

基于能量水平的多 Sink 节点传感器网络路由算法

吴中博^{1,2,3} 樊小泊^{1,2} 陈红^{1,2}

¹(中国人民大学信息学院 北京 100872)

²(中国人民大学数据工程与知识工程教育部重点实验室 北京 100872)

³(襄樊学院电气信息工程系 襄樊 441053)

(rucwzb@163.com)

Energy Level-Based Routing Algorithm of Multi-Sink Sensor Networks

Wu Zhongbo^{1,2,3}, Fan Xiaobo^{1,2}, and Chen Hong^{1,2}

¹(Information School, Renmin University of China, Renmin University of China, Beijing 100872)

²(Ministry of Education, Key Laboratory of Data Engineering and Knowledge Engineering, Renmin University of China, Beijing 100872)

³(Department of Electrical and Information Engineering, Xiangfan University, Xiangfan 441053)

Abstract In the traditional single-sink sensor network, query dissemination and data collection are based on a fixed infrastructure. This infrastructure has some disadvantages, such as consuming energy of the nodes on the key path too quickly, the singleness of routing algorithm, the invalidation of the sink node, etc. To solve these problems, the research of multi-sink sensor networks is deployed. The system architecture of the multi-sink sensor network is proposed and a topology discovering and maintaining policy is provided. The system architecture includes task manager, proxy nodes, sink nodes and common nodes. Then a routing algorithm based on minimum energy consumption is provided. Because the minimum energy consumption routing algorithm consumes energy of the nodes on the key path too quickly, an energy level-based routing algorithm is put forward. The energy level-based routing algorithm will choose the path which has the highest energy level to deliver sample data to the sink nodes. The analysis shows that the minimum energy consumption routing algorithm adapts for data collection of sudden events and the energy level-based routing algorithm adapts for continuous query. Experiment results show that the energy level-based routing algorithm can keep the balance of energy consumption in the sensor network which can prolong the lifetime of the network.

Key words sensor network; multi-sink; system architecture; energy level; routing

摘要 单 Sink 节点传感器网络存在着部分关键路径上节点能量消耗过快、路由选择算法单一以及 Sink 节点失效等问题。首先提出了多 Sink 节点传感器网络数据收集的系统框架,给出了拓扑发现和维持策略,然后提出了基于最小能量消耗路由算法。在分析了该算法的不足后提出了基于能量水平的路由算法,按照计算得到的能量水平选择最优的路径进行数据传送。实验证明,基于能量水平的路由算法比基于最小能量消耗路由算法能更有效提高传感器网络的使用寿命。

关键词 传感器网络;多 Sink;体系结构;能量水平;路由

中图法分类号 TP393

随着传感器技术、嵌入式技术以及低功耗无线通信技术的发展,生产具备感应、无线通信以及信息处理能力的传感器节点已成为可能.众多具有类似功能的传感器节点通过自组织的方式进行通信,最后形成一个无线传感器网络(简称传感器网络)^[1].

传感器网络的特点是传感器节点资源受到某些限制,比如它的能量供给有限,计算和通信能力都受到一定的限制^[2].传感器网络所产生的数据具有连续、不确定性等特点,为此人们深入研究了以数据为中心^[3-4]的传感器网络数据管理技术,包括数据的表示、查询语言、数据存储、索引以及查询处理等.这些研究已经取得了许多有价值的成果^[5],但仍有许多问题没有解决:

1) 单 Sink 节点传感器网络无法处理 Sink 节点失效的问题, Sink 节点的失效会带来整个网络的瘫痪;

2) 所有数据都沿着到 Sink 节点的路径进行多跳传送,这样会造成 Sink 节点附近的节点能量消耗过快,严重影响传感器网络的使用寿命;

3) 只考虑到达 Sink 节点的跳数或者该路径上进行数据传送时的总体能量消耗,其选择结果一般是最短路径,而对于路径上节点的通信能力考虑不够.

本文通过分析单 Sink 节点传感器网络的不足,提出了一个多 Sink 节点传感器网络环境下数据管理的系统模型,并讨论了实现多 Sink 节点传感器网络环境下网络寿命最大化所需采用的各种关键技术,如并行拓扑构建、多 Sink 节点的路由选择等.

1 相关工作

多 Sink 节点传感器网络研究涉及路由、Sink 节点的定位、建模以及如何提高传感器网络寿命等问题.

