

基于查询的无线传感器网络多源单汇路由算法

卢先领^{1,2*}, 王莹莹², 王洪斌², 徐保国^{1,2}

(1. 轻工过程先进控制国家教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

(* 通信作者电子邮箱 jnlxl@gmail.com)

摘要:针对定向扩散巨大的能量开销以及在路径加强时存在的链路冗余等问题,提出了一种基于查询的无线传感器网络多源单汇路由算法。该算法通过网络分簇来减少平面泛洪所带来的能量消耗,根据邻居节点的优先级来选择下一跳节点,建立多条源节点到 Sink 节点的路径,并在路径交叉处进行数据融合。仿真结果表明,该算法在节点能耗均衡性、能量有效性、数据包的传输量等方面具有明显的优势,有效地延长了网络生命周期。

关键词:定向扩散;局部路由;多源单汇;生命周期

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Multi-source to single-sink routing algorithm based on data query for wireless sensor network

LU Xianling^{1,2*}, WANG Yingying², WANG Hongbin², XU Baoguo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry,

Ministry of Education (Jiangnan University), Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: A multi-source to single-sink routing algorithm based on data query for wireless sensor network was proposed to resolve the problem of huge energy consumption and the redundant links at path reinforcement stage in directed diffusion. Clustering was used to reduce the energy consumption of plane flooding, and the next hop nodes were selected based on the priorities of the neighbor nodes to build the routes from multi-source to single-sink and fuse data at the intersection of the routes. The simulation results show that the algorithm can balance the energy consumption, improve the energy efficiency, reduce the number of packets, and prolong the network lifetime.

Key words: Directed Diffusion (DD); local routing; multi-source to single-sink; network lifetime

0 引言

由于无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)自身在能量供应、数据处理以及通信能力上的限制,其路由协议与传统的路由协议有较大的不同。因此,提高 WSN 能量有效性、延长网络生命周期成为 WSN 路由协议设计的重要目标^[1-3]。

平面路由协议^[4]结构简单,健壮性好,易维护;但是没有中心管理节点,不能对网络资源进行优化管理,传输跳数较多,因此不能应用于大规模网络。而分簇路由协议^[5]以其结构扩展性强、拓扑管理方便、易于实现数据融合,适合大规模网络等优点而被广泛地研究与发展。

本文在深入分析、研究现有的路由技术和主动式查询数据传输模式的基础上,从传感器网络查询路由的角度出发,提出一种适用于多个源节点环境下的数据查询路由算法。

1 相关工作

定向扩散(Directed Diffusion, DD)是由 Sink 节点发起的主动查询式协议,其路由机制可以分为周期性的兴趣扩散、梯度建立和数据沿加强路径传输三个阶段。其中,兴趣扩散和探测梯度建立都依赖于信息的平面泛洪,时间和能量开销都比较大,严重影响了网络的能量利用效率;并且,随着无线传

感器网络规模的增大,泛洪的开销会迅速提高,使得定向扩散协议很难应用到大规模网络中。

目前,基于 DD 的改进算法主要是通过建立簇或树结构将网络分层^[9],减少兴趣消息或探测数据被转发的跳数,达到节约能耗、缩短网络延迟、延长网络生命周期的目的。Cui 等^[6]提出的 IDD(Improved Directed Diffusion)通过分簇来减少兴趣扩散和梯度建立阶段的通信开销。RTDD(Real-Time communication protocol for Directed Diffusion)^[7]通过扩散实现一个优先级的调度机制,提高了数据的传输速率,实现了数据的实时性传输。文献[8]提出一种路径转换机制,当路径中某个节点的剩余能量接近或小于阈值时,对路径进行调整,避开剩余能量少的节点,避免路径中的某些节点因能耗过大而过早地死亡,造成通信中断;同时达到均衡网络负载、延长网络生命周期的目的。但当兴趣消息变化比较频繁,源节点也不断发生变化时,以上算法在每次查询过程中都建立加强路径,然后将数据沿着加强路径传送到 Sink 节点,不仅造成一定的能量浪费还增大了网络的延迟,使采集的数据失去实时性。

