

无线传感器网络的路由协议研究与分析*

戴世瑾, 张翼德, 李乐民

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 在简单介绍传感器网络协议框架的基础上,对现有的几类典型路由协议进行了综述,并对它们的优点及不足进行了分析、比较,从而为优化路由协议以及研究新型路由协议做了铺垫,并让无线传感器网络用户在选择路由协议时有了很好的依据。

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 接收发送器; 传感器节点

中图法分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2006)12-0294-04

Research and Comparison on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks

DAI Shi-jin, ZHANG Yi-de, LI Le-min

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: In this paper, the architecture of the protocol stack for wireless sensor network and the features are introduced. And then this paper studies recent routing protocols for wireless sensor networks and presents a variety of classification of them, as well as contrasts and compares with the representative routing protocols. So, we can do some research in-depth, such as routing protocol optimization and new protocol design. And then, the users of the wireless sensor networks can choose the best suitable protocol for their applications. At last, several future open issues of the wireless sensor networks are put forward.

Key words: Wireless Sensor Networks; Routing Protocol; Sink; Sensor Node

近年来,伴随着微机电系统(MEMS)、处理器和存储技术的发展,生产出功耗低、体积小、低成本的微传感器节点已逐步实现。这些微传感器节点具备感知能力、无线通信能力以及计算能力。无线传感器网络是由成百上千的传感器节点遍布在大规模而形成地域,它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术。网络中各个节点能够协作地进行实时监测、感知并采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,进而获得详尽而准确的信息,然后传送给需要这些信息的用户,因此无线传感器网络受到了越来越多的关注。由于无线传感器网络具有可快速部署、可自组织和高容错性的特点,因此非常适合在军事上应用。例如,通过飞机将传感器节点撒播在战场上,可对化学武器的使用、敌方车辆和士兵的运动进行及时监测和报告。传感器网络对于比较恶劣的环境和人不宜到达的场所也非常适用,因此可用于荒岛上的环境和生态监控、原始森林的防火和动物活动情况监测、污染区域以及地震和火灾等突发灾难现场的监控。另外,它还可用于城市的交通监测、大型车间原材料和仓库货物进出情况的监测,以及机场和大型工业园区的安全监测。无线传感器网络可以使人们在任何时间、地点和任何环境条件下获取大量详实而可靠的信息,因此,这种网络系统的应用遍布各个领域,如国防军事、国家安全、环境监测、交通管理、医疗卫生、制造业、反恐、抗灾等。可以说无线传感器网络是信息感知和采集领域的

一场革命,是 21 世纪最重要的技术之一^[1]。

尽管目前关于无线传感器网络的特点、应用等的综述类文章已经很多,但是本文在以下几个方面区别于以往文章。首先是将重点放在网络层的路由协议上,而并非对整个无线传感器网络进行介绍;其次是在介绍传感器网络协议栈及其特点的基础上,重点阐述了目前提出的几种典型的传感器网络路由机制,并对这些路由协议的优点和不足进行了对比,从而为使用传感器网络的用户选择何种路由协议提出了依据,并为今后路由协议的优化及发展新型路由协议做了铺垫。

1 无线传感器网络的协议框架

在讨论无线传感器网络路由协议之前,先来介绍一下无线传感器网络的协议框架。无线传感器网络的协议框架如图 1 所示,包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。物理层负责载波频率的产生、信号的调制、解调等工作。数据链路层负责媒体接入和差错控制,媒体接入协议可以在通信网络中确保点对点 and 点对多点的连接;差错控制则保证源节点发出的信息可以完整、无误地到达目的节点。网络层协议负责路由发现与维护,在无线传感器网络中占据着重要的地位,路由协议的正确选择是网络设计成功与否的关键。在无线传感器网络中,大多数节点无法与接收发送器(Sink)直接通信,因此需要中间节点进行多跳路由。如果应用层需要,则传输层协作维护数据流。如果系统要接入 Internet 或者与其他网络相连,则必须具备传输层。基于不同的监测任务,在应用层上会开发和使用不同的应用层软件。应用层管理协议使底层的硬件、软件对于传感器网络的管理应用是透明的。其主要的协议有传感

