

基于移动 Sink 的无线传感器网络任播路由协议

顾云丽^{1,2} 徐 昕¹ 侯荣涛¹ 杜 杰¹ 钱焕延² 梅 园¹

(南京信息工程大学 江苏省网络监控中心 南京 210044)¹

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)²

摘 要 传统基于移动 Sink 的无线传感器网络(WSN)路由协议,在 Sink 移动过程中需时时散播位置信息,能耗开销巨大。针对该问题提出一种基于预测路由机制的移动 Sink WSN 任播路由协议(ARPMS)。在 ARPMS 中,Sink 只在移动速度或方向发生改变时才需散播其移动信息,而传感器节点可以计算(预测)Sink 的当前和将来位置并选择能耗效率最高的 Sink 作为任播目标。Sink 由于无需时时散播其位置信息,因此节省大量能耗开销。仿真实验数据表明,相比于 ALURP 协议,ARPMS 在能耗效率上性能更佳(223%~462%)。

关键词 移动 Sink,无线传感器网络,任播,路由协议,预测机制

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Anycast Routing Protocol for Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks

GU Yun-li^{1,2} XU Xin¹ HOU Rong-tao¹ DU Jie¹ QIAN Huan-yan² MEI Yuan¹

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)¹

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

Abstract Traditional routing protocols for mobile sinks in wireless sensor networks, should broadcast repeatedly their current location information to all sensor nodes while sinks are moving, but this process consumes a large amount of energy. For the problem above, an anycast routing protocol for mobile sinks in wireless sensor networks (ARPMS) based on predictive strategy was proposed. In ARPMS, sinks spread their moving information only when sinks change their moving direction or speed, by those moving information, sensor nodes could calculate(predict) sinks' current and future location and select the sink with highest energy efficiency as the anycast objective. Because sinks don't spread their moving information at all times, ARPMS saves much energy cost. Simulation experiments results show that compared with ALURP protocol, the performance of ARPMS is better in term of energy efficiency (223%~462%).

Keywords Mobile sinks, Wireless sensor networks, Anycast, Routing protocol, Predictive strategy

1 引言

近来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中移动 Sink 技术受到众多学者的关注。传统静态 Sink 路由技术中,各传感器节点将监测数据分组多跳传输至 Sink,由于 Sink 周边的节点为各条路径的必经之地,因此最终出现“能量洞”现象(Sink 周围节点能量耗尽)。移动 Sink 技术的应用使节点可以轮流成为 Sink 的邻居节点,从而均衡能耗,提高网络生存期。而且,移动 Sink 技术的应用可以使所有传感器节点有机会以较短的路径汇报监测数据分组至 Sink。

Sink 在移动过程中,必须不断重复广播其当前位置(如全泛洪机制^[1]),这个过程能耗较大,容易导致节点能量迅速耗尽。为解决该问题,学者们给出众多办法以提高能耗效率。Yu^[2]通过在移动 Sink 和节点路径之间安排多个 Agent 来维护移动 Sink 的路由信息,提出一种反向传播机制的通讯方

式,以减少 Sink 时时散播位置信息的能耗开销。文献[3]提出一种两层架构的数据散播协议,该协议将网络划分为若干簇,当 Sink 移动时只需将新位置通知当前簇的簇首并由该簇首将位置信息分发给其他簇首,其将 Sink 位置信息只通知簇首,能节省大量能耗。文献[4]提出一种基于移动 Sink 的数据采集方案(DCSR),DCSR 根据节点分布确定一批采集点,用量子遗传算法求解出经过采集点的最短回路,从而以较少的能耗采集监测数据,但由于采集点的选择和最短回路计算是一个 NP 问题,DCSR 采用尽可能减少采集点数量的方法来减轻计算复杂度,该约束直接影响了其实用性。Kim^[5]采用移动 Agent 技术来减少散播 Sink 位置的能耗开销并改善三角路径问题(triangular routing problem)。Marta^[6]的主要策略是当发现周围节点能量低于阈值时改变 Sink 的位置。Luo^[7]将移动 Sink 可停靠的位置固定为有限数量,从而节省大量查询能耗,该策略可以有效解决“能量洞”现象,但 Sink 的移动性却大大受限。在移动多 Sink 网络中从生成树寻找

到稿日期:2013-03-03 返修日期:2013-06-04 本文受国家自然科学基金项目(61103142,61206138),江苏高校优势学科建设工程项目资助。

顾云丽(1978—),女,博士生,讲师,CCF 会员,主要研究方向为网络应用,E-mail: guyunlily@sina.com;钱焕延(1950—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络技术及应用。