网络的定期泛洪使每个传感器节点得到网络的全局信息,扩展性较差,功耗高。而在局部路由算法^[10]中节点根据自己感知区域内的信息,决定下一跳的路由节点,实现数据包的发送;但是由于局部缺乏足够的拓扑信息,路由过程中可能

收稿日期: 2013-04-18; **修回日期:** 2013-06-05。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61174021); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP21129); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介: 卢先领(1972-),男,浙江临海人,副教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络、体域网; 王莹莹(1988-),女,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络路由; 王洪斌(1987-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:无线体域网; 徐保国(1951-),男,江苏淮阴人,教授,博士生导师,主要研究方向:过程控制、智能仪表、现场总线网络。

造成路由空洞。

本文提出了 DQ-MSSS 算法,通过分簇解决兴趣扩散阶段泛洪方式将兴趣扩散到整个网络所带来的巨大能耗问题;通过省略梯度建立和路径加强阶段,来解决建立梯度和加强路径所带来的能量消耗和网络延迟问题。在数据传输阶段根据局部路由的思想建立多个源节点到 Sink 节点的路径。

2 DQ-MSSS 算法

DQ-MSSS 算法设计的主要目标是:减少兴趣扩散和数据传播时的能量消耗、提高能量利用率、均衡各节点之间的能量、最大化网络生命周期。假定网络中的节点是静止的,可以通过全球定位系统(Global Positioning System, GPS)或其他定位方式确认网络中每个节点的位置信息;网络中各节点与邻居节点之间周期性地交换位置与剩余能量信息。DQ-MSSS 算法主要由网络分簇、兴趣扩散和路由建立与数据传输三部分组成。

2.1 网络分簇

在簇头选举阶段,采用 DCHS^[11] 的簇头选择策略。每个节点选择一个 $0 \sim l$ 的随机数,如果选择的数小于阈值 $T(v_i)$, 则该节点就充当簇头节点。 $T(v_i)$ 的计算如下:

$$T(v_i) = \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} \times \left[\frac{E_{i_residual}}{E_0} + \left(r \cdot \frac{1}{p} \right) \left(1 - \frac{E_{i_residual}}{E_0} \right) \right] \quad (1)$$

其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示网络中的节点集合, p 是节点当选簇头的概率; r 是目前循环进行的轮数; r_s 表示节点连续未当选簇首的轮次; G 是最近 $1/p$ 轮中还未当选过簇头的节点集合; $E_{i_residual}$ 表示节点 v_i 的剩余能量, E_0 为节点的初始能量。

成为簇头的节点以固定的功率向网络中发送广播信息,非簇头节点选择信号强度最强的簇头节点作为自己的簇头节点,并告知相关的簇头节点,自己则成为簇内组员。

簇的建立完成后,每个簇头节点建立一个簇成员节点信息表,记录簇成员节点的 ID、剩余能量、节点坐标、数据采集类型等。

2.2 兴趣扩散

利用分簇的思想进行兴趣扩散,能够大大减少能量开销,提高能量利用率。具体扩散过程如下:

1) Sink 节点周期性地通过泛洪的方式将兴趣扩散给所有的簇头。兴趣消息是对采集任务的具体描述,包括任务类型、目标区域、数据发送速率等参数。

2) 簇头收到兴趣消息后,首先查询自己所维持的簇成员节点信息表,若簇内存在节点所采集的数据类型符合兴趣要求,则该簇头将兴趣消息扩散到簇内,否则不扩散。

2.3 路由建立与数据传输

在 DD 的梯度建立阶段,源节点向 Sink 节点发送探测数据包,泛洪方式在带来巨大网络能耗和网络延迟的同时产生大量的冗余信息。加强路径形成后,源节点将采集数据沿着加强路径发送给 Sink 节点。当查询周期较长时,该路径上的节点会因能耗过大而过早地死亡,造成网络分割。当查询周期相对较短,兴趣消息频繁发生变化时,若每次源节点都要发送探测数据包建立加强路径,则存在很大的能量浪费。

