

无线传感器网络三维空间最佳覆盖路由协议

任 彦, 张思东, 张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 本文针对新兴无线传感器网络中的三维空间随机最佳覆盖 NP 难问题进行了研究. 采用计算几何与图论着色方法建立了三维空间的随机最佳覆盖数学模型, 给出了一种分布式启发算法, 得到了完成最佳覆盖的低能量消耗路径. 并在此基础上设计了一种可以实现无线传感器网络三维空间最佳覆盖的优化路由协议. 最后进行了协议算法的性能评价以及最佳覆盖和网络生存时间的实验仿真, 结果表明协议算法时间复杂度低, 并具有可扩展性、有效性和鲁棒性.

关键词: 无线传感器网络; 最佳覆盖; 路由协议; 分布式启发算法; 三维空间

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 02-0306-06

Three-Dimensional Optimal Coverage Routing Protocol in Wireless Sensor Networks

REN Yan, ZHANG Si-dong, ZHANG Hong-ke

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper analyzed optimal coverage for routing in three-dimensional wireless sensor networks. For this NP-hard combinatorial optimization problem, we proposed a new solution used techniques from Computational Geometry, Graph Coloring and established a new model for optimal coverage. We also proposed an energy-efficient distributed heuristic algorithm to find the optimal coverage routing path. Based on the model and algorithm, we presented a three-dimensional optimal coverage routing protocol in a distributed manner. To evaluate the performance of the algorithm, a time complexity analysis was given for each operation. In the end, we analyzed the coverage quality and compared the network lifetime with several typical protocols. Simulation results show that proposed routing protocol has low time complexity and it is considerably effective, scalable and robust.

Key words: wireless sensor networks; optimal coverage; routing protocol; distributed heuristic algorithm; three-dimensional

1 引言

1.1 无线传感器网络

近年来,随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanism System, MEMS)、无线通信、信息网络与集成电路等技术的迅速发展,新兴的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)应运而生^[1]. WSN 中的传感器节点一般都具备数据处理和通讯能力,可以利用节点附带的传感电路对周围有关的环境条件进行测量并将它们转化为电信号,再由传感器根据目标和周围发生事件的特性对这种信号进行处理. 传感器一般通过无线链路或直接或间接地将收集到的数据发送到一个指令中心(sink). 这种协作分布式传

感器网络的一种自然组织结构就是在各个传感器节点之间以 ad hoc 多跳方式通过通信链路组成一个自组织网络.

集成了网络技术、嵌入式技术及传感器技术的 WSN 可以将逻辑上的信息世界与真实的物理世界融合在一起,改变人与自然的交互方式. 利用 WSN 可实现数据的采集量化、处理融合和传输应用,并可以广泛地应用在数字家庭、医院、军事、环境监测及工业控制等领域.

1.2 无线传感器网络覆盖问题及相关工作

WSN 的覆盖问题,可以看作是在传感器网络节点能量、网络通信带宽、网络计算处理能力等资源普遍受限情况下,通过传感器网络节点放置以及路由选择等手段,最终使无线传感器网络的各种资源得到优化分配,进而使感

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(Na 60473001, Na 60572037); 北京交通大学优秀博士生科技创新基金(Na 48013)

知、监视、传感、通信等各种服务质量得到改善,这一点与传统 ad hoc网络有很大的不同。

WSN 目前主要存在两种覆盖方法,分别是确定性覆盖与随机覆盖。如果网络的状态相对固定,就可以根据预先确定的网络拓扑情况进行统一的节点规划设计,这种情况被称为确定性覆盖问题,典型的确定性覆盖

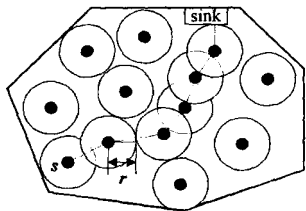


图 1 WSN 的最佳覆盖问题

有基于格 (grid) 的节点配置^[2,3]等。但是在许多情况下,由于网络情况不能预先确定,多数确定性覆盖模型会给网络带来对称性与周期性特征而掩盖某些网络拓扑实际特性^[4],再加上 WSN 自身拓扑变化复杂(包括各个节点能量变化,网络节点组成异质,可能存在部分运动的节点等),导致 WSN 采用确定性覆盖在实际应用中具有很大的局限性。因此需要对节点随机分布在传感区域的情况进行讨论,这就是无线传感器网络的随机覆盖问题,也正是本文研究所属的范畴。