在文献[6]中作者讨论了在多 Sink 节点环境下路由的构建、维护和选择等问题,但是该文中路由的维护代价较高,在簇头节点切换过程中可能出现网络分割的情况,而且也没有考虑节点本身的通信能力,因此它仍然无法解决传统算法中关键路径能量消耗过快的问题.文献[7]主要考虑传感器网络中多个 Sink 节点的定位以及从传感器节点到 Sink 节点之间的数据传输问题.文献[8]主要研究了在进行数据聚集时如何提高传感器网络使用寿命,作者也考虑了在多 Sink 节点环境下的传感器网络使用

寿命问题.

文献[9]利用逻辑图模型在多 Sink 节点传感器网络和单 Sink 节点传感器网络之间建立映射关系,并且证明了这种映射可以保证在逻辑图模型中的最短路径树在多 Sink 节点传感器网络中也是最短的路径树.

以上这些文献都是从某个方向考虑多 Sink 节点中涉及的问题,但是对于多 Sink 节点环境下传感器数据收集的系统结构研究不多.

2 背景知识及问题定义

本节首先介绍文献[10-11]中提出的传感器网络、路径、通信的能量消耗定义,然后根据多 Sink 节点传感器网络的特点,给出能量水平的定义,最后给出路径的能量水平的定义和计算方法.

定义 1. 传感器网络. 一个传感器网络可以用无向图 $G(V, E)$ 来表示. 其中 V 表示所有传感器节点和 Sink 节点的集合, E 表示所有传感器节点之间的一跳路由以及传感器节点和路由节点之间的路由集合,形式化描述为

$$V = V_{\text{sensor}} \cup V_{\text{Sink}},$$

$$E = \{ \{ u, v \} \mid u, v \in V_{\text{sensor}} \} \cup \{ \{ u, v \} \mid u \in V_{\text{sensor}}, v \in V_{\text{Sink}} \}. \quad (1)$$

每个传感器节点都携带有限的相等或者不等的初始能量 E_{total} , 节点的最大通信半径范围是 r . 传感器节点可以根据查询的可靠性要求通过一条或者多条路径把数据传送到传感器网络外部.

定义 2. 路径. 路径的定义是从某传感器节点出发,通过一跳或者多跳的方式,最终到达 Sink 节点的有序节点集合. 其形式化表示为

$$P = \{ V_{\text{sensor}_1}, V_{\text{sensor}_2}, \dots, V_{\text{Sink}_i} \}, \quad (2)$$

其中, V_{sensor_1} 表示路径起始传感器节点, V_{Sink_i} 表示路径的终止 Sink 节点.

定义 3. 通信的能量消耗. 任何两个可直接通信的节点 V_i, V_j 之间进行一次通信的能量消耗定义为两节点之间距离 $d_{(i,j)}$ 的函数 $Cost(d_{(i,j)})$. 具体的计算方法如下:

$$Cost(d_{(i,j)}) = kd_{(i,j)}^a + \tau, \quad (3)$$

其中, $k, \tau \in R$ 是实数. k 表示发射电路功耗系数, τ 用来表示传感器采样、计算和接收消耗的总能量,由于它和通信距离无关,我们可以把它作为一个常数来处理; a 是一个功耗指数,它根据发射源和接收

者之间的环境状况采用不同的值。

定义 4. 路径的能量消耗. 路径的能量消耗定义为传感器节点到某个 Sink 节点的路径上一次通信能量消耗的总和,可以表示为

$$Cost_P = \sum \alpha d_{(i,j)}. \quad (4)$$

由定义 2~4 可知,为了节约传感器节点的能量,应该尽可能减小发送节点和接收节点之间的距离。

由于传感器网络中事件的发生是随机的,用户的查询也是不确定的,这样会导致每个节点的能量消耗是不同的,其寿命也会各不相同,为了表示节点在不同时刻所具有的通信能力,我们提出了能量水平的概念。

定义 5. 能量水平. 能量水平定义是在当前剩余能量下,传感器节点沿某个邻居节点传送数据的次数。假设在某个时刻,传感器节点具有的剩余能量为 $E_{residual}$,当沿某路径进行数据传送时,可以通过该节点的剩余能量和该节点到下一节点的通信消耗的比值来计算该节点的能量水平(energy level),表示为

$$L_{i,m} = E_{residual} / (k \times d_{(i,j)}^{\alpha} + \tau), \quad (5)$$

其中, m 是 Sink 节点的标识,通过 m 来确定数据传送的方向。

在多 Sink 节点路由选择过程中,每个节点可能存在多个向外传送数据的路径。当按照不同路径进行数据传送时,其能量消耗会存在差异,路径能量水平的高低可以用来衡量沿哪个路径传送数据更加合理。