收稿日期: 2005-10-19; 修返日期: 2005-12-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研基金资助项目(60218002)

器管理协议(Sensor Management Protocol, SMP)、任务分配和数据通知协议(Task Assignment and Data Advertisement Protocol, TADAP)、传感器查询和数据分发协议(Sensor Query and Data Dissemination Protocol, SQDDP)。与各层网络协议相关的管理平台有能量管理平台、移动管理平台和任务管理平台。能量管理平台管理传感器节点的能量使用; 移动管理平台用于检测和注册传感器节点的移动, 维护到 Sink 的路由, 从而使传感器节点能够跟踪其邻近节点; 任务管理平台负责在一个给定的区域内平衡和调度监测任务。

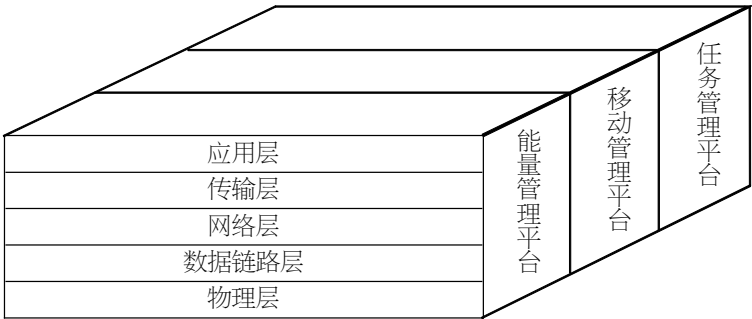


图 1 无线传感器网络结构

2 无线传感器网络的路由协议

目前对无线传感器网络的研究主要集中在数据链路层和网络层。在此, 首先对无线传感器网络的路由协议进行分类, 然后对这些协议进行分析、比较。

2.1 路由协议分类

无线传感器网络的路由协议依据不同的标准有多种分类。例如, 根据网络的拓扑结构可以划分为平面式路由协议、分级式路由协议以及基于位置信息的路由协议。在平面式路由协议中, 所有节点的地位是平等的, 原则上不存在瓶颈问题, 其缺点是可扩展性差; 另外, 平面路由协议需要维持路由表, 在大规模网络中, 这会消耗大量的存储空间, 同时由于发送信息中包含了路由信息, 因此会引起网络中通信负担的加重。在分级结构的网络中, 簇内各成员的功能比较简单, 不需要维护复杂的路由信息, 这样就大大减少了网络中路由控制信息的数量, 而且分级式路由协议具有很好的可扩展性。其缺点是簇首节点可能会成为网络的瓶颈。如果簇内节点数量众多, 簇首节点的能量会很快耗尽, 从而网络需要重新组织。基于位置信息的路由协议根据节点的位置将数据转发到目的地, 而并非在全网内发送数据。按照发送端如何寻找到接收端路由的方法分类, 路由协议又可分为主动式、响应式和混合式路由协议。主动式路由协议中, 所有的路由都经过预先计算, 然后才根据需要选择使用, 而响应式路由协议中只有在需要发起时才去计算路由。混合式即主动式、响应式两种的结合。由于传感器节点的资源有限, 节点不能负载大容量的路由表, 因此, 响应式和混合式路由协议相对而言对传感器网络更实用。本文将无线传感器网络的路由协议分为以下几种类型: 平面式路由协议、分级式路由协议, 以及基于位置信息的路由协议。

2.2 典型路由协议

在现有的网络模型中, Ad hoc 网络与无线传感器网络有许多相似之处, 如它们的网络拓扑结构都不是固定不变的, 网络中的各个节点均通过无线通信链路相连, 网络节点能量有限等。因此人们首先对现有 Ad hoc 网络协议进行了研究, 结果发现这些协议并不能直接用于传感器网络, 这是因为两者又有

许多不同之处^[2]。例如:

- (1) 传感器网络中的节点数量远远大于 Ad hoc 网络中的节点数。
- (2) 传感器网络中节点数量庞大, 维护全局标志需要大量的开销, 因此, 在传感器网络中一般不采用像 Ad hoc 中那样的全局标志 ID。
- (3) 传感器节点要比 Ad hoc 网络中的节点简单, 价格低廉, 其计算能力、通信能力均较弱, 传感器节点出现故障的频率要高于 Ad hoc 网络中的节点。
- (4) 在传感器网络中, 由于多个源传感节点在许多场景下都有可能获得大量相似的数据, 因此传感器网络中的冗余数据量大。
- (5) 无线传感器网络的拓扑结构会发生频繁的改变。
- (6) 传感器网络中传感器节点主要以广播方式进行通信, 而大多数的 Ad hoc 网络是基于点对点通信方式的。

针对这些问题, 康奈尔大学、南加州大学等很多大学及研究机构均开展了对传感器网络通信协议的研究, 并先后提出了几种新的通信协议。下面列举几个具体的路由协议, 并对其进行分析、比较。

2.2.1 泛洪法(Flooding)

Flooding 是一种传统泛洪式路由技术, 它不需要维护网络拓扑结构和计算路由。接收到数据包的节点以广播形式转发给所有的邻近节点, 重复执行此过程, 直到数据包到达目的地或者达到预先设定的最大跳数。对于传感器网络来说, 泛洪法是一种较简单直接的实现方法, 但存在消息内爆(Implosion)、重叠(Overlap) 以及资源盲点(Resource Blindness) 的缺点。

2.2.2 基于协商的路由协议

SPIN(Sensor Protocol for Information via Negotiation)^[3] 路由算法是一种平面式的自适应通信路由协议, 其目标是通过使用节点间的协商制度和资源自适应机制, 解决传统泛洪法存在的不足之处。在 SPIN 算法中假设所有的传感器节点均可能是希望获得数据的接收发送器(Sink), 每个传感器节点知道自己是否需要数据或是否在数据源到接收发送器的路径上。传感器节点在发送数据前先进行协商, 仅把数据发送到需要的相邻节点, 这种协商制度可以确保有效的数据传输。传感器节点间通过发送元数据(Meta-Data, 即描述传感器节点采集的数据属性的数据), 而非采集到的整个数据进行协商。由于元数据的大小小于采集的数据, 所以传输元数据消耗的能量相对较少。在发送或接收数据之前, 每个节点都必须检查各自可用的能量状况, 如果处于低能量水平, 则必须中断一些操作, 如充当数据中转(路由器) 的角色, 停止数据转发操作。

SPIN 协议中使用 ADV, REQ 和 DATA 三种类型的消息。

- (1) ADV——用于新数据广播。当一个传感器节点有数据需要传输时, 它就使用 ADV 数据包(包括元数据) 对外广播。
- (2) REQ——用于请求发送数据。当一个传感器节点希望接收 DATA 数据包时, 便发送 REQ。
- (3) DATA——包含了元数据头、传感器节点采集数据的数据包。

在发送 DATA 数据包之前, 传感器节点首先对外广播 ADV 消息, 如果一个邻近节点在收到 ADV 后希望接收该 DATA 数据包, 那么它向该节点发送一个 REQ; 接着该节点向它发送 DATA 数据包。类似的过程继续下去, DATA 数据包就会

被传输到远方接收发送器。该协议的优点在于其简单性,节点仅需要知道它的邻近节点,无需其他拓扑信息。SPIN 协议的缺陷也很明显,它扩展受限,如果 Sink 对网络中的多个事件感兴趣, Sink 周围的节点能量会很快耗尽;另外,数据会在整个网络中传输。

Directed Diffusion^[4] 算法与 SPIN 算法一样,也是一种平面式路由协议。它是对以数据为中心的传感器网络路由算法研究中的一个重要里程碑。接收发送器向所有传感器节点广播其嗜好(Interest,即通过分配不同属性值来表示不同任务的描述符,如目标名称、持续时间、位置区域等,每个传感器节点在收到嗜好后保存在各自的 Cache 中。每个嗜好项包含一个时间标签域和若干个梯度域(按成本最小化和能量自适应原则引导数据扩散的方向)。当一个嗜好传遍整个网络后,从源节点(即嗜好所在区域的传感器节点)到接收发送器之间的梯度就建立起来了。一旦源节点采集到嗜好所需的数据,那么源节点沿着该嗜好的梯度路径传输数据到 Sink。其中,源节点采集的数据首先在本地采用数据融合技术进行整合,然后在网上传输。Directed Diffusion 协议的一大特点是引入了网络梯度概念,其协议在节省能量的同时也带来了一些问题。例如,在实现数据融合时采用了时间同步,这其实在传感器网络中并不容易实现。数据融合给系统带来了额外开销,这些会增加传感器节点的生产成本。