DQ-MSSS 算法省略掉梯度建立与路径加强阶段,利用局部路由的思想,综合考虑邻居节点的剩余能量、位置等信息,制定邻居节点的优先级策略,选择优先级最大的邻居节点作

为下一跳节点,直到将数据传送给 Sink 节点。

2.3.1 邻居节点优先级的确定

当节点有数据产生或收到数据后,根据邻居节点的剩余能量、有无数据、位置、路径能耗等来确定转移方向。 $N(i)$ 表示节点 v_i 的邻居节点集合, $N_j(i)$ 表示节点 v_i 的第 j 个邻居节点。算法中相关函数的定义描述如下:

定义 1 路由趋势函数。为了使数据向着 Sink 节点的方向传输,防止生成环路,并使数据在传输过程中进行数据融合,邻居节点 v_j 的路由趋势函数 $Trend(v_j)$ 定义为

$$Trend(v_j) = \begin{cases} 1, & v_j \in S \text{ 且 } d_{j_sink} < d_{i_sink} \\ & \text{或 } v_j \in C \text{ 且 } d_{j_sink} < d_{i_sink} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示网络中的源节点集合; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$ 表示网络中的簇头节点集合; d_{j_sink} 表示节点 v_j 到 Sink 节点的距离。 $Trend(v_j)$ 为 1 的节点更有可能成为下一跳节点,保证了数据沿着 Sink 节点的方向进行传输,另外,源节点和簇头成为下一跳节点的概率大大增加,有效地提高了融合效率,避免没有数据的节点作为中继节点转发数据而浪费能量。如图 1 所示:节点 C 比节点 B 更有可能成为下一跳节点。

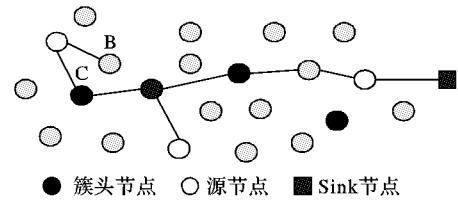


图 1 节点位置与路由选择

定义 2 能量比例函数。为减少低能量节点成为下一跳节点的概率,定义能量比例函数 $Energy(v_j)$ 为

$$Energy(v_j) = E_{j_residual} / E_0 \quad (3)$$

其中: $E_{j_residual}$ 表示节点 v_j 的剩余能量, E_0 为节点的初始能量。剩余能量高的节点成为下一跳的概率大大增加,避免低能量节点作为中继节点转发数据而消耗过多能量,造成节点过早死亡,保证网络中节点能耗的均衡。

定义 3 路径比例函数。为缩短传输路径,保证数据沿着距离较短的路径进行传输,定义路径比例函数 $D(v_j)$ 为

$$D(v_j) = \frac{R - d_{j_sink}}{R} \quad (4)$$

其中: R 表示网络半径; d_{j_sink} 越大优先级越低,保证数据向着 Sink 节点的方向进行传输,缩短传输距离。

定义 4 两节点间通信能耗比例函数。为减少能量消耗,定义两节点间通信能耗比例函数 $cost(v_j)$ 为

$$cost(v_j) = \frac{cost_{max} - cost(i, j)}{cost_{max}} \quad (5)$$

其中, $cost(i, j)$ 为节点 v_i 到节点 v_j 的通信能耗,数据传输模型采用一阶无线电模型^[12]。

$$cost(i, j) = \begin{cases} E_{elec} \cdot k + (E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{fs} \cdot k \cdot d_{ij}^2), & d_{ij} < d_0 \\ E_{elec} \cdot k + (E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{mp} \cdot k \cdot d_{ij}^4), & d_{ij} > d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$cost_{max} = \begin{cases} E_{elec} \cdot k + (E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{fs} \cdot k \cdot R_{max}^2), & R_{max} < d_0 \\ E_{elec} \cdot k + (E_{elec} \cdot k + \varepsilon_{mp} \cdot k \cdot R_{max}^4), & R_{max} > d_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中: R_{\max} 为节点的最大通信距离; d_{ij} 为节点 v_i 到 v_j 的距离; ε_{fs} 、 ε_{mp} 分别为两种信道模型下功率放大所需能量。

