

基于无线传感网的海洋监测节点定位算法

任秀丽, 韩静晶*

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

(* 通信作者电子邮箱 thisishanjing@163.com)

摘要:针对应用于海洋监测的无线传感器网络,提出了一种基于蒙特卡罗算法的节点定位算法。该算法根据海洋中洋流在某一时间段内线性运动的特性,通过引入符合海水运动规律的角度来提高节点在位置预测阶段的精度;并根据节点感知压力的大小来确定预测坐标的置信度,以对预测坐标进行修正,进而得到最终的预测结果。仿真结果表明,该算法比传统的定位方法在不同的锚节点密度、节点密度、节点运动速度和时间等条件下都表现出更好的性能。

关键词:无线传感网络;移动节点;定位;精度;蒙特卡罗定位

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Node localization algorithm of wireless sensor network in marine monitoring

REN Xiu-li, HAN Jing-jing*

(College of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

Abstract: Focusing on the applications of wireless sensor networks in marine monitoring, a localization algorithm of sensor nodes based on Monte Carlo was proposed. The algorithm improved the location accuracy of the prediction stage by introducing the right angle of the sea motion; and revised the prediction coordinates by the confidence of the prediction coordinates which was gained through the node's perception of pressure. The simulation results show the proposed algorithm has outstanding performance compared with traditional methods under conditions of different node density, seed density, moving speed and time.

Key words: wireless sensor network; mobile node; localization; accuracy; Monte Carlo Localization (MCL)

0 引言

水下传感器网络以水下传感器作为信息获取的窗口,并最终以某种方式把水下传感器网纳入常规网络,把水下数据送给观察者^[1]。它可以应用于海洋学数据获取,海洋污染监控,近岸开发,灾难预防,以及水下目标的探测、跟踪与定位。

在以往的水下传感器网络研究中,研究人员针对静态的水下传感网,是将三维定位转化成二维,先利用传统的节点定位算法,如基于到达时间(Time Of Arrival, TOA)的定位,基于接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)的定位,基于到达角度(Angle of Arrival)的定位等^[2]计算节点在XOY平面的坐标,再根据水下深度与压强值的关系确定Z轴坐标^[3-4];另外,研究人员还利用水下传感网声音传输信号的特性,提出了时间同步的问题^[5],通过控制误差传播以提高定位精度。而对于节点移动的水下传感网,研究人员主要是在假设节点有自定位功能^[6]或者传感器节点带有全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位装置^[7]的前提下进行研究的。然而在实际应用中,考虑到技术和成本等问题,不可能给每一个传感器节点配备GPS定位装置,也不能使每一个传感器节点都保持固定的位置。由于海水的流动性,传感器节点也会随之运动,进而导致网络的拓扑结构变化频繁,采用静态定位算法中的定位机制,则需要频繁地更新节点的位置信息,这将消耗系统的大量资源,同时也会降低网络响应能力及定位精度^[8]。因此,应用于海洋监测的无线传感

器网络移动节点定位至关重要。

针对海洋监测的无线传感器网络,其部分节点通过水下锚定的浮标或潜标来固定,且位置已知,其余节点随海水自由移动的情况下,本文改进了基于蒙特卡罗定位(Monte Carlo Localization, MCL)的移动传感网精确定位算法^[9],提出基于蒙特卡罗算法的多维节点定位算法(Monte Carlo Multidimensional Localization Algorithm, MCMLA)。

1 蒙特卡罗定位算法

1.1 算法原理

Monte Carlo方法是使用随机数来解决很多计算问题的方法。其核心思想是在状态空间中随机产生一组样本(称粒子),通过观测这些样本,得到相应的观测值,再根据这些观测值来计算样本的权值 W ,并利用这组带有权值 W 的样本近似估算状态的后验概率分布 $P(x|l)$ 得到状态的估计值^[10]。

1.2 移动节点定位

该算法在初始化阶段,从待定位节点布置区域中随机选择 $k+1$ 个样本点形成初始的样本集合 $L = \{l_0, l_1, \dots, l_k\}$,然后通过重复预测阶段和滤波阶段实现节点定位。

