

一种异构传感器网络的能量有效路由算法^{*})

李小亚 黄道平 孙宗海

(华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510640)

摘要 无线传感器网络设计能量有效的路由算法是至关重要的。对于不同类型的传感器节点传输不同大小数据包信息以及拥有不同初始能量的异构传感器网络,本文提出了一种适合此传感器网络的 D-REECR 路由算法,此算法是在之前提出的 REECR 算法上改进而来。基于 REECR 没有考虑簇头在选择时的分布不均匀性,D-REECR 将簇头间的距离作为选择簇头的因素之一,与节点的剩余能量及能量消耗率一起作为选择簇头的依据。这样使各个簇大小基本一致,从而平衡各个节点的能量消耗,达到延长网络生命的目的。仿真结果显示,改进后的 D-REECR 算法比 REECR 算法在能量效率上大约提高 5%~10%。

关键词 无线传感器网络,异构环境,路由算法,能量有效性

An Energy Efficient Routing Scheme for Heterogeneous Sensor Networks

LI Xiao-ya Huang Dao-ping SUN Zong-hai

(Automation College of Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract To design energy efficient routing scheme is very important in wireless sensor networks. This paper investigates a heterogeneous sensor network with two different types of nodes sending different length data packet to base station as well as possessing different initial energy, the D-REECR routing algorithm is proposed. D-REECR protocol improves REECR protocol proposed previously, which is an energy efficient routing protocol based on residual energy and energy consumption rate in heterogeneous sensor networks. D-REECR analyzes the uneven distribution of clustering-head nodes in REECR and gets the distance between clustering-heads as one of factors electing clustering-heads to distribute evenly clustering-heads every round in the network, thus D-REECR can get every cluster size almost accord and balance each node energy consumption, so it prolongs network lifetime. Simulation results show D-REECR scheme outperforms REECR about 5%~10% in energy efficiency.

Keywords Wireless sensor network, Heterogeneous environment, Routing algorithm, Energy efficiency

1 引言

传感器网络是由形体小、代价低的传感器节点组成的网络,其中的每一个传感器节点集成了传感器、无线收发装置、少量存储器和微处理器,具有通信、感应和数据处理能力,负责搜集和发布环境数据信息。传感器网络的最终目标是通过大量底层的片上传感器之间的协作来搜索数据,以获得有关周边环境的信息,并在此基础之上做出决策。无线传感器网络在环境监测、办公室智能化、战场监视以及交通流量监测等许多方面显示出越来越大的作用^[1]。但传感器节点有着严格的能量限制,而且一次性地布置,使得节点难以进行能量的补充,这些因素决定了传感器的生存时间是有限的。为了延长网络的生存时间,需要设计能量有效的协议,以适应传感器网络的特点。

传感器节点可以根据感测能力、计算能力、通信能力和能量等分为不同的种类。异构传感器网络(heterogeneous sensor networks)是指由多种不同类型的传感器节点组成的网络;反之,由相同类型传感器节点组成的网络称为同构传感器网络(homogeneous sensor networks)。异构网络中,能量的异构特征是普遍存在的,因为不同类型的传感器节点配置不

同的初始能量。即使是同种类型节点构成的传感器网络,由于无线通信中暂时链路失败或区域地形特点等随机事件的影响,或者不同类型的传感器有不同长度的数据要传输到基站,每个节点不可能均等地使用其能量,传感器网络也会呈现一种能量异构的特点^[2]。本文将研究在不同的初始能量和不同的数据传输率下的异构传感器网络的路由算法,并且称这种异构传感器网络为异构网络。现实生活中,异构网络无处不在。比如对火灾的探测,可能需要感温、感烟、气体等不同的传感器,而这些传感器可能有不同的初始能量以及消耗能量的快慢不同,从而构成异构网络。因此对异构传感器网络的研究具有重大的现实意义。

我们之前提出了一种适合异构网络的能量有效路由算法 REECR(Energy Efficient Routing Protocol Based on Residual Energy and Energy Consumption Rate)^[3]。REECR 算法综合考虑所有节点的剩余能量和能量消耗率来选择簇头节点,以达到均匀消耗能量和延长网络生命的目的。模拟结果显示,REECR 能获得比 LEACH 等主要算法更长的生存时间,是一种有效的能量效率算法。本文是对 REECR 算法进一步的深入研究。鉴于 REECR 算法中簇头在选择时没有考虑在网络中分布的均匀性,会引起在某一轮簇头的选择中,有可能相互距离很近