给定一个无线传感器网络,通过设计一个基于位置的算法来找到一条连接网络中任意 s 源节点与 sink 指令中心的路径,并使该路径上所有点的最小被观察能力(这里指检测效果最差点到周围最近传感器节点的距离)最大化,这样的问题被称作无线传感器网络的“最佳覆盖问题”^[5]。最佳覆盖问题的二维图形化描述如图 1 所示,假设所有节点的传感半径相同,找到一个所有节点覆盖半径的最小值 r 使它满足:只经过传感器节点为圆心 r 为半径所确定的多个圆内部就可以找到一条连接网络中 s 源节点与 sink 指令中心的路径。

在 WSN 中实现随机覆盖情况下的最佳覆盖,是延长 WSN 的网络生存时间,优化网络资源配置、改善网络服务质量等的前提条件与可靠保证,它已成为无线传感器网络研究中一个亟待解决的关键问题。

有关 WSN 随机最佳覆盖问题的研究目前还处于起步阶段^[4,6]。文献 [4] 在只考虑 2 维传感器网络平面欧式距离条件下对网络覆盖的极限情况进行了讨论,并给出了一种集中式的算法;文献 [6] 也只是在 2 维传感器网络平面条件下给出了一种分布式的覆盖控制算法。总之,现有的研究工作都集中考虑了一定数量传感器节点在 2 维平面中的分布,并不适用于实际传感器网络中很多应用所需要的 3 维空间条件,如军事战场侦察、自然灾害救援、多样环境勘察等。虽然也有文献 [7,8] 对 3 维空间的 WSN 覆盖情况做了研究,但也只是单纯考虑了网络覆盖的连通性,而没有解决本文提到的更为复杂的三维随机最佳覆盖问题。

本文结构如下:第 2 部分对无线传感器网络进行三维空间最佳覆盖建模,并给出一种分布式启发算法;第 3 部分给出基于前一部分模型与分析的 WSN 三维空间最佳覆盖路由协议;第 4 部分进行了协议算法性能评价、协议最佳覆盖与

网络生存时间的仿真分析;第 5 部分对全文做出总结并提出下一步研究方向。

2 无线传感器网络三维空间覆盖建模与分析

如图 2 所示,给出一个三维空间的随机覆盖 WSN 示意图作为本文对 WSN 三维空间最佳覆盖进行建模、分析的拓扑。文中假设所有传感器节点覆盖范围为一个以节点为球心并具有相同传感半径的圆球体。

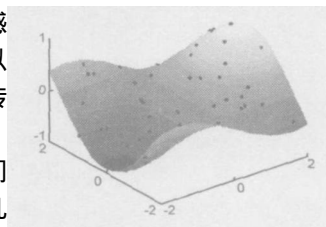


图 2 三维空间的随机覆盖 WSN 示意图

在进行 WSN 三维空间覆盖建模之前首先给出几个相关的定义:

定义 1 设无线传感器网络中所有节点 $(x_i)_i$ 是一系列独立同分布 (i. u. d) 的随机变量,且所有节点均有相同的传感半径 r 对于任意自然数 n ,我们记 $X_n = (x_1, \dots, x_n)$ 为所有传感器节点的集合。其中,如果节点 i 与 j 之间的欧式距离满足: $|i - j| \leq r$,那么两节点连通。

定义 2 由 X_n 组成的一系列三角形的集合,如果各个三角形的外接圆内部不再含有其他传感器节点,就记为 $D(X_n)$ 表示 WSN 的德洛内三角图 (Delaunay triangulation)。德洛内三角图各个有共享边的三角形外接圆的圆心相连就构成了 WSN 的沃罗诺伊图 (Voronoi Graph),记为 $V(X_n)$ 。 $D(X_n)$ 与 $V(X_n)$ 互为对偶图,如图 3 所示。

定义 3 如图 4 所示,给定一个常数 d ,对于 $D(X_n)$ 的任意一条边 (这里假设为 ab),如果在 ab 为直径确定的圆周内不再含有其他节点,所有这样的 ab 边以及所有满足 $a, b \leq d$ 条件的 ab 边组成的集合就称为加百利图 (Gabriel graph),记为 $G(X_n)$ 。可知 $G(X_n) \subset D(X_n)$ 。