2.2.3 低功耗自适应聚类路由算法

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[5] 是 MIT 的 Heinzelman 等人为无线传感器网络设计的低功耗自适应聚类路由算法,其核心思想是基于分簇的路由。LEACH 协议的特点是分级和数据融合,分级有利于网络的扩展,数据融合能够减少通信量。在 LEACH 模型中,首先作出如下假设:

假定通信信道是对称的,即在一定的信噪比要求下,从 A 到 B 传输一个信息与从 B 到 A 的传输消耗相同的能量。传感器节点持续监测周围的物理现象,并以恒定速率发送监测数据。接收发送器固定不动且远离传感器节点。传感器网络中使用相同的能量受限的传感器节点且每个节点均可以与接收发送器直接通信。LEACH 中定义了循环(Round)的概念,一个循环由两个阶段组成,即簇建立阶段和稳定的数据通信阶段。通常情况下,稳定态持续较长的时间。在簇建立阶段,非簇首节点根据接收到的各簇首节点发送信号的强度动态地自动形成簇,并且使用簇首与接收发送器进行通信。簇内节点与簇首通过 CSMA MAC 协议进行通信,然后簇首使用 TDMA 方式为每个节点分配通信时隙。簇首的选择方法是,网络中的传感器节点任意选择一个从 0~1 之间的随机数,如果当前循环中的该数值小于设定的门限值 $T(n)$,则选取该节点作为簇首, $T(n)$ 的计算方法如下:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p^{*}(r \bmod \frac{1}{p})} & \text{如果 } n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中 p 为簇首节点占网络中节点总数的百分比, r 为当前循环数, G 是在最后的 $1/p$ 次循环中未成为簇首的节点集合。

在稳定的数据通信阶段,传感器节点持续采集监测数据,并在其分配的通信时隙使用最小能量,将数据传送到簇首。在不发送数据的时隙时,传感器节点可以关闭以节约能源。簇首节点接收到簇内所有的数据后,进行必要的数据融合并把结果

发送给接收发送器,然后在下一次循环中重新选择簇首进行数据传输。由于簇首需要完成数据融合、与 Sink 进行通信等工作,因此,簇首的能量消耗非常高。只有各节点等概率地担任簇首,这样才能使网络中所有节点比较均衡地消耗能量,从而延长整个网络的生存期。采用 LEACH 方法使因能量耗尽而失效的节点呈随机分布状态,因而与一般的多跳路由协议和静态聚类算法相比, LEACH 可以将网络的生存期延长 15%^[6]。但是在 LEACH 算法中,由于假设所有的节点均能直接与簇首和 Sink 通信,并且采用连续数据发送和单跳模式,因此在监测大范围地域的情况下并不适用,而且动态分簇带来了簇首变换和大量广播这样的额外开销^[7]。

在 LEACH 算法的基础上, Lindsey 等人对 LEACH 进行了改进,提出了 PEGASIS 以及 Hierarchical-PEGASIS 算法^[8,9]。PEGASIS 算法基于以下三点假设: 传感器网络中所有节点都知道其他节点的位置信息,并且所有节点都可以直接传输数据给 Sink。所有传感器节点都是固定不动的。Sink 节点是固定的并且远离各传感器节点。与 LEACH 协议中形成多个簇不同,在 PEGASIS 协议中,节点之间形成链(Chain)。在链中,每个节点可以接收和发送数据给相邻节点,在链中,只有一个节点被选作与 Sink 通信用。采集的数据从一个节点传送给另一个节点,数据不断地融合并最终传给 Sink 节点。PEGASIS 中使用了贪婪算法(Greedy Algorithm)来形成链,链的形成在每一轮通信之前。为确保每个节点都有其相邻节点,从离接收发送器最远的节点开始构建,链中邻近节点的距离会逐渐增大。因为已经在链中的节点不能被再次访问,当其中一个节点失效时,链重构。在链中的数据传输如图 2 所示。