$$d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}} \quad (8)$$

定义 5 邻居节点优先级函数。综合考虑邻居节点的剩余能量、节点位置、节点类型、两节点间通信能耗等因素, 定义优先级函数 $priority(v_j)$ 为

$$priority(v_j) = Trend(v_j) + \alpha Energy(v_j) + \beta D(v_j) + \gamma cost(v_j) \quad (9)$$

其中, α 、 β 、 γ 分别为 0 到 1 之间的系数, 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。分别由式(3) ~ (5) 可知 $0 < Energy(v_j) < 1$, $0 < D(v_j) < 1$, $0 < cost(v_j) < 1$ 。当前节点在邻居节点集中选择优先级函数最大的作为下一跳节点, 由式(2) ~ (9) 可以看出链路能量消耗越小、剩余能量越多、距离 Sink 节点越的邻居节点, 被选为下一跳的概率越大。

2.3.2 数据传输

当网络拓扑结构稳定后, Sink 节点为进行数据查询将兴趣消息扩散到网络中, 源节点收到 Sink 节点的兴趣消息后开始传输数据。传输过程如下:

步骤 1 当节点 v_i 产生或收到数据时, 首先根据 d_{i_sink} 产生一个延迟, 延迟时间与 d_{i_sink} 成反比, d_{i_sink} 越大, 延迟时间越短。

步骤 2 在延迟时间内据式(1) ~ (8) 计算各个邻居节点的优先级 $priority(N_j(i))$, 优先级高的节点成为下一跳节点。

步骤 3 将数据传送给优先级最高的邻居节点, 并在该节点进行数据融合, 若该节点为 Sink 节点则传输完成, 若该节点不是 Sink 节点则返回步骤 1。

算法伪代码描述如下:

```

If (node  $v_i$  have a sampled data);
    Set Delay( $v_i$ ) from 0 to  $\tau$ ;
    Set  $priority_{\max} = 0$ ;
    While ( Delay( $v_i$ ) is not equal to 0 );
        { For  $j = 1$  to  $|N(i)|$ 
            Calculate  $N(i)$ 's  $priority(N_j(i))$  according (2) ~ (9);
            If (  $priority(N_j(i)) > priority_{\max}$  )
                 $priority_{\max} = priority(N_j(i))$ ;
                next-hop =  $N_j(i)$ ;
            End
        }
    End
    If ( Delay( $v_i$ ) is equal to 0 )
         $v_i$  Send its data to the node next-hop;
    End
    The node next-hop receives data from node  $v_i$ ;
    If (next-hop has data)
        Node next-hop aggregates all the data that it sampled and received;
    End
End

```

3 仿真实验

本文采用 NS2 进行仿真实验, 在网络的生存周期、能量效率、能耗均衡性、网络中数据包的传输量四个方面与 DD、IDD 进行比较。

3.1 仿真环境与参数设置

100 个节点随机分布在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 区域内, Sink 节点坐标为 (100, 200), 源节点的个数为 5, 每个节点的最大通信

距离为 50 m, 数据包大小 500 B, 兴趣包大小 25 B。数据传输模型采用一阶无线电模型^[12]。实验中涉及到的其他参数值如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数	取值
ε_{fs}	$1.0\text{E}-11 \text{ J}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$
ε_{mp}	$1.3\text{E}-15 \text{ J}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$
E_{elec}	$5.0\text{E}-8 \text{ J/bit}$
融合单位长度数据能耗	$5.0\text{E}-9 \text{ J}/(\text{bit} \cdot \text{signal}^{-1})$