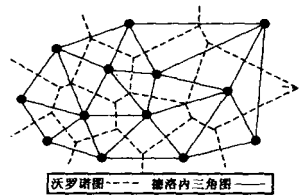


图 3 沃罗诺伊图与德洛内三角图定义

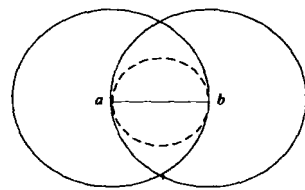


图 4 加百利图定义

相关研究已经可以优化解决二维平面的 WSN 最佳覆盖问题^[4,5],并且在数学上可以证明 $\lfloor n/3 \rfloor$ (不大于 $n/3$ 的最大整数) 个节点就可以达到基本的最佳覆盖效果^[9,10]。而对于三维空间的最佳覆盖问题可以证明这是一个 NP 难问题^[11],本文针对这一 NP 难问题采用计算几何方法给出的分布式启发算法如下:

(1) 根据现有 3 维 WSN 拓扑图生成化简但不失地理特征的 3 维德洛内三角图 $D_3(X_n)$,再进一步“保留”映射

为对应的 2 维德洛内三角图 $D_2(X_n)$.

定理 1^[12] 对于给定的顶点集合,生成的德洛内三角图可以最大化每个三角形的最小内角.

由定理 1 可知选择足够大的顶点集合就可以尽可能的保持原有 3 维 WSN 拓扑图的地理特征,如图 5 所示. 这样在保持 3 维 WSN

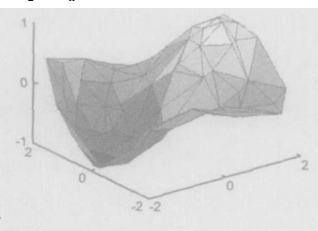
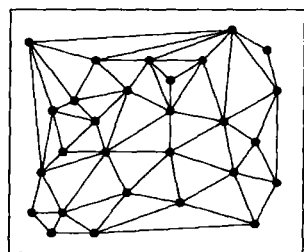


图 5 简化生成的 3 维德洛内三角图 $D_3(X_n)$



拓扑图一定级别的地理特征条件下,3 维 WSN 拓扑的覆盖即可转化为 $D_3(X_n)$ 的覆盖问题. 而要完成 $D_3(X_n)$ 的覆盖只需要保证其构成的每个三角形可被传感器节点覆盖监测即可. 由于德洛内三角图是由有公共边与公共顶点的相邻三角形构成,而传感器节点的覆盖范围为三维

图 6 映射生成的 2 维德洛内三角示意图 $D_2(X_n)$

空间的圆球体,因此位于三角形顶点的传感器节点可以同时参与完成共用该节点的几个三角形的覆盖而不受三维条件的限制. 为了算法进一步执行,我们可以在 $D_3(X_n)$ 保存原有节点数量和各边三维空间欧式距离信息后,将节点邻接关系“保留”映射为对应的 2 维德洛内三角图 $D_2(X_n)$,而不影响原有 $D_3(X_n)$ 的覆盖情况. 由随后算法处理过程可以看出,经过这样的“等数量点”和“等距离边”的邻接关系保留处理将不会影响分布式启发算法的有效执行. 图 6 中每一个三角形的顶点代表原先一个(也可能为多个)传感器节点.

这样,我们就完成了从“曲面”到“空间三角形”再到“平面三角形”的化简、映射. 当然在实际的地理环境中可能会出现更为复杂的特殊情况而导致局部地理特征的失真,如地形起伏很大而随机节点的分布不能有效适应,这需要进行增大随机节点的数量或是在局部地区增大节点密度来优化解决.

(2)对德洛内三角图 $D_2(X_n)$ 采用边着色算法.

本文对文献 [11] 中提出的算法进行了改进,使用 5 颜色的“边着色算法”来完成本文第三部分的分布式 WSN 路由协议“活跃”节点预选择工作. 由于欧拉公式保证至少出现一个度 (degree) 小于等于 6 的节点,因此 5 颜色着色算法始终可以执行 (详细证明参见文献 [13]).