在预测阶段,待定位节点根据运动模型和运动信息预测节点的位置。通过节点在前 $k+1$ 个时刻的运动轨迹预测它在第 $k+2$ 个时刻的位置和运动方向及运动速度 v 。所以,如果 m_{i-1}^i 是待定位节点在某一时刻的位置,那么该节点在当前时刻的可能位置就约束在以 m_{i-1}^i 为圆心、 $V = \max(V_{\max}, v)$ 为半径的圆形区

收稿日期:2012-04-05;修回日期:2012-05-29。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60704046);辽宁省自然科学基金资助项目(201202089)。

作者简介:任秀丽(1965-),女,吉林四平人,教授,博士,主要研究方向:无线网络与通信;韩静晶(1987-),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

域内(V_{\max} 为节点运动的最大速度)。如果用 $d(m_i, m_j)$ 表示 m_i, m_j 两点之间的欧几里得距离,而且节点的移动速度在区间 $[0, V]$ 上服从均匀分布,那么节点基于先前位置的现在位置估计的概率分布可以通过以下均匀分布的形式^[11]给出:

$$p(m_i | m_{i-1}) = \begin{cases} \frac{1}{\pi V^2}, & d(m_i, m_{i-1}) < V \\ 0, & d(m_i, m_{i-1}) \geq V \end{cases} \quad (1)$$

其中转移方程 $p(m_i | m_{i-1})$ 描述基于 $t-1$ 时刻的节点位置分布预测 t 时刻的位置分布^[12]。

在滤波阶段,算法根据当前时刻接收到的新观测值,对节点位置的可能性作出判断,丢弃那些不可能存在的预测位置。

2 基于蒙特卡罗算法的多维节点定位算法

2.1 节点运动预测

在对海面的模拟中,根据描述波浪的理论假设及处理方法的不同,将海浪分为线性波和非线性波^[13]。本文基于线性的海浪波进行研究:假设在三维海洋空间中,有一个移动节点 P_0 已知节点 P 在时刻0,时刻1,时刻2, ..., 时刻 k 的位置分别为: $(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_k, y_k, z_k)$,现在要通过前 $k+1$ 个点的运动轨迹来预测该节点在第 $k+2$ 个时刻的位置 $(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1})$ 和该点的运动方向。

根据牛顿插值多项式,可以利用前 $k+1$ 个时刻的 $f(t_i)$,即 x_i 来预测第 $k+2$ 个时刻的 x_{k+1} ,公式为:

$$x = f(t) = N_k(t) + R_k(t) \quad (2)$$

其中:

$$N_k(t) = f(t_0) + f[t_0, t_1](t - t_0) + f[t_0, t_1, t_2](t - t_0)(t - t_1) + \dots + f[t_0, t_1, \dots, t_k](t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_{k-1}) \quad (3)$$

$$R_k(t) = f[t, t_0, t_1, \dots, t_k](t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_k) \quad (4)$$

同理:

$$y = g(t) = N_k^*(t) + R_k^*(t) \quad (5)$$

$$z = s(t) = N_k^{\#}(t) + R_k^{\#}(t) \quad (6)$$

由式(2),式(5)和式(6)可以分别预测得第 $k+1$ 时刻节点在 x, y, z 方向的速度 v_x, v_y, v_z ,为:

$$v_x = f'(t) | t = k \quad (7)$$

$$v_y = g'(t) | t = k \quad (8)$$

$$v_z = s'(t) | t = k \quad (9)$$

运动方向与 xoy, yoz, zox 平面的夹角分别为:

$$\begin{cases} \tan \theta_{xoy} = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \\ \tan \theta_{yoz} = \frac{v_x}{\sqrt{v_y^2 + v_z^2}} \\ \tan \theta_{zox} = \frac{v_y}{\sqrt{v_z^2 + v_x^2}} \end{cases} \quad (10)$$

节点的运动速度为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (11)$$

其中,在插值点的选取方面,即 $f(t)$ 在前 $k+1$ 个相异时刻的函数值,应遵循以下原则:

1) 始终保持采样窗口包含 $k+1$ 个样本点,以对节点的运动轨迹进行插值。

2) $k+1$ 个样本点可以是节点在前面 $k+1$ 个时刻的预测位置的修正值。相隔的时间间隔不一定是连续的,可以任取。为了增加准确性,越靠近当前时刻,所取的时间间隔应该越密集。