^{*})国家自然科学基金资助项目(60704012),广东省自然科学基金资助项目(06300232)。李小亚 博士研究生,主要研究方向为传感器网络、智能控制与智能检测;黄道平 教授,博士生导师,主要研究方向为智能控制与智能检测;孙宗海 副教授,主要研究方向为智能控制与智能检测。

的节点成为簇头,也有可能靠近网络边缘的节点成为簇头。这样,其他非簇头节点的信息将要跨越较长的距离才能到达这些簇头节点,从而消耗更多的能量。因此对整个网络而言,RE-EECR 并非最有效。基于上述原因,我们将簇头间的距离也考虑作为选择簇头的依据之一,与节点的剩余能量和能量消耗率一起来选择簇头,提出了 D-REECR 路由协议(Distance-based REECCR)。仿真结果显示,提出的 D-REECR 协议比 REECCR 协议的网络生存时间大约提高了 5%~10%。

2 相关工作

将传感器节点组织成簇的形式可以有效地减少网络的能量消耗。许多能量有效的路由协议都是在簇结构的基础上进行设计的,其中最具有代表性的是 LEACH 协议^[4]。LEACH 采用所有节点周期性地轮流担任簇头节点的办法来达到使所有节点均匀消耗能量的目的,并且簇头节点用于执行数据融合,数据融合将传感器感测的大量数据组合成少量有意义的信息集合,这样传输的消息减少,节省了能量消耗。在簇结构下,算法只在一个簇范围内执行而不需要等待控制消息传遍整个网络。在大型网络中,这一特点使得局部化算法比在整个全局结构中执行的中心化算法具有更好的扩展性和鲁棒性。同时,成簇技术对于消息广播和数据查询也非常有效,簇头节点可以在簇内协助广播消息和搜集用户感兴趣的数据。虽然 LEACH 协议是应用在同构网络中,但对提出的异构网络同样有借鉴作用,在本文提出的算法中也采用了成簇的方法。

目前,许多人员越来越关注异构网络的研究。文献[5,6]等研究了拥有两种不同能量节点的异构网络,即配有极少量的高能节点(powerful node)和大多数的普通节点(normal node)。它们都将高级节点在网络中作为簇头节点,普通节点作为非簇头节点,实质上只是考虑了初始能量的不同,没有考虑传输信息数据包的不同。

文献[3]中,我们研究了具有相同初始能量但有不同长度数据包信息要传输的异构传感器网络,根据这种网络的特点,提出了适合这类网络的路由算法——REECR 协议,即基于节点的剩余能量和能量消耗率来选择簇头的方法。REECR 是一个比 LEACH 更有效的能量路由算法,但 REECCR 协议没有考虑每一轮簇头是否均匀分布在整个网络中,从而引起某些非簇头节点到簇头节点的距离可能过长而消耗多余的能量,并且造成整个网络节点的能量消耗不平衡。本文将异构网络扩大到初始能量和数据包信息都不同的网络,并且对 REECCR 进一步深入研究,考虑了簇头节点分布的均匀性,提出了将簇头间距离作为选择簇头的依据之一的 D-REECR 协议。

3 异构网络模型及无线能量模型

文献[3]中只考虑了拥有不同长度数据包信息但有相同初始能量的网络模型,这里我们将网络模型延伸到有不同初始能量和不同长度数据包信息的情况,这种网络模型比文献[3]的更加复杂。假设具有不同功能的两种传感器节点(例如温度、湿度传感器),它们有不同的初始能量以及每次有不同长度的数据发送到基站,这两种传感器随机分布在一个正方形的二维平面网络中。对于提出的网络,有如下假设:

(1)传感器节点配置完后是静止不动的并连续周期地向基站发送信息,基站是固定的,并远离网络场;

(2)网络中所有传感器节点的能量是有限的,并不可再补充;

(3)网络中所有传感器节点都能直接与基站通信;

(4)簇内节点到簇头之间、簇头节点到基站之间都是单跳通信;

(5)无线信道对称,即从节点 A 传送一位信息到节点 B 和从节点 B 传送一位信息到节点 A 消耗的能量相同,且每个传感器节点能够根据接收的信号强度计算到发送者的近似距离。

