Conf on Wireless on Demand Network Systems and Services. Piscataway, NJ: IEEE, 2008.
- [15] 沈晖, 石冰心, 邹玲, 等. Ad hoc网中基于熵的长寿分布式QoS路由算法[J]. *软件学报*, 2005, 16(3): 445-452. SHEN Hui, SHI Bing-xin, ZOU Ling, et al. A distributed entropy-based long-life QOS routing algorithm in Ad hoc network[J]. *Journal of Software*. 2005, 16(3): 445-452.

编辑 张俊