3) 用准确度和时间两个标准维护窗口中的样本点。判断方法如图1所示。每隔一段时间,强制更新一次采样窗口。

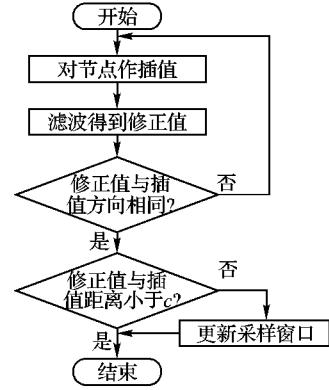


图1 用准确度维护窗口样本点流程

4) 每隔一段时间更新一次采样窗口。

2.2 节点位置预测

本文应用背景是海洋监测,水下布设的移动节点随着海水的流动而运动,其运动轨迹是平滑的^[14],所以,节点的运动轨迹可以用二次曲线来拟合。在选择预测节点的位置时执行以下步骤:

步骤1 取以 V 为母线,以节点运动方向为高, ω (ω 为符合海水物理运动规律的角度,此处可以设为 25°)为母线与高线夹角的一个圆锥体;

步骤2 以节点的运动方向为切线,随机生成 d 条经过 $t=k$ 时刻点的二次曲线;

步骤3 随机选取此 d 条二次曲线上在圆锥内部的线段上的任意 N 个点做预测值;

步骤4 如果滤波后符合要求的点个数不够 N 。可以将母线与高线的夹角 ω 适当扩大,重新执行步骤2、3,直到找到满足要求的点。节点集合可以表示为:

$$M = \{ (x_{k+1}^{(i)}, y_{k+1}^{(i)}, z_{k+1}^{(i)}) | d[(x_{k+1}^{(i)}, y_{k+1}^{(i)}, z_{k+1}^{(i)}), (x_k, y_k, z_k)] \leq V \cap \left| \frac{y_{k+1}^{(i)} - y_k}{x_{k+1}^{(i)} - x_k} \right| \leq |\tan \theta_{xoy(k+1)} - \tan \theta_{xoy(k)}| \cap \left| \frac{z_{k+1}^{(i)} - z_k}{y_{k+1}^{(i)} - y_k} \right| \leq |\tan \theta_{yoz(k+1)} - \tan \theta_{yoz(k)}| \cap \left| \frac{x_{k+1}^{(i)} - x_k}{z_{k+1}^{(i)} - z_k} \right| \leq |\tan \theta_{zox(k+1)} - \tan \theta_{zox(k)}| \} \quad (12)$$

其中 $0 \leq i \leq N$ 。

2.3 滤波算法

在预测阶段,第 $k+2$ 时刻获得了节点 P 的 N 个预测值存放在集合 M 中。该算法做如下定义。

定义1 当前时刻在 P 点通信半径内的未知节点为 P 的邻节点。

定义2 当前时刻在 P 点通信半径内的锚节点集合为 P 的一跳锚节点集(OS)。

定义3 当前时刻在 P 的邻节点通信半径内的锚节点的集合为 P 的两跳锚节点集(TS)。

在 k 到 $k+1$ 时刻,节点 P 将接收到以下广播信息^[15]:

1) 锚节点向通信半径内广播自己当前时刻的位置;

2) 普通节点收到锚节点信息后,转发给其通信半径内的节点。

P 在 $k+1$ 时刻的位置到它的一跳锚节点 S 的距离小于等于其通信半径 R ,到两跳锚节点 S' 的距离大于 R ,小于等于 $2R$,如图2所示。若设 $m_{k+1}^i(x_{k+1}^i, y_{k+1}^i)$ 为 N 个预测值中的某一点,即得到下列滤波公式:

$$\{ \forall S \in OS, distance(S, m_{k+1}^i) \leq R \} \cap \{ \forall S' \in (TS - (TS \cap OS)), R < distance(S', m_{k+1}^i) \leq 2R \} \quad (13)$$