对于网络中传感器节点的无线通信能量消耗,根据无线传感器之间和无线传感器与 sink 节点之间接收、发送器距离的不同,使用自由空间传播和多路衰减模型。如果接收、发送器之间的距离小于某个临界值 d_0 ,则使用自由空间模型;如果接收、发送器之间的距离大于某个临界值,则使用双路模型。这样,使用该无线信道发送 l -bit 数据信息到相距为 d 的接收装置,所消耗的能量为

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-dec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{dec} + \epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{dec} + \epsilon_{amp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收 l 字节信息消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-dec}(l) = lE_{dec} \quad (2)$$

其中, $E_{Tx}(l, d)$ 表示发送端的能量消耗, $E_{Rx}(l)$ 表示接收端的能量消耗, E_{dec} 表示发射电路消耗的能量, ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 是放大器的系数, d_0 是临界距离。对于簇头聚合 n 个 l 字节信息消耗的能量为

$$E_{DA} = nlE_{da} \quad (3)$$

其中 E_{da} 表示聚合单位比特数据消耗的能量。

4 D-REECR 路由算法

REECR 路由算法是一个自组织、自适应的算法,在异构传感器网络中具有较好的鲁棒性和扩展性。但是,REECR 算法在选择簇头时仅仅考虑了传感器节点的剩余能量和能量消耗率,没有考虑簇头分布的均匀性。这里我们把簇头间的距离作为选择簇头的因素之一,就是在选择簇头时,簇头之间必须相距一定的距离,这样使簇头比较能均匀地分布在网络中。由此簇头间距离与节点的剩余能量以及能量消耗率一起作为选择簇头的依据,下面是近似计算簇间距离的方法。

假设正方形传感器网络场的边长是 a ,则网络面积 $A = a^2$ 。假设把整个网络分为 N 个簇,我们希望各个簇的大小基本一致,因此各个簇的面积大小为 $A/N = a^2/N$ 。假设各个簇近似为圆形,因此它们的半径为

$$radius = \sqrt{A/\pi N} = \sqrt{a^2/\pi N} \quad (4)$$

为了使各个簇能比较均匀地分割整个网络,必须使簇头间距离 D 大于簇的半径 $radius$,为此我们选择簇头时必须满足条件: $D \geq radius$ 。另外,传感器节点的剩余能量和能量消耗率的计算方法与文献[3]中的一样,如下所示。

每个节点成为簇头的概率为

$$P_i(t) = \frac{E_i(t)}{V_i(t)} \quad (5)$$

其中, $E_i(t)$ 是当前轮节点 i 的剩余能量, $V_i(t)$ 是节点 i 的能量消耗率, α 和 β 是剩余能量和能量消耗率各自的权重系数,靠经验所得。能量消耗率的计算方法如下:

$$V_i(t) = \frac{E_{initial} - E_i(t)}{r-1}, \quad (r > 1) \quad (6)$$

其中 $E_{initial}$ 是各个节点的初始能量, r 是当前的轮数。

节点成为簇头的方法为:在第一轮,由于各个节点都没有消耗能量,先随机选择一个节点作为第一个簇头;然后再随机选择一个节点,计算这个节点到第一个簇头节点的距离 D_1 ,如果 $D_1 \geq radius$,则刚选择的节点作为第二个簇头,否则抛弃;然后再随机选择一个节点,计算它到第一和第二个簇头节点的距离 D_1, D_2 ,如果 $D_1 \geq radius$ 且 $D_2 \geq radius$,那么这个节点作为第三个簇头,否则抛弃。如此反复选择,直到得到规定的簇头数为止。从第二轮开始,首先按照(5)式计算出各个节点成为簇头的概率,然后选择最大概率的节点作为第一个簇头,其次选择第二大概率的节点,计算这个节点到第一个簇头节点的距离 D_1 ,如果 $D_1 \geq radius$,则这个节点作为第二个簇头,否则抛弃;然后选择其次大概率的节点,计算它到已成为簇头节点的距离。如果它们的距离都大于 $radius$,则这个节点被选择作为一个簇头节点,否则抛弃。如此反复选择,直到得到规定的簇头数为止。