执行边着色算法后 $D_2(X_n)$ 的每一条边均使用一种颜色标识,接着从这 5 种颜色中选择使用次数最少的 3 种颜色,使得 $D_2(X_n)$ 中所有的三角形都含有所选颜色的边. 由于三角形中边和顶点的对应关系,因此在每个三角形中“着色边”对应顶点处预选择“活跃”节点,就可以使该三

角形得到覆盖 (由定理 2 可知会要求传感器节点具有一定的覆盖能力),进而覆盖整个网络.

定理 2^[14] 对于充分大的一个常数 c ,如果满足 $r \sqrt{c \log n/n}$,那么 X_n 连通的概率随着 n 值的增大趋近于 1.

(3)在第 (2)步预选择的“活跃”传感器节点基础上,为实现在延长网络生存时间的同时达到最佳覆盖的目标,这里使用一种分布式的方法来优化预选择“活跃”节点的数目.

WSN 有效分布式算法应当尽力最小化网络的通信代价,这就使得传统分布式系统中许多经典的分布式算法不再适用,为此本文提出的算法在优化节点的数目 (即最终选定路由协议的“活跃”传感器节点)时以一种分布式的节能方法生成 $D_2(X_n)$ 的子集 $G_2(X_n)$,具体如下:

- 找到距离 sink 指令中心最近的节点 a ;
- 根据定义 3,构造 $D_2(X_n)$ 的子集 $G_2(X_n)$:任意节点 (设为 u) 广播自身位置信息并监听邻居节点 (设为 v) 的信息,最终得到对本地信息的认识 $R(u)$. 若以 uv 为直径的圆周内部不含有 $R(u)$ 中的节点或者满足 $u, v \leq d$ 条件 (这里的 d 为不同网络规模中可以调节网络覆盖程度的指定经验参数),则将 uv 加入 $G_2(X_n)$. 根据生成的 $G_2(X_n)$ 拓扑进一步删除冗余的预选择“活跃节点”以优化节点数目.

(4)假设无线链路 uv 的传输代价同 u, v 成正比^[15],其中 α 为 2 到 5 之间的常数. 为减少传输路径通信代价并同时完成网络最佳覆盖,运行分布式最短路径 Bellman-Ford 算法^[16] 来得到 a 与 s 源节点之间的最佳覆盖路径,总传输代价记为 $Cost$. 删除 $G_2(X_n)$ 中连接 a 与 s 源节点之间剩余传输代价大于 $Cost$ 的路径. 至此,得到给定 WSN 的三维空间最佳覆盖低能量消耗路径: sink, a + a, s .

3 WSN 三维空间最佳覆盖优化路由协议

在 WSN 三维空间覆盖建模与给出分布式启发算法基础上,本节具体介绍 WSN 三维空间覆盖优化路由协议. 路由协议由三个部分构成:路由建立,路由保持以及路由维护.

由于在无线传感器网络中网络通信资源与节点能量的保存是最重要的内容,直接影响到路由协议设计的成败,因此协议在考虑 WSN 三维空间最佳覆盖的同时从通信代价与节点节能的角度设计将 WSN 节点状态分为:活跃 (即可以产生数据又负责转发数据)、休眠 (只可以产生数据而不转发数据);并借鉴可减少网络负载的移动网络 (Network Mobility, NEMO)^[17] 思想按照节点功能进一步将活跃节点分为根节点 (可直接连接休眠节点) 与桥节点 (休眠节点通过桥节点间连接根节点). 其中,根节点可以同任何类型节点相连,桥节点只能同根节点或休眠节点相连,而休眠节点只能同根节点或桥节点相连. 这就使整

个 WSN 构成一个分级分层的拓扑结构,且由第二部分建模分析可知所有活跃节点构成一个连通集。

(1)路由建立:

- 通过各节点广播自身信息建立一个 WSN 三维空间分布的拓扑;

- WSN 按照前部分给出的分布式启发算法可以确定网络的活跃传感器节点,其余节点变为休眠节点;

- 基于 SPN 协议^[18]提出的协商发送数据机制,按照活跃节点的能量级别进一步将活跃节点分为根节点(高能量级别)与桥节点(低能量级别),操作伪码见表 1;