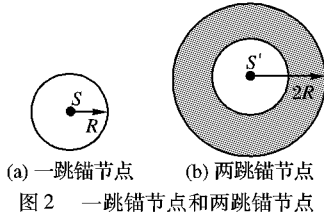


图2 一跳锚节点和两跳锚节点

根据式(12), 滤掉不满足要求的预测值, 保留满足要求的预测值。假设满足滤波公式的预测值的权值为1, 否则为0, 设预测值 $m_{k+1}^i(x_{k+1}^i, y_{k+1}^i, z_{k+1}^i, v_{k+1}^i)$ 的权值为 β_i , 那么需要重新预测采样的数目 N' 为:

$$N' = N - \sum_{i=1}^N \beta_i \quad (14)$$

根据前文所述的节点预测采样规则, 重新采集 N' 个节点, 重复滤波过程, 直到找到 N 个满足要求的值为止。

在待定位节点上安装深度感知器, 可以通过测量节点感知的压力计算其在 $k+1$ 时刻所处的深度^[3,5], 即节点在 Z 轴的坐标, 记为 h 。根据预测的 z 值与节点实际深度 h 的数量关系给每个预测坐标赋予相应的权值, 称之为预测坐标的置信度 c , 如式(15):

$$c = 1 - \frac{|z - h|}{h} \quad (15)$$

则预测值 m_{k+1}^i 的置信度为:

$$c_{k+1}^i = 1 - \frac{|z_{k+1}^i - h|}{h}; 1 \leq i \leq N \quad (16)$$

设 a 为 $c_{k+1}^1, c_{k+1}^2, \dots, c_{k+1}^N$ 的均值, 即:

$$a = \frac{c_{k+1}^1 + c_{k+1}^2 + \dots + c_{k+1}^N}{N} \quad (17)$$

预测值在预测修正值的运算中所占的比重由其置信度决定, 得到 P 在时刻 $k+1$ 也就是第 $k+2$ 个时刻的预测修正值 $P(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}, v_{k+1})$ 。

$$\begin{cases} x_{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{k+1}^i (1 + c_{k+1}^i - a) \\ y_{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{k+1}^i (1 + c_{k+1}^i - a) \\ z_{k+1} = h \\ v_{k+1} = v \end{cases} \quad (18)$$

3 仿真实验

在仿真环境 NS2 下, 将本文所提出的 MCMLA 和 USP 算法、SLMP (Scalable Localization with Mobility Prediction, SLMP) 算法、MCL 算法进行比较。仿真实验在一个 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的正方体区域内进行, 所有节点按文献[14]中的数学模型随机运动。实验中用到的锚节点密度(Node Density)、节点密度(Seed Density)、运动速度(Speed)、定位误差(Estimate Error)等参数定义同文献[11]。

图3是定位误差随时间变化曲线。USP算法采用层层定位, 在定位的初期因为被定位的未知节点数目增加, 所以定位精度逐渐提高, 但是由于后期误差累计过大, 定位误差开始变大; SLMP算法不能运用过去的位置信息, 所以定位精度受时间影响不大, 虽然算法在开始的时候好于本文提出的方法, 但随着时间的推移, MCMLA很快在精度上赶上了SLMP算法; MCL算法在定位的过程中虽然也能利用过去的定位信息, 但由于没有借助有利的运动模型, 加之前面的定位信息累计误差过大, 导致定位精度不如MCMLA。在整个定位的过程中, MCMLA在利用历史信息的基础上分析了节点运动模型和位

置预测, 在滤波中运用置信度校正预测值; 由此可见, MCMLA的定位精度总体上优于另外两个算法。然而, 因为定位精度受到其他很多因素的影响, 所以, 到定位的中后期阶段, 虽然定位精度也不断提高, 但变化幅度较小。