3.2 实验结果分析

降低网络能耗一般从两个方面入手: 一是缩短传输路径, 二是减少传输内容即减少数据的传输量。在定向扩散中兴趣包和探测包都通过泛洪的方式进行传输, 所以网络中的数据包的传输量比较大。DQ-MSSS 算法不仅通过分簇减少了兴趣包的传输量, 还略掉探测包的发送, 又在数据包传输过程中进行数据融合, 大大减少了数据包在网络中的传输量。MQ-MSSS 算法在路由建立过程中增大源节点、簇头节点成为下一跳节点的概率, 减少了没有数据的节点仅作为中继节点转发数据而造成的能量浪费。

图 2 结果表明, DQ-MSSS 网络中数据包的传输量明显少于 DD 和 IDD。网络中数据包传输量减少的同时传输数据包所消耗的能量也相应地减少, 有效地降低了能量消耗, 提高了能量利用效率。

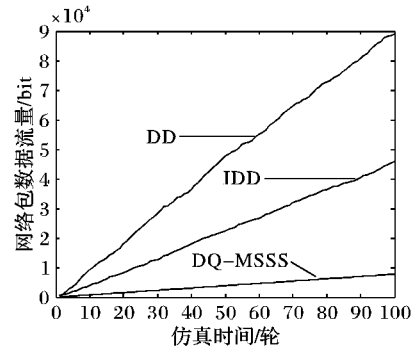


图 2 网络中数据包传输量

图 3 为三种算法在每次查询任务中的能量消耗, 可以看出: DD 的曲线波动最大, IDD 次之, DQ-MSSS 最小, 小的波动性反映出良好的能耗均衡性。就曲线的振幅而言, 从大到小依次为: DD、IDD、DQ-MSSS, 振幅越小, 能耗越小。仿真结果表明, 本文所提算法在能量有效性和能耗均衡性都优于其他两种算法。

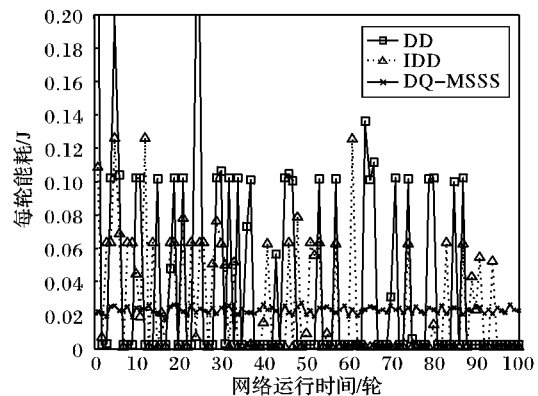


图 3 网络中每轮的能耗

图 4 为三种算法网络中剩余总能量的比较。由仿真图可

以看出 DQ-MSSS 算法的网络剩余总能量明显高于其他两种算法,有效节约了能量,提高了能量利用率。

网络生命周期是衡量网络优劣的一个重要标志,是设计路由算法最主要的目标之一。当网络中有 100 个节点时,图 5 对三种算法的生命周期进行了仿真对比,从图中可以看出当网络运行到 218 轮和 239 轮时 DD 和 IDD 的第一个节点分别死亡,当运行到 1170 轮时 DQ-MSSS 的第一个节点才失效。通过对比,可以看出 DQ-MSSS 算法明显延长了网络生命周期。

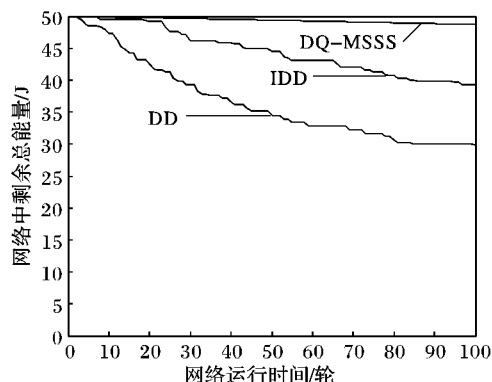


图4 网络中剩余能量对比

图 6 将网络中的节点数目增至 200,对三种算法的网络生命周期进行仿真。通过与图 5 的对比可以看出,随着网络规模的扩大,DD 的网络生命周期却在缩短,主要原因是泛洪方式的盲目扩散造成的能量消耗增大。与之相比,DQ-MSSS 的优势更加明显,更能适用于大规模网络。