表 1 节点分类操作伪码

```
#活跃节点分类选择功能函数;
活跃节点分类选择(超时时钟,能量分类阈值)
    能量级别  本节点能量;
    前节点  消息发送者;
    发送含 能量级别的 确认消息到 前节点 ;
    广播消息到所有邻居节点;
    设置计数器为 超时时钟周期;
    while 没有超时
        if 收到消息类型为确认 then
            能量级别  能量级别 + 1;
        end if
    end while
    邻居列表  能量级别 ;
    while 能量级别 > 0 do
        if 收到消息类型为返回 then
            将返回消息值插入 邻居列表;
            能量级别  能量级别 - 1;
        end if
    end while
    if 能量级别 < 能量分类阈值 then
        活跃节点属性分类  1(根节点);
    else
        活跃节点属性分类  0(桥节点);
    end if
    邻居列表  活跃节点属性分类;
    将邻居列表返回 前节点 ;
```

- 得到给定 WSN 中任意 s 源节点与 sink 指令中心的三维空间最佳覆盖低能量消耗路径。

(2)路由保持:

由于 WSN 自身拓扑变化复杂,包括各个节点能量变化,网络节点组成异质,以及可能存在的部分运动节点等,导致在 WSN 中通信链路可能会中断,频繁的进行路由建立过程就会消耗网络有限的通信资源,因此需要对中断的通信链路进行路由保持操作:

- 节点周期发送短字节“路由保持 检测消息”;
- 若节点发现链路中断情况,执行局部的 $G_2(X_n)$ 重构;
- 重新计算无线链路的传输代价,并生成连接 s 源节

点与 sink 指令中心的 WSN 的三维空间最佳覆盖低能量消耗路径。

(3)路由重建:

为达到能量保存的目的,部分活跃节点与睡眠节点角色需要相隔较长的周期进行互换,因此路由重建以分布式方式重新执行路由建立过程后三步操作.由于分布式启发算法中的边着色具有不重复特性,因此可以保证生成的活跃节点具有不重复性。

4 协议性能评价与仿真

本部分主要进行了协议算法时间复杂度性能评价以及协议最佳覆盖与网络生存时间的仿真分析。

4.1 协议算法的时间复杂度分析

由于本文采用了分布式的执行算法,因此对于协议算法的时间复杂度分析就成为必不可少的内容:

路由建立阶段协议算法的时间复杂度如下:

- 建立一个 WSN 三维空间分布拓扑的时间复杂度为 $O(n)$;

- 生成 3 维德洛内三角图 $D_3(X_n)$ 的时间复杂度为 $O(n \log(n))^{[19]}$;

- 映射生成对应 2 维德洛内三角图 $D_2(X_n)$ 的时间复杂度为 $O(n)^{[20]}$;

- 5 颜色边着色算法的时间复杂度为 $O(n)^{[11]}$ (本文对文献 [11] 算法的改进并不影响它本身的时间复杂度);

- 找到距离 sink 指令中心最近节点 a 的时间复杂度为 $O(n)$;

- 分布式构造 $D_2(X_n)$ 子集 $G_2(X_n)$ 的时间复杂度为 $O(n \log(n))^{[21]}$;

- 运行分布式的 Bellman-Ford 最短路径查找算法,得到给定 WSN 的三维空间最佳覆盖低能量消耗路径的时间复杂度为 $O(n \log(n))^{[16]}$;

路由保持与路由重建阶段算法时间复杂度与路由建立阶段相似,不再重复分析.综上所述,可以得出总的协议算法运行时间复杂度为 $O(n \log(n))$,这使得在 WSN 环境中协议具有相当的可扩展性和有效性。

4.2 路由协议最佳覆盖与网络生存时间性能仿真

为了考察协议性能,我们使用 Matlab 工具产生网络拓扑,利用 NS-2 网络仿真软件进行了 WSN 最佳覆盖路由协议的性能仿真.仿真考察了同协议性能密切相关的 WSN 最佳覆盖程度,并针对 WSN 的网络生存时间进行了本文路由协议与其他典型 WSN 路由协议的比较。

我们首先考虑在一个 $100 * 100 * 50$ 的三维空间地形环境中,依次随机放置 10 次不同数量的传感器节点,分别为 50、100、150、200、250、300、350、400、450、500.每次给定节点数量后单个节点的覆盖半径依次赋值为 2、4、6、8、10.图 7 表示了协议运行后的传感器节点随机分布数目与单个节点覆盖半径以及此时网络最佳覆盖区域比例三者的

相互关系.