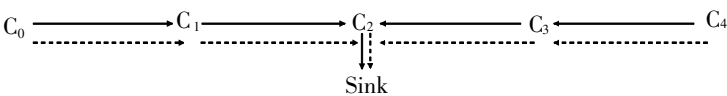


图 2 PEGASIS 中的链

PEGASIS 中数据的传输使用 Token(令牌)机制,Token 很小,故耗能较少。因为 PEGASIS 算法中每个节点均以最小功率发送数据分组,并有条件完成必要的数据融合,减小了业务流量,因此,整个网络的功耗较小。研究结果表明,PEGASIS 支持的传感器网络的性能是 LEACH 的近两倍。与 LEACH 相比,它有以下特点: 大部分节点传输距离比 LEACH 小,只与相邻节点进行通信,以最小功率发送数据分组,而 LEACH 则是簇中每一个节点都与簇首进行通信。在 PEGASIS 中,链首接收的数据信息只有两个,而不是像 LEACH 中的除簇首外所有其他簇内节点的数据信息。每次循环中只有一个节点与 Sink 通信。正是由于这些特点,PEGASIS 比 LEACH 更节能,因而其网络生存期更长。其不足之处在于节点维护位置信息(相当于传统网络中的拓扑信息)需要额外的资源。与 Sink 通信的链首会成为网络通信的瓶颈。Hierarchical-PEGASIS 是对 PEGASIS 的扩展,其目的是减小数据传输到 Sink 过程中带来的延迟,它通过考虑能量×延迟的矩阵提出了解决数据融合的方法。

2.2.4 感知能量和地理位置的路由算法

GEAR(Geographic and Energy Aware Routing)^[10] 是充分考虑了能量有效性的基于位置信息的路由协议,它比其他的基于位置的路由协议如 GPSR 能更好地应用于无线传感器网络中。GEAR 算法的提出基于以下思想:在传感器网络中向适当的区域发送查询时,此查询数据中包含了位置属性信息,因此,可以

利用这一信息,将在整个网络中扩散的信息传送到适当的位置区域中。

GEAR 传送数据分组到目标区域中所有节点的过程包括两个阶段,即目标区域数据传送和域内数据传送。在目标区域数据传送阶段,当节点接收到数据分组,它将邻近节点与目标区域的距离和它自己与目标区域的距离相比较,若存在更小距离,则选择最小距离的邻节点作为下一跳节点;若不存在更小距离,则认为存在 Hole,节点将根据邻节点的最小开销来选择下一跳节点。在域内数据传送阶段,可通过两种方式让数据在域内扩散:域内直接泛洪,递归的目标区域数据传送,直到目标区域剩下唯一的节点。GEAR 将网络中扩散的信息局限到适当的位置区域中,减少了中间节点的数量,从而降低了路由建立和数据传送的能量开销,更有效地提高了网络的生存期。其缺点是依赖节点的 GPS 定位信息,成本较高^[6]。

3 各路由协议的比较

各种路由协议相互之间是有联系的,如 LEACH, PEGASIS 和 Hierarchical-PEGASIS 的设计是基于同一思想的,后两种协议都是前者添加了一些新的特点而成的。无线传感器网络是基于应用特定性的,因此很难说一种协议比另一种协议更好。例如,在一个小范围的传感器网络中,各节点均可以起到接收发送器的作用,并且在节点均不需要移动的情况下,SPIN 协议就是最好的一种。评价一个无线传感器网络路由设计是否成功,可以用以下几个指标作为衡量的标准,如能源有效性、网络的生命周期、可扩展性等。在分析了每种路由算法的思想及特点后,我们对所列举的几种协议作一个综合的比较,如表 1 所示。