定义 6. 路径能量水平. 路径能量水平的定义为从该节点到某个 Sink 的路径上能量水平的最小值,形式化表示为

$$S_P = \text{Min}(L_{i,m}). \quad (6)$$

3 系统模型

在现有的单 Sink 节点传感器网络中,Sink 节点一般由具有较强的处理能力和持续能量供给的节点或者 PC 来承担。

我们对现有单 Sink 节点的传感器网络数据管理模型进行改进,提出了多 Sink 节点传感器网络系统模型,其网络结构如图 1 所示。传感器网络系统主要构件包括任务管理节点(task manager)、代理节点(proxy)、Sink 节点以及传感器节点。

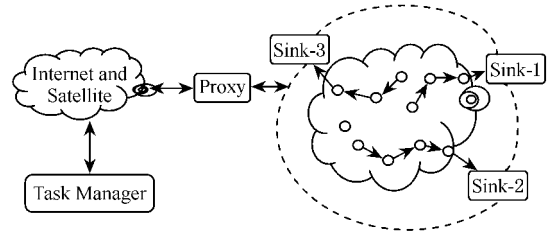


Fig. 1 Architecture of multi-sink sensor networks.

图 1 多 Sink 节点传感器网络结构

用户通过任务管理器发送查询请求,由 Internet 或者卫星传送到代理节点;代理节点的主要任务是负责任务的派送和结果的收集,对于不同的任务采用广播或者点对点的方式进行处理;符合查询条件的传感器节点按照能量有效的原则把采集到的数据传送到最佳的 Sink 节点,代理节点的另外一个作用就是对来自传感器的数据做必要的处理,比如消除冗余数据。和 Sink 节点一样,代理节点的处理能力、存储能力和通信能力都相对较强。在实际应用中,为了节约成本可以把代理节点和任务节点合并,任务节点利用代理中间件替代代理节点,这样可以减少硬件投资的开销。

第 4 节我们将详细讨论如何建立基于能量水平的路由算法,使得能量利用更加合理。

4 关键技术

4.1 拓扑构建和维护

和单 Sink 节点传感器网络一样,多 Sink 节点传感器网络在进行查询处理前需要进行初始化,以发现节点之间的拓扑关系、构建查询分发和数据收集的基础结构。本文采用传统的 TopDisc^[12]算法进行拓扑构建。拓扑构建主要包括以下几个步骤:首先,代理节点向 Sink 节点发送建立拓扑的消息;然后,由离 Sink 节点最近的传感器节点启动“发现邻居节点”的广播消息,每个消息都携带一种状态信息;邻居节点接收到消息后等待一段时间,该时间根据其与发送节点之间的距离成反比;随着查询消息在网络中传播,最后传感器网络被分割成多个簇(cluster),每个簇都有一个簇头。由簇头负责收集本簇内其他节点的信息,簇头之间通过网关节点进行连接,形成一个覆盖监控区域的传感器网络。

4.2 路由选择

4.2.1 基于最小能量消耗路由选择算法

基于最小能量消耗路由选择算法非常简单,通过

查找节点的路由表便可以得到该节点到达每个 Sink 节点的跳数,具有最小跳数的路径消耗的能量也将最小,选择该路径进行数据传送即可。

基于最小能量消耗路由选择算法的形式化描述为

$$\text{Min}_k(\text{Cost}(V_i, V_k)). \quad (7)$$

4.2.2 基于能量水平的路由选择算法

基于能量水平的多 Sink 节点路由的核心思想是根据节点的能量水平,计算数据传送路径上的路径能量水平,选择具有最大路径能量水平的路径进行数据传送。

假设存在某个节点 V_i ,同时该传感器网络存在 k 个 Sink 节点,从节点 V_i 出发到达 Sink 节点 V_k 的路径用 $P_{i,k} = \{V_i, \dots, V_j, \dots, V_k\}$ 表示,节点编号为 i 的节点沿 Sink 节点 k 方向的能量水平记为 $L_{i,k}$,节点 i 沿 Sink 节点 k 方向的路径能量水平记为 $S_{i,k}$ 。基于能量水平的多 Sink 节点路由选择算法的形式化描述为