最小维纳索引开销是一个 NP 难题, Han^[8] 提出一种分支和约束算法来解决小规模 WSN 路由问题, 又提出一种模拟退火算法解决大规模 WSN 路由问题。Rao^[9] 讨论分析 Sink 数据分组收集频率、节点密度、无线链路带宽和 Sink 的移动速度等各参数对基于移动 Sink 的多跳 WSN 路由性能的影响。Li^[10] 根据移动 Sink 的移动情况是否可以预测给出两种解决策略, 并通过 UDG (Unit Disk Graph) 模型证明其数据分组传递的可靠性。Wang 提出一种基于局部泛洪机制的路由协议 (ALURP^[11]), 当 Sink 在自适应区域 (adaptive local area) 内移动时, 其位置信息只需要在该区域内更新; 但一旦 Sink 移出该区域, 其位置信息仍需全网泛洪。因此, 在 ALURP 中, 如果 Sink 频繁移出自适应区域, 散播 Sink 位置信息的能耗仍很巨大。

关于移动时 Sink 需时时广播其位置信息导致能耗开销巨大的问题, 虽然上述文献在各个方面 (如只散播信息给簇首^[3], 固定停靠点^[4]) 做了相应的改进, 但大多仍需要 Sink 时时汇报其位置信息, 能耗巨大的情况仍然存在。针对该问题, 提出一种基于预测机制的路由技术 (ARPMS)。在 ARPMS 中, Sink 只在移动速度或方向发生改变的时候才需要散播其移动信息, 而传感器节点可以计算 Sink 的当前和将来位置, 并选择能耗效率最高的 Sink 作为任播目标。由于 Sink 无需时时散播位置信息, ARPMS 节省了大量消息开销, 因此具有较高的能耗效率。

2 预测任播路由策略

在大规模 WSN 中增加 Sink 数目并引入任播技术, 能够减少汇报路径距离并均衡系统能耗, 提高 WSN 生存期。任播是 IPv6 提供的一种新型网络服务, 指一个发送者与通信组中的任意一个之间的通信。本文标记: A 为某任播地址; $G(A)$ 为共享 A 的任播组员集合 (即移动 Sink 集合), 共有 M 个组员; A_i 为 $G(A)$ 中第 i 个组员; U 为传感器节点集合, 共有 N 个节点。在移动 Sink 中采用任播技术, 源节点可以从各个 Sink 中选择当前路径能耗效率最佳的 Sink 作为此次监测数据分组汇报的目标。

2.1 预测任播路由策略

本文设定各个 Sink 以直线方式移动; 当 Sink 需要改变它的运动方向或速度时, Sink 首先在当前通信范围内选择一个节点 (锚节点) 作为代表节点, 由其通知所有节点该 Sink 的移动信息, 然后改变方向 (速度); 当前锚节点还需优先汇报 Sink 的移动信息至上一任锚节点, 汇报路径的中间节点及其邻居节点需保存该 Sink 的移动信息。如图 1 中, S 为源节点, A_1, A_2, A_3 为移动 Sink, $C_1, C_2, \dots, C_7$ 等为相应 Sink 的锚节点。当 A_2 移动到 C_2 附近时, 由于改变运行方向, 选择 C_2 作为锚节点, 并由 C_2 散播 A_2 新的运行方向和速度; 当源节点 S 收到该信息后, 根据 A_2 的速度和方向可以计算出此时 A_2 的位置, 并选择此时离 A_2 最近的节点 (如 n_1) 作为目标节点, 由其与 A_2 通讯。在汇报监测数据分组过程中, 传递时延比预计时间要长, 监测数据分组到达 n_1 时, 由于 A_2 此时已超出 n_1 的通讯范围, 可在 n_1 处重新计算 A_2 的当前位置并重新定向; 如果是 Sink 突然改变移动轨迹造成监测数据分组到达 n_1 时, A_2 不在 n_1 的通讯范围内 (由于突然改变了移动轨迹, A_2

不曾经过 n_1 附近), 则 n_1 可以向 C_2 发出查询 A_2 的请求, 由于新一任锚节点 C_3 需向上一任锚节点 C_2 汇报 A_2 新的移动信息, 因此 n_1 仍然可以准确重定位 A_2 的位置。