簇头选择好后,非簇头节点加入到离自己最近的簇头与之形成簇,方法与 LEACH 协议中的相同。

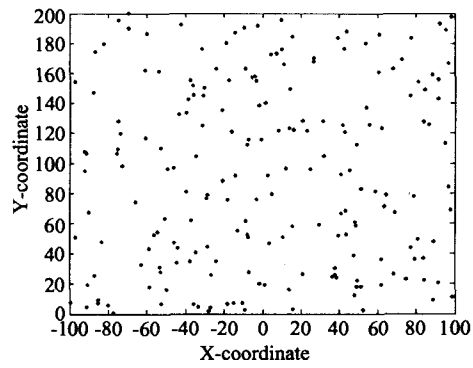


图1 200个随机分布的节点,其中红色的100个节点是类型1,蓝色的100个节点是类型0。

5 仿真及结果

为了评估提出的改进算法,我们用 Matlab 进行了仿真,并与 REECR 和 LEACH 协议进行了对比。我们在 200m×200m 的网络场上随机生成 200 个节点,如图 1 所示。其中 100 个节点属于类型 1(type-1)节点,初始能量为 1J,每次发送到基站的数据包大小为 4000-bits;另外 100 个节点属于类型 0(type-0)节点,初始能量为 0.5J,每次发送到基站的数据包大小为 2000-bits。基站远离网络场,位于(0,-200)m,按照文献[7]的研究结果,整个网络的分簇数为 5~8 个为最佳分簇数,这里我们将整个网络场每轮分成 6 个簇。其它仿真参数如表 1 所示。

表1 仿真参数

参数	参数值
Eelec	50nJ/bit
ϵ_{fs}	10pJ/bit/m ²
ϵ_{amp}	0.0013pJ/bit/m ⁴
Eda	5nJ/bit/signal
d_0	87m
α	5
β	1
radius	46m

图 2 对三种协议的网络生命周期进行了比较。从图 2 可以看出,我们提出的 D-REECR 算法比原来的 REECR 算法能

量效率有所提高。除了开始的几个节点在改进前后的两种算法的死亡时间比较一致外,对于剩余的大部分节点的网络生存时间,D-REECR 协议都比 REECR 协议长约 5%~10%,表明改进后的算法是有效的。从图 2 也可以看出,D-REECR 和 REECR 都比 LEACH 路由算法在能量效率上有显著的提高。

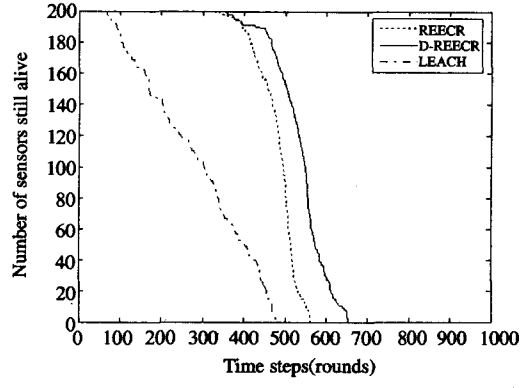


图2 不同协议的网络生存时间比较

表 2 对三种不同协议中第一个和最后一个节点死亡的时间进行了比较。从表 2 可以看出,D-REECR 路由算法无论是第一个节点还是最后一个节点的死亡时间都比 REECR 有所提高,改进后的方法是可行的,与图 2 所示的结论是一致的。

表2 不同协议网络生命周期的比较

能量(J/节点)	协议	第一个节点死亡的轮数	最后一个节点死亡的轮数
类型1节点	LEACH	73	489
(1J)	REECR	340	561
类型0节点	D-REECR	358	653
(0.5J)			

图 3 比较了 D-REECR 算法中网络生命随簇头间距离 $radius$ 的变化情况。从图 3 可以看出,以我们提出的计算方法作为簇头间相隔的距离是比较恰当的。当簇头间隔距离为 36m,小于我们提出的方法而计算出的 46m 时,网络的生命周期有所减小。当簇头间隔距离为 56m,大于我们提出的方法而计算出的 46m 时,部分节点的网络生命周期虽然有所增加,但节点能量消耗的不平衡性加剧,第一个节点死亡和最后一个节点死亡的时间间隔延长。可见,我们提出的 D-REECR 算法既增加了网络的生命,又没有加剧整个网络能耗的不平衡。