$$\text{Max}_k(S_{i,k}) = \text{Max}_k(\text{Min}_j(L_{j,k})), \quad (8)$$

其中 $j \in P_{i,k}, j \neq k$ 表示除 Sink 节点以外所有路径上的传感器节点。

4.3 算法分析

基于最小能量消耗的路由策略通常被用于单 Sink 节点传感器网络的数据收集。选择最小能量消耗的路径来进行数据传送可以使数据传送的能量消耗最小,但是由于某些关键节点充当着数据采集和转发的双重任务,比如靠近 Sink 节点处的某些节点,这些节点的能量消耗过快。由于最小能量消耗的路由选择算法只考虑到某个路径上能量的总体消耗,忽略了对于从数据源节点到 Sink 节点的路径上的传送过程中转发节点能力的考虑。因此,采用这种算法进行数据传送会使节点的能量消耗不均衡,在一定程度上影响传感器网络的使用寿命。

和基于最小能量消耗的路由算法相比,基于能量水平的路由算法可以延长传感器网络的使用寿命,使得数据沿着具有较高能量水平的路径传送。但是获取路径的能量水平是需要代价的。数据源节点需要向每个 Sink 节点发送一条消息,然后 Sink 节点就可以知道数据源节点到达自己的路径上的能量水平, Sink 节点之间通信后将消息汇总,然后由一个 Sink 节点将能量水平的情况告诉数据源节点。

对于突发事件的数据传送,选择基于最小能量消耗的路由策略是比较合理的,因为获取路径能量水平

的代价相比较数据传送本身所消耗的能量太大。

对于连续监视,我们就可以根据能量水平来进行路由选择。假设数据源节点将要发送 m 条消息给 Sink 节点,我们的路由算法分为两个阶段。第 1 阶段为能量水平确立阶段,首先数据源节点依次往每个 Sink 节点传送一条消息,数据源节点在发送消息时将自己的能量水平 L_{source} 设置为 minLevel 并附加在消息中,路径上的节点在转发消息时将自己的能量水平 L_i 与 minLevel 比较,如果 L_i 小于 minLevel 就用 L_i 的值去替换 minLevel ,否则就保持 minLevel 不变。当消息到达 Sink 节点时, Sink 节点就可以知道该路径的能量水平。算法 1 描述了确定路径能量水平的过程。在每个 Sink 节点都收到一条消息后, Sink 节点之间交换消息将路径能量水平汇总到路径能量水平表 $\text{PathEnergyLevelList}$ 中,然后将 $\text{PathEnergyLevelList}$ 沿着能量水平最高的路径传送给数据源。

算法 1. 路径能量水平确立算法 $\text{EnergyLevel}()$

Begin

① $\text{MinEnergyLevel} = L_{\text{source}}$

② for $P_{i,k}$ 中的每一个传感器节点 V_i do

③ if $L_{i,k} < \text{MinEnergyLevel}$ then

④ $\text{MinEnergyLevel} = L_{i,k}$

⑤ $\text{PathEnergyLevelList}[k] = \text{MinEnergyLevel}$;
end

第 2 阶段为路由选择阶段,对于剩下的 $m - k$ 条消息,数据源每次从 $\text{PathEnergyLevelList}$ 中选择能量水平最高的路径发送消息,同时将该路径的能量水平减 1。

5 实验

为了估计传感器网络的使用寿命,我们需要定义一种和数据收集相关的度量标准。实验采用协作寿命指标进行度量。

定义 7. 协作寿命。协作寿命定义为从传感器网络开始工作时起到第 1 个传感器节点失效时的时间。为了简化时间的计算,我们采用和文献[13]相同的寿命计算方法,使用从传感器网络开始工作到第 1 个节点失效时所经过的数据收集的轮(round)数来衡量传感器网络的使用寿命。

表 1 列出了本节中实验所使用到的参数。实验采用 Java 语言编写的传感器网络模拟器。

Table 1 Symbol of Parameters and Default Value

表 1 参数的符号表示和默认值

| Parameter | Signal | Value |
|--------------|--------------|------------------|
| Common Nodes | N | 2500 |
| Sink Nodes | n | 4 |
| Monitor Area | $m \times m$ | 100×100 |

5.1 实验结果

我们首先比较了基于最小能量消耗路由和基于能量水平路由对传感器网络寿命的影响. 图 2 是实验结果,其中 CR 表示最小能量消耗路由, ER 表示基于能量水平的路由,横轴表示 Sink 节点的数量,纵轴表示传感器网络的使用寿命.