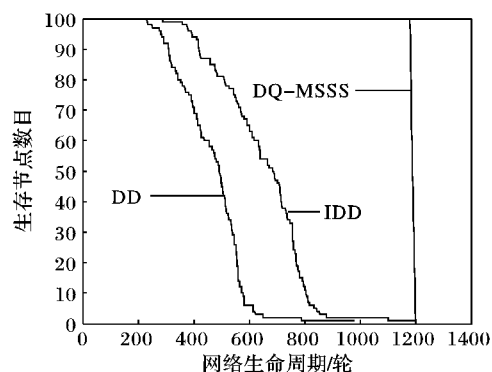


图5 $n = 100$ 时网络寿命对比

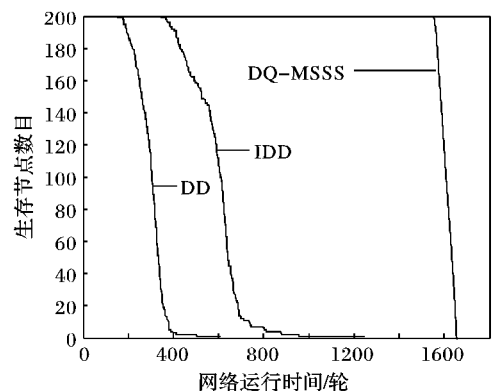


图6 $n = 200$ 时网络寿命对比

通过比较分析可以看出,与 DD、IDD 相比,DQ-MSSS 协议能有效减少网络中数据包的传输量,均衡网络中的能量消耗,提高能量利用率,有效延长网络生命周期。

4 结语

结合分簇路由算法、数据融合路由算法与无线传感器数据查询算法,提出了一种基于查询的无线传感器网络多源单汇路由算法 DQ-MSSS。利用分簇来解决定向扩散中平面泛洪进行兴趣扩散所带来的巨大能耗问题,省略梯度建立和路径加强阶段,源节点收到兴趣消息后直接进行数据传输。在数据传输的过程中选择邻居节点中优先级大的作为下一跳节点。使查询数据从源节点沿着能耗小、剩余能量多、距离短的路径向 Sink 节点传输,并在路径相交处进行数据融合。实验证明,DQ-MSSS 协议能有效地均衡网络中节点能耗,提高能量利用率,延长网络生命周期。

参考文献:

- [1] SINGHS K, SINGH M P, SINGH D K. Routing protocols in wireless sensor networks: A survey[J]. International Journal of Computer Science and Engineering Survey, 2010, 1(2): 63-83.
- [2] CHEOUR R, LAHMAR K, ABID M. Evolution of wireless sensor networks and necessity of power management technique[C]// Proceedings of the 2011 Faible Tension Faible Consommation. Piscataway: IEEE, 2011: 75-78.
- [3] BEN O J, YAHYA B. Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(8): 849-857.
- [4] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [5] 蒋畅江, 石为人, 王平. 能量均衡的无线传感器网非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.
- [6] CUI Y R, CAO J H. An improved directed diffusion for wireless sensor networks[C]// WiCom 2007: International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2007: 2380-2383.
- [7] CASEY K, NEELISETTI R, LIM A. RTDD: a real-time communication protocol for directed diffusion[C]// WCNC 2008: Proceedings of 2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 2852-2857.
- [8] LAI W K, LIN Y C, CHEN T H, et al. Load-balance directed diffusion in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2011 Fifth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. Piscataway: IEEE, 2011: 65-68.
- [9] HANDZISKI V, KOPKE A, KARL H. Improving the energy efficiency of directed diffusion using passive clustering[M]. Heidelberg: Springer, 2004.
- [10] DJENOURI D, BALASINGHAM I. Traffic - differentiation - based modular QoS localized routing for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(6): 797-809.
- [11] HENZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 493.
- [12] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.