表 1 几种典型路由协议的综合比较

比较参数	Flooding	SPIN	Directed Diffusion	LEACH	PEGASIS	Hierarchical PEGASIS	GEAR
路由优化	无	无	有	无	无	无	无
网络生存期	不长	长	长	长	长	长	长
能源有效性	不好	较好	较好	好	好	好	好
元数据描述	无	有	有	无	无	无	有
路由选择	多跳	多跳	多跳	单跳	多跳	多跳	多跳
数据发送模式	连续	查询驱动	查询驱动	连续	连续	连续	查询驱动
可扩展性	受限	受限	可以	好	不能	不能	不能
数据融合	无	无	有	有	有	有	无
分类	泛洪式	平面式	平面式	分级式	分级式	分级式	基于位置

基于以上的分析,可以得出结论,一种好的无线传感器网络路由协议必须具备以下特点^[11]:

- (1) 数据融合。若节点能对数据进行分类并融合,那将使查询处理更加有效,进而显著地降低网络开销,节省能量。
- (2) 随机路由选择。如果路由协议能支持到目的地的低开销多种路由,就会使网络负载趋于平衡,节点的容错能力得到提高。
- (3) 传感器节点传送监测数据的门限。设置一个最佳门限值将有助于减少无用的传输,进而节省能量。
- (4) 传感器节点转发数据的门限。选择合适的转发数据能量及时间延迟门限值将有助于延长整个网络的生存期。

4 结论

近年来,对无线传感器网络路由算法的研究成为学术界和工业界的热点问题。与传统的有线网络路由相比,研究无线传感器网络路由算法带来了更大的挑战。本文综述了近年来人

们对传感器网络路由协议的研究成果,并对它们进行了比较,阐述了算法的优点和缺陷。

尽管这些协议均在某种程度上改善了网络的性能,但是仍然有许多研究工作要继续。目前无线传感器网络路由协议均假定传感器节点和 Sink 是静态的,但是在某些情况下(如在战场环境侦察等)的应用中可能需要节点可移动。在这种情况下,传感节点位置信息的频繁更新以及传播更新信息会使传感器节点的能量很快耗尽。因此,新的路由算法需要在考虑能量有效性的前提下提供对节点移动的支持,并能处理网络拓扑改变带来的额外开销。在其他一些应用中,需要将传感器节点收集的信息传送到任务管理节点,又或者需要将任务管理节点对数据的查询信息传送到传感器节点,因此将传感器网络与 Internet 结合在一起的路由协议也是未来研究的新方向。另外无线传感器网络的安全也是人们关注的问题。

参考文献:

[1] hijin D, Xiaorong J, Lemin L. Research and Analysis on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[C] . International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, 2005. 407-411.

[2] Akyildiz I F, Su W, *et al.* A Survey on Sensor Networks[J] . IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8) : 102-114.

[3] Kulik J, Rabiner W, Balakrishnan H. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks[C] . Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM '99) , 1999. 174-185.

[4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C] . Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM '00) , 2000. 56-67.

[5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C] . Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

[6] 刘炎艳, 李仁发. 无线传感器网络路由协议分析[EB/OL] . [http: // www. autocontrol. com. cn/ article/ image/ wuxianchuangan qiwanluoluyouxieyifenxi. pdf](http://www.autocontrol.com.cn/article/image/wuxianchuangan_qiwanluoluyouxieyifenxi.pdf).

[7] Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J] . Elsevier Ad hoc Network Journal, 2005, 3(3) : 325-349.

[8] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems[C] . Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 2002. 1125-1130.

[9] Lindsey S, Raghavendra C S, Sivalingam K. Data Gathering in Sensor Networks Using the Energy* Delay Metric[C] . Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001. 2001-2008.

[10] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[R] . UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001.

[11] Qiangfeng J, Manivannan D. Routing Protocols for Sensor Networks [C] . The 1st Consumer Communications and Networking Conference, 2004. 93-98.

作者简介:

戴世瑾,男,在读博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、Ad hoc 网络、无线资源管理;张翼德,男,在读博士研究生,主要研究方向为无线资源管理、Ad hoc 与无线 Sensor 网络;李乐民,男,中国工程院院士,教授,博导,主要研究方向为通信网,包括宽带通信网、移动通信网。