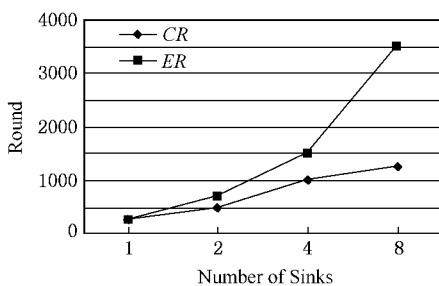


Fig. 2 Lifecycle contrast between CR and ER.

图 2 CR 和 ER 生命周期比较

从图 2 可以看出,采用基于最小能量消耗路由和基于能量水平路由在单 Sink 节点时的传感器网络寿命相同,因为单 Sink 节点所形成的路由路径是惟一确定的.随着 Sink 节点数量的增加传感器网络的寿命都有显著的提高,因为随着 Sink 节点数量的增加每个传感器节点到达 Sink 节点的平均距离就会减少,那么传送数据所消耗的能量就会减少,从而网络寿命就会增加.另外,采用基于能量水平路由策略时传感器网络的寿命要大于采用基于最小能量消耗路由时的网络寿命,这是因为基于最小能量消耗策略,数据始终沿能量消耗最小的路径进行数据传输,由于传感器网络部署的不一致性和节点能量消耗的不一致性,最小能量消耗路径上剩余的能量可能比较少,这样就会加速网络失效的速度;由于基于能量水平路由策略考虑到路径上节点的能量水平,它在一定程度上避免使用剩余能量少的节点进行转发数据,从而可以延长传感器网络的使用寿命.

然后我们比较了基于最小能量消耗路由和基于能量水平路由的网络延时.图 3 是实验结果,其中 CR 表示最小能量消耗路由, ER 表示基于能量水平

的路由,横轴表示 Sink 节点的数量,纵轴表示数据传输的平均延时.

从图 3 中可以看出,随着 Sink 节点数量的增加,数据传输的延时有较大幅度的减少,因为随着 Sink 节点数量的增加,每个传感器节点到达 Sink 节点的平均距离就会减少,在相同的节点密度下,意味着数据传输到 Sink 节点所需要的跳数会减少,从而传输的延时也就降低了.而且我们注意到,采用基于能量水平路由算法的延时比采用基于最小能量消耗路由算法的延时要略高一些,因为采用基于能量水平路由算法时选择的能量水平最高的路径不一定是最短的路径,而且在确定数据源节点到各 Sink 节点的能量水平时,Sink 节点之间需要额外的通信,导致了比基于最小能量消耗路由算法更多的延时.但是考虑到基于能量水平路由算法对传感器网络寿命的提高程度,这点延时是可以接受的.

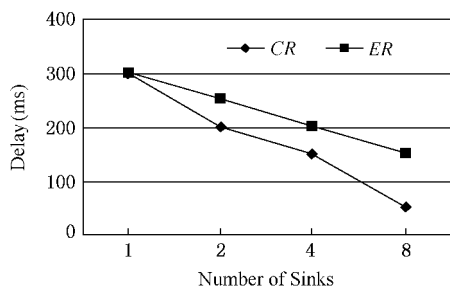


Fig.3 Delay of CR and ER.

图 3 CR 和 ER 的延时比较

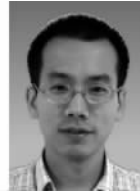
6 总结与展望

通过分析传统单 Sink 节点传感器网络的不足,本文提出了一个多 Sink 节点传感器网络环境下数据管理的系统模型,由每个 Sink 节点分别负责收集局部范围内的传感器节点的采集数据,达到延长传感器网络寿命的目的.本文首先提出了基于最小能量消耗路由选择算法,在分析了该算法的不足后,提出了基于能量水平的路由选择算法,按照计算得到的能量水平选择最优的路径进行数据传输,实验证明该算法能有效提高传感器网络的使用寿命.

结合多 Sink 节点传感器网络的分布式特点,我们未来的工作是如何利用多 Sink 节点传送过程中的部分冗余信息,为可靠性要求高的应用提供冗余查询处理;另外,多 Sink 节点传感器网络数据聚集查询处理问题也是下一步研究的方向.