图中,节点数量给定时达到网络全覆盖的最小覆盖半径即为对应的最佳覆盖半径.从图中可以看出随着节点数目的增加,达到网络最佳覆盖效果所需节点最佳覆盖半径也相应地由12(对应节点数为100)减少到2(对应节点数为350),而全网络覆盖区域比例绝大部分维持在[75%,100%]这样一个比较高的水平.结果不仅证明了最佳覆盖路由协议算法的有效性和可扩展性,并且说明算法具有一定的网络覆盖鲁棒性.

随后我们在本文最佳覆盖路由协议与目前典型的数据为中心的Directed Diffusion协议^[22]、本文所借鉴的SPN协议^[18]和基于分层的LEACH协议^[23]之间进行了网络生存时间的比较.

为了便于协议性能的比较,我们固定网络规模为 $100 * 100 * 50$,网络节点数依次取50、100、150、200、250、300、350、400、450、500,并固定此时的节点半径为对应的网络最佳覆盖半径(如图7所示).MAC层采用1.6Mb/s的802.11协议.为了更真实的模拟实际的传感器网络无线收发功能,我们设置节点的空闲能量衰耗为35mW,接收能量衰耗为400mW,传输能量衰耗为600mW.在拓扑的一角设置5个作为探测到数据的源节点,每秒钟产生2个长度为64字节的数据消息.另随机选择5个节点作为sink节点用来接收数据.所有WSN节点的初始化能量设置为0.5J.之后分别运行所选各种WSN路由协议得到不同节点数目的网络生存时间对比结果,如图8所示.

从图中可以看出:最佳覆盖路由协议使得网络生存时间得到了较大的提高,分别为Directed diffusion协议和SPN协议的近3倍和2倍而略小于轮换分簇机制的LEACH协议.由前面分析可知网络生存时间略小的原因主要是由于节点需要完成最佳覆盖优化工作,网络生存时间的略小却换

来了WSN资源的优化配置和网络覆盖服务质量的改善.因此,网络生存时间的仿真结果也同样证明了最佳覆盖路由协议算法具有有效性和可扩展性.

5 结论

无线传感器网络覆盖问题与延长WSN的生存时间、

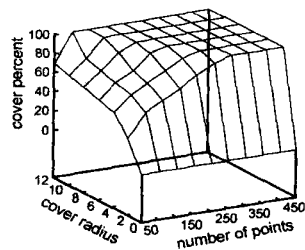


图7 最佳覆盖优化路由协议覆盖性能仿真结果

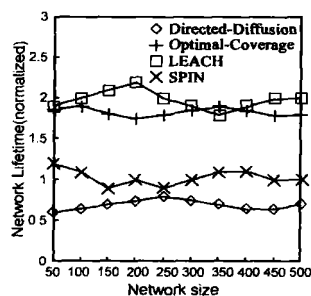


图8 WSN路由协议网络生存时间比较

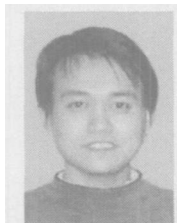
优化网络资源配置、改善网络服务质量等紧密相关,它已经成为无线传感器网络研究中的一个热点.本文针对WSN三维随机最佳覆盖这一NP难问题进行了研究,运用计算几何数学工具与图论着色方法建立了三维空间的随机最佳覆盖数学模型,给出了一种低时间复杂性的分布式启发算法,并在此基础上设计了一种可以优化完成WSN三维空间最佳覆盖的节能路由协议,协议最佳覆盖与网络生存时间的仿真结果证明了协议的可扩展性、有效性与鲁棒性.进一步改进三维空间的随机最佳覆盖数学模型并深入考虑更为复杂的三维环境问题使得协议具有更为广泛的适用性,完善考虑高精度的确定性与随机性覆盖以及适应移动性强的网络环境将是下一步研究工作的重点.