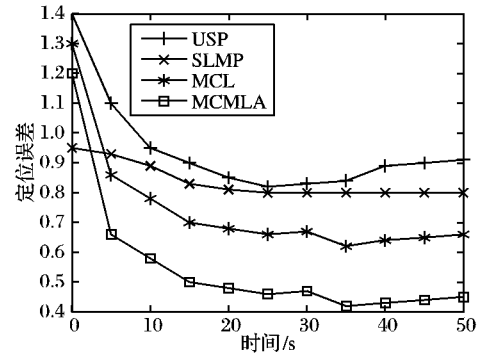


图3 定位误差随时间变化曲线

图4是定位误差随速度变化曲线。USP算法随着节点运动速度的增大, 待定位节点周围拓扑变化频繁, 影响了定位的准确度, 导致定位误差随速度变大而持续增大; SLMP算法采用区别定位普通节点和特殊节点, 定位普通节点时根据特定的数学模型进行估计, 因而普通节点定位受节点运动速度影响不大, 定位误差随速度变化曲线总体比较平缓; MCL算法的定位误差随时间的推移而快速增大, 当节点的运动速度增大至 2 R 时, 由于采样粒子的数量不够, MCL算法不断地重复, 造成死循环, 无法估计节点的位置; MCMLA算法中, 随着速度的增大, 节点收到更多的信标节点位置信息, 把不可能的位置过滤掉, 使定位误差减小; 当速度进一步增大时, 由于节点下一个位置分布的区域也增大, 从而影响了定位的精度, 所以定位误差没能进一步减小, 反而又增大了。由于MCMLA算法根据不同预测节点的置信度来修正预测值, 因此, 此算法的定位精度总体好于另外两种算法。

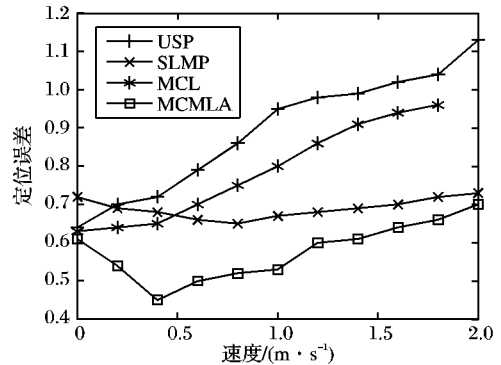


图4 定位误差随速度变化曲线

图5是定位误差随锚节点密度变化曲线。USP算法通过与锚节点交换信息进行定位, 定位误差随锚节点密度的增大迅速减小, 甚至当锚节点密度降为1.4时, 其定位精度已优于本文提出的算法, 但是, 这也增加了网络布设的成本, 所以在实际中也不能为了减小误差无止境地增加锚节点数量; SLMP算法采用与锚节点交换信息和套用运动模型两个方法定位未知节点, 锚节点密度对定位误差的影响不是很大; MCMLA和MCL在滤波阶段只是靠收集其一跳锚节点和两跳锚节点的信息排除不可能位置的预测坐标, 所以在锚节点数量很少的时候, 两种算法都能实现较为精确的定位。而MCMLA在滤波阶段的预测值修正步骤能进一步提高定位精度, 因此, 虽然两种算法的优劣性随着锚节点的密度变化总是保持一致, 但MCMLA的定位更加精确。当然, 不管如何增加锚节点的比例, 总会存在一定的误差, 因此, 考虑到节约成本的问题, 在布

设网络时,锚节点的比例也需要控制在一定的范围内。图6是定位误差随节点密度变化曲线。

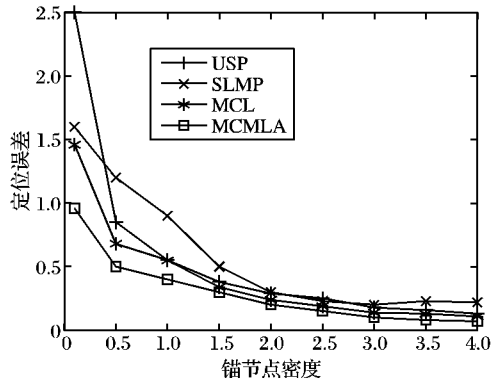


图5 定位误差随锚节点密度变化曲线

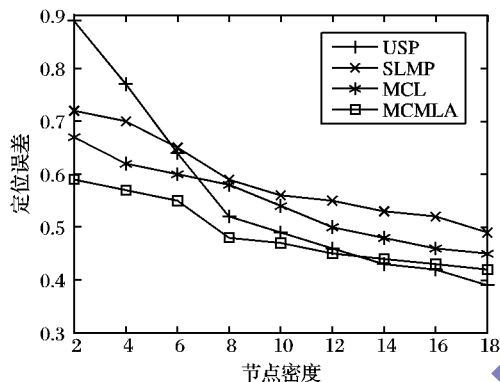


图6 定位误差随节点密度变化曲线

节点密度是影响无线传感器网络定位精度的重要因素,节点密度越大,定位就越容易。四种算法的定位误差都随着节点密度的增大而减小。MCMLA中,由于在预测过程中需要节点间交换信息来更新采样窗口,在滤波过程中需要节点的邻居节点提供锚节点的相关信息。当节点密度越高时,算法的定位误差就越小。同时,由于节点分布不均匀导致算法精度低的可能性,也会随节点密度的提高而降低。MCMLA对节点间通信信息的灵活运用,使它的定位精度要优于另外三种算法。