参 考 文 献

- [1] Sun Limin, Li Jianzhong, *et al.* Wireless Sensor Networks [M]. Beijing : Tsinghua University Press , 2005 (in Chinese) (孙利民, 李建中, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京 : 清华大学出版社, 2005)
- [2] M Li, Y Liu. Sensor data management in pervasive computing [R]. Pennsylvania State University , Tech Rep : TR02-026 , 2002
- [3] A Ghose , J Grossklags , J Chuang. Resilient data-centric storage in wireless sensor networks [C]. The 4th Int 'l Conf on Mobile Data Management (MDM), Melbourne , Australia , 2003
- [4] S Ratnasamy , B Karp. GHT : A geographic hash table for data-centric storage [C]. In : Proc of the 1st ACM Int 'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York : ACM Press , 2002. 94-103
- [5] N Xu. A survey of sensor network applications [R]. University of Southern California , Tech Rep : CS694 , 2003
- [6] Y Chen , E Chan , Song Han. Energy efficient multipath routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes [C]. The 6th Int 'l Workshop on Advanced Parallel Processing Techniques , Hong Kong , 2005
- [7] H Kim , Y Seok , N Choi , *et al.* Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks [G]. In : Lecture Notes in Computer Science 3391. Berlin : Springer , 2005. 264-274
- [8] Y Xue , Y Cui , Klara Nahrstedt. Maximizing lifetime for data aggregation in wireless sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications , 2005 , 10(6) : 853-864
- [9] A Das , D Dutta. Data acquisition in multiple sink sensor networks [C]. The 2nd Int 'l Conf on Embedded Sensor Systems , Baltimore , USA , 2004
- [10] B Deb , S Bhatnagar , B Nath. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management [R]. Department of Computer Science , Rutgers University , Tech Rep : DCS-TR-441 , 2001
- [11] Fan Xiaobo. Research progress on multi-sink sensor networks [R]. Renmin University of China , Tech Rep : TR-200501 , 2005 (in Chinese) (樊小泊. 多 Sink 节点传感器网络研究进展 [R]. 中国人民大学 , 技术报告 : 2005)
- [12] S Madden , M J Franklin , J M Hellerstein , *et al.* TAG : A tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks [J]. SIGOPS Operating Systems Review , 2002 , 36(SI) : 131-146
- [13] E I Oyman , C Ersoy. Multiple sink network design problem in large scale wireless sensor networks [C]. Int 'l Conf on Communication , Pavis , France , 2004



Wu Zhongbo , born in 1980. Ph. D. candidate in Renmin University of China. His current research interests include database , data warehouse , business intelligence and sensor networks.

吴中博 , 1980 年生 , 博士研究生 , 主要研究方向为数据库、数据仓库、商务智能、传感器网络等。



Fan Xiaobo , born in 1976. Ph. D. candidate in Renmin University of China. His current research interests include database , data warehouse , data stream and sensor networks.

樊小泊 , 1976 年生 , 博士研究生 , 主要研究方向为数据库、数据仓库、数据流、传感器网络等。



Chen Hong , born in 1965. Professor and Ph. D. supervisor. Senior member of China Computer Federation. Her main research interests include database , data warehouse and sensor networks.

陈红 , 1965 年生 , 教授 , 博士生导师 , 中国计算机学会高级会员 , 主要研究方向为数据库、数据仓库和传感器网络等。

Research Background

In the traditional single-sink sensor network , query dissemination and data collection are based on a fixed infrastructure. This infrastructure has some disadvantages , such as consuming energy of the nodes on the key path too quickly , the singleness of routing algorithm and the invalidation of the sink node *etc.* To solve these problems , we deploy the research of multi-sink sensor networks. In this paper , we firstly propose the system architecture of multi-sink sensor network and provide topology discovering and maintaining policy. Then we provide a routing algorithm based on minimum energy consumption. With the analysis of the disadvantage of minimum energy consumption routing algorithm , we put forward an energy level-based routing algorithm. Experiment results show that the latter can keep the balance of energy consumption in the sensor network which can prolong the lifetime of the network. We plan to improve the robustness of sensor networks using redundant information. Our future works also include data aggregation and query processing in multi-sink sensor networks. This work is supported by the National Natural Science Foundation (grant No. 60603046 , 60673138) , the Key Program of Scientific Technical Research of Ministry of Education (grant No. 106006) , and the Program for New Century Excellent Talents in Universities.