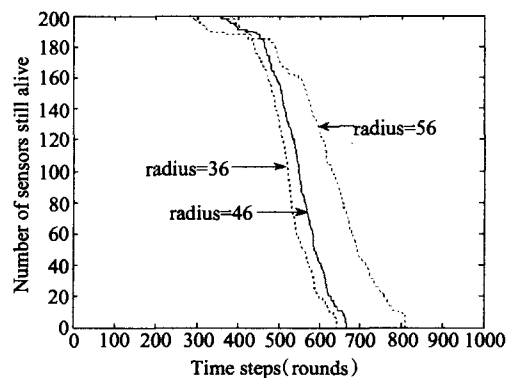


图3 D-REECR 协议中网络生命随簇头间距离 radius 的变化情况

结束语 本文研究了一种具有两种不同类型节点的异构

传感器网络,这两种不同类型的传感器发送不同长度数据包以及拥有不同初始能量。本文对以前提出的适合异构网络的路由协议 REECR 做了改进,提出了 D-REECR 路由算法。这种算法将簇头间的距离也作为选择簇头的依据之一,使得簇头能在整个网络中比较均匀地分布,以达到各个簇大小基本一致从而平衡节点的能量消耗以延长网络生命的目的,并提出了簇头间距离的一种计算方法。仿真结果显示,提出的 D-REECR 算法比 REECR 算法能量更有效,并且方法简单易行,同时提出的计算簇头间距离的方法既提高了能量效率,也达到了平衡节点能量消耗的目的。

参考文献

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40

(上接第 50 页)

种解决方案,一是依靠与锚节点进行信息交换,通过三角计算等方法来获取未知节点的位置,如 APIS 算法,它是一种交互式定位机制,在很大程度上依靠锚节点的密度;另一是通过基础设施在网内动态地广播消息以进行定位,如 Landscape-3D 算法,这是一种被动式定位,定位主要依靠基础设施。对于交互式定位来说,由于空间障碍物或环境条件等干扰的存在,并不是所有未知节点都能够获得足够的邻近锚节点信息,即使获得足够锚节点信息,如何有效地解决多解问题也是一个难点。对于被动式定位来说,定位成败完全取决于基础设施,一旦这个基础设施受到干扰或破坏,整个网络将处于瘫痪状态,对于军事应用来说,更存在着一些安全隐患。

(3) 网络可靠性

对于统一武器制导网络等空间应用来说,传感器节点工作在露天环境中,受强烈的日照以及雨淋等环境因素的影响,势必导致节点的失效,在确保硬件性能的同时,如何快速重组网络并定位自身要求定位机制具有一定的灵活性和智能性。此外,如何抵抗网络攻击,在危险环境下确保定位信息的准确性也是至关重要的。

(4) 性能评价模型

WSN 自身定位算法的性能直接影响其可用性,至关重要。网络的动态性和空间性加大了网络自身定位的难度,同时也使得算法的性能评价变得复杂。节点的移动性导致了定位的周期性,定位算法执行的周期,也即广播定位分组的频率影响到网络通信量,进而影响到能量的消耗。此外,空间中,由于障碍物等外界环境因素的影响,无线信号的传输变得不规则,如何有效地评价信号传输模型对算法的精度有着直接影响。因此,在考虑网络的移动性和空间性等因素的同时,如何对算法的评价标准进行模型化和量化是一个需要深入研究的问题。

结束语 普遍网络化孕育的无线传感器网络是一种新的信息获取和处理技术。作为重要的共性支撑技术之一,节点自定位问题极具研究价值。本文从静态和动态角度出发,综述了 WSN 节点定位的最新研究进展,并对典型的算法进行了分析比较。最后分析了统一武器制导网络等空间应用中节点定位的难题,初步探讨了三维移动定位问题,以期能为未来的研究提供一个良好基础。对于统一武器制导网络等应用来说,如何充分考虑节点的移动性和空间性,设计出有效的定位算法是一件具有挑战的事情。