参考文献:

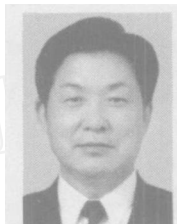
- [1] I F Akyildiz, et al Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393 - 422
- [2] K Chakrabarty, et al Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks [J]. IEEE Trans Computers, 2002, 51(12): 1448 - 1453.
- [3] F Y S Lin, P L Chiu A near-optimal sensor placement algorithm to achieve complete coverage/discrimination in sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(1): 43 - 45.
- [4] S Megerian, F Koushanfar, M Potkonjak, et al Worst and best-case coverage in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(1): 84 - 92
- [5] S Meguerdichian, F Koushanfar, M Potkonjak, et al Coverage problems in wireless ad-hoc sensor network [A]. In Proc IEEE INFOCOM 01 [C]. New York: IEEE Press, 2001. 1380 - 1387.
- [6] J Cortes, S Martinez, T Karatas, et al Coverage control for mobile sensing networks [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243 - 255.
- [7] V Ravelomanana Extremal properties of three-dimensional sensor networks with applications [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3): 246 - 257.
- [8] C F Huang, Y C Tseng, L C La The coverage problem in three-dimensional wireless sensor networks [A]. In Proc IEEE GLOBECOM 04 [C]. New York: IEEE Press, 2004. 3182 - 3186.
- [9] V Chvatal A combinatorial theorem in plane geometry [J]. Journal of Combinatorial Theory Ser B, 1975, 18(1): 39 - 41.
- [10] S Fisk A short proof of chvatal's watchman theorem [J]. Journal of Combinatorial Theory Ser B, 1978, 24(3): 374.
- [11] J O Rourke Art Gallery Theorems and Algorithms

- [M]. New York: Oxford University Press, 1987.
- [12] J O Rourke Computational Geometry in C [M]. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [13] M M arengoni, B A D raper, A Hanson, et al A system to place observers on a polyhedral terrain in polynomial time[J]. Image and Vision Computing Journal, 2000, 18 (10): 773 - 780.
- [14] M D Penrose On k-connectivity for a geometric random graph[J]. Random Structures & Algorithms, 1999, 15 (2): 145 - 164.
- [15] G J Pottie, W J Kaiser Wireless integrated network sensors[J]. Commun ACM, 2000, 43 (5): 551 - 58.
- [16] T J Comen, C E Leiserson, R L Rivest Introduction to Algorithms [M]. Massachusetts: MIT Press/ New York: McGraw-Hill, 1990.
- [17] V Devarapalli, R Wakikawa, A Petrescu, et al Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol[S]. IETF RFC 3963, Jan 2005.
- [18] W Heinzelman, J Kulik, H Balakrishnan Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[A]. In Proc ACM / IEEE MobiCom 99 [C]. New York: ACM Press, 1999. 174 - 185.
- [19] F P Preparata, M I Shamos Computational Geometry: An Introduction [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1985.
- [20] M de Berg, K T G Dobrind On levels of detail in terrains [R]. Technical Report, UU-CS-1995-12, Utrecht University, April 1995.
- [21] D W Matula, R R Sokal Properties of Gabriel graphs relevant to geographical variation research and the clustering of points in the plane [Z]. Geographical Analysis, 1984, 12: 205 - 222.
- [22] C Intanagonwivat, R Govindan, D Estrin, et al Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11 (1): 2 - 16.
- [23] W Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. In Proc of the Hawaii International Conference on System Sciences [C]. Los Alamitos: IEEE Press, 2000. 223.

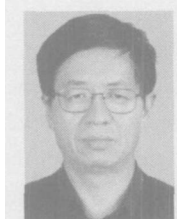
作者简介:



任彦男, 1981年生于山西太原, 2003年毕业于北方交通大学, 获学士学位, 现于北京交通大学电子信息工程学院攻读博士学位, 目前主要研究方向包括: 无线传感器网络路由、覆盖控制与拓扑控制, 下一代移动互联网路由理论与关键技术。E-mail: yren@center.njtu.edu.cn



张思东男, 1945年生于山东寿光, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网与无线传感器网络路由、资源分配与管理、网络安全。E-mail: sdzhang@center.njtu.edu.cn



张宏科男, 1957年生于山西大同, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为下一代互联网与无线传感器网络路由、安全、服务质量。E-mail: hkzhang@center.njtu.edu.cn