4 结语

由于海洋环境的复杂多变性,导致无线传感网的海洋监测节点定位比静态定位更难实现,算法更加复杂。本文在MCL算法的基础上结合海洋自身的特性进行定位,克服了传统MCL反复采样陷入死循环的缺点,更符合海洋这一特殊环境的应用。从仿真结果可以看出,MCMLA的定位效果要好

于以往的定位算法。

参考文献:

- [1] 吕超,王硕,谭民.水下移动无线传感器网络研究综述[J].控制与决策,2009,24(6):801-812.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [3] TEYMORIAN A Y, CHENG WEI, MA LIRAN, *et al.* 3D underwater sensor network localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12): 1610-1621.
- [4] CHENG WEI, TEYMORIAN A Y, MA LIRAN, *et al.* Underwater localization in sparse 3D acoustic sensor networks[C]// INFOCOM'08: Proceedings of the Twenty-seventh Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 236-240.
- [5] CHEN TIAN, LIU WENYU, WANG YI, *et al.* Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks[C]// Ubiquitous Intelligence and Computing, LNCS 4611. Berlin: Springer, 2007: 622-631.
- [6] 曾斌,钟德欢,姚路.考虑水流影响的水下传感器网络移动算法研究[J].计算机应用研究,2010,27(10):3926-3931.
- [7] 李睿.水下GPS定位技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2008:1-81.
- [8] 黄根梅,常新峰.一种基于蒙特卡罗法德无线传感器网络移动节点定位算法研究[J].传感技术学报,2010,23(4):562-566.
- [9] 汪炀,黄刘生,吴俊敏,等.一种基于Monte Carlo的移动传感网络精确定位算法[J].小型微型计算机系统,2008,29(12):1637-1642.
- [10] 黎大鹏,程良伦,QUAN ZHU.基于VWMC的传感器网络移动节点定位算法[J].计算机工程与设计,2010,31(2):305-308.
- [11] HU LIANGXUAN, EVANS D. Localization for mobile sensor networks[C]// Proceedings of the Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 45-57.
- [12] 孙海燕,周梦.应用数理统计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [13] BAGTZOGLOU A C, NOVIKOV A. Chaotic behavior and pollution dispersion characteristics in engineered tidal embayment: A numerical investigation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 207-209.
- [14] ZHOU ZHONG, CUI JUN-HONG, BAGTZOGLOU A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[C]// INFOCOM'08: Proceedings of the Twenty-seventh Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 2198-2206.
- [15] 刘林,范平志.一种降低定位误差的无线传感器网络节点定位改进算法[J].电路与系统学报,2007,12(2):1-4.

(上接第2688页)

- [12] de NEVE H, van IEGHEM P. TAMCRA: A tunable accuracy multiple constraints routing algorithm[J]. Computer Communications, 2000, 23(7): 667-679.
- [13] van MIEGHEM P, KUIPERS F A. Hop-by-hop quality of service routing[J]. Computer Networks, 2001, 37(3/4): 407-423.
- [14] van MIEGHEM P, KUIPERS F A. Concepts of exact QoS routing algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(5): 851-864.
- [15] AHUJA R K, MAGNANTI T L, ORLIN J B. Network flows: Theory, algorithms, and applications[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1993.
- [16] PINSON M, WOLF S. An objective method for combining multiple subjective data sets[EB/OL]. [2012-01-10]. [http://wenku.](http://wenku.baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related)

[baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related](http://wenku.baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related).

- [17] WANG BIN, HOU J C. Multicast routing and its QoS extension: Problems, algorithms, and protocols[J]. IEEE Network, 2000, 14(1): 22-36.
- [18] KORKMAZ T, KRUNZ M. Multi-constrained optimal path selection[C]// INFOCOM'01: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE, 2001: 834-843.
- [19] ANDERSEN R, CHUANG F, SEN A, *et al.* On disjoint path pairs with wavelength continuity constraint in WDM networks[C]// INFOCOM'04: Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE, 2004: 524-535.