- (8):102-114
[2] 卿利,朱清新,王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法. *软件学报*, 2006, 17(3):481-489
[3] Li Xiaoya, Huang Daoping, Yang Jian. Energy Efficient Routing Protocol Based on Residual Energy and Energy Consumption Rate for Heterogeneous Wireless Sensor Networks//第 26 届中国控制会议. 张家界, 中国, Vol. 5, July 2007:587-590
[4] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks//Proc. 33rd Hawaii Inter Conf. on System Science. Jan. 2000; 10-20
[5] Mhatre Vivek P, Rosenberg C, Kofman D, et al. A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2005, 4(1)
[6] Duarte-Melo E J, Liu Mingyan. Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks //Proceedings of IEEE Globecom. Taipei, Taiwan, November 2002
[7] Kim H, Kim S W, Lee S, et al. Estimation of the Optimal Number of Cluster-heads in Sensor Network //9th International Conference on Knowledge-based & Intelligent Information & Engineering Systems. Melbourne, Australia, 2005: 87-94

参考文献

- [1] Liu Kezhong, Wang Shu, et al. Efficient Localized Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Computer and Information Technology*//The Fifth International Conference. Sept. 2005:517-523
[2] Karalar T C, Yamashita S, et al. A Low Power Localization Architecture and System for Wireless Sensor Networks. *Signal Processing Systems*//IEEE Workshop. 2004:89-94
[3] Li Xiao, Shi Hongchi, et al. A Partial-range-aware Localization Algorithm for Ad-hoc Wireless Sensor Networks. *Local Computer Networks*//29th Annual IEEE International Conference. Nov. 2004:77-83
[4] Li Xiao, Shi Hongchi, et al. A Sorted RSSI Quantization Based Algorithm for Sensor Network Localization. *Parallel and Distributed Systems*//Proceedings of 11th International Conference. Volume 1, July 2005:557-563
[5] Feng Haoran, Yuan Ruixi, et al. An Energy-Efficient Localization Scheme with Specified Lower Bound for Wireless Sensor Networks. *Computer and Information Technology*//The Sixth IEEE International Conference. Sept. 2006:232-232
[6] Lazos L, Poovendran R. HiRLoc: High-Resolution Robust Localization for Wireless Sensor Networks. *Selected Areas in Communications*, IEEE journal, 2006, 24(2):233-246
[7] Li Zang, Trappe W, et al. Robust Statistical Methods for Securing Wireless Localization in Sensor Networks. *Information Processing in Sensor Networks*. //Fourth International Symposium. April 2005:91-98
[8] Zhang Yanchao, Liu Wei, et al. Secure Localization in Wireless Sensor Networks//Military Communications Conference. IEEE, Oct. 2005, 5:3169-3175
[9] Pandey S, Prasad P, et al. Localization of Sensor Networks Considering Energy Accuracy Tradeoffs. *Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing*//2005 International Conference. Dec. 2005:1-10
[10] Liu Kezhang, Wang Shu, et al. On Connectivity for Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*//2005 International Conference. Volume 2, Sept. 2005:879-882
[11] Huang Rui, Zaruba G V. Static Path Planning for Mobile Beacons to Localize Sensor Networks//Pervasive Computing and Communications Workshops, Fifth Annual IEEE International Conference. March 2007:323-330
[12] Yuan L, Chen Weidong, et al. A Review of Control and Localization for Mobile Sensor Networks. *Intelligent Control and Automation*//2006. The Sixth World Congress. Volume 2, June 2006:9164-9168
[13] Hu Lingxuan, Evans D. Localization for Mobile Sensor Networks. *Mobile computing and networking*, USA, Sept. 26-Oct. 1, 2004
[14] Chen Xun, Han Peng, et al. A Viable Localization Scheme for Dynamic Wireless Sensor Networks. *Computer and Computational Sciences*//First International Multi-Symposiums. Volume 2, April 2006:587-593
[15] Hsieh Y, Wang K. Efficient Localization in Mobile Wireless Sensor Networks. *Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing*//IEEE International Conference. Volume 1, June 2006:292-297
[16] Zhang Liqiang, Zhou Xiaobo, et al. Landscape-3D: A Robust Localization Scheme for Sensor Networks over Complex 3D Terrains. *Local Computer Networks*//Proceedings 2006 31st IEEE Conference. Nov. 2006:239-246
[17] 王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法. *软件学报*, 2005, 16(5):857-868
[18] 吕良彬,曹阳,等. 基于球壳交集的传感器网络三维定位算法. *北京邮电大学学报*, 2005, 29 (Sup.): 48-51