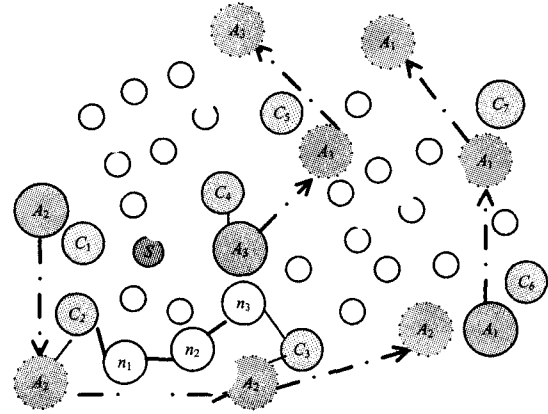


图1 预测路由示意图

2.2 汇报成功概率计算

设当前 Sink 坐标为 (x_1, y_1) , 设 Sink 的移动向量为 $\vec{v}$, 其中移动速度为 V , 角度为 α (本文采用地理位置路由协议, 可以查询各节点地理位置信息, 并指定 X 轴和 Y 轴)。本文设定 WSN 中各节点时间外部同步, 设当前时刻为 t_c , 则在时刻 t_u 移动 Sink 移动至坐标 (x_u, y_u) , (x_u, y_u) 的计算如下:

$$(x_u, y_u) = (x_1, y_1) + \vec{v} \times (t_u - t_c) \quad (1)$$

由于受实际地理环境的干扰, 移动 Sink 在方向上有一定概率与预订直线轨迹 (假定为 X 轴) 有角度偏差 θ 。如图 2 所示, 本文假设移动 Sink 在保持预定直线方向 (X 轴) 速度 V 的前提下, 实际与 X 轴有偏差角度 θ , θ 取值在区间 $(-\pi/4, \pi/4)$ 并服从标准正态分布, 因此 Sink 在 Y 轴方向速度 Γ 的取值区间为 $(-V, V)$ 。

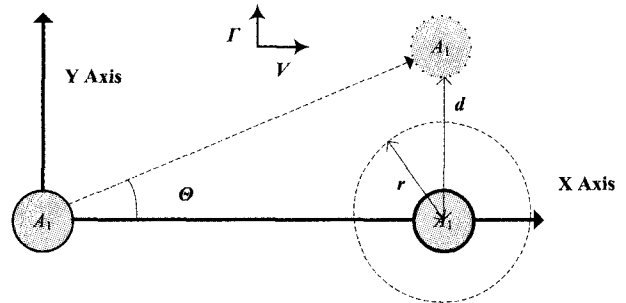


图2 汇报成功概率示意图

设当前时刻为 t_c , 则在时刻 t_u 经过 $\Delta t = t_u - t_c$ 时间后, Sink 应该移动至坐标 $W_1 = (V\Delta t, 0)$ 处, 但由于实际偏差角度为 θ , Δt 时间后 Sink 实际移动至坐标 $W_2 = (V\Delta t, z)$ 处, Sink 在 Y 轴上移动的数学距离 $z = g(\theta) = V\Delta t \tan \theta$, 其中 V 和 Δt 是已知的常数, θ 是一个随机变量, 在区间 $(-\pi/4, \pi/4)$ 服从标准正态分布, 即 $\theta \sim N(0, 1)$ 。由于在区间 $(-\pi/4, \pi/4)$ 上恒有 $g'(\theta) = V\Delta t \sec^2 \theta > 0$, 且有反函数

$$\theta = h(z) = \arctan(z/V\Delta t) \quad (2)$$

$h'(z)$ 求导如下:

$$h'(z) = \frac{V\Delta t}{(V\Delta t)^2 + z^2} \quad (3)$$

可解得 $z = g(\theta) = V\Delta t \tan \theta$ 的概率密度 $\Psi(z)$ 如下:

$$\Psi(z) =$$

$$\begin{cases} \frac{V\Delta t}{(V\Delta t)^2 + z^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\arctan(z/(V\Delta t)))^2}{2}}, & -V\Delta t \leq z \leq V\Delta t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

本文假设在预定位置 W_1 处存在节点 u , 源节点将监测数据分组传递给 u , 此时 u 与 Sink 的实际位置 W_2 距离为 z 。假设节点最大通讯距离为 r , 因此当 $|z| \leq r$ 时, 节点 u 可以成功将监测数据分组汇报至 Sink, 由此可得汇报成功概率 P 如下:

$$P = \int_{-r}^r \Psi(z) dz \quad (5)$$

2.3 数据结构

当 Sink 改变运动方向或速度时, 由其锚节点散播该 Sink 的移动信息; 各节点需要维护一张本地任播路由表, 当节点 S (坐标为 (x_0, y_0)) 收到锚节点散播的某 Sink 的移动信息时, 需将该信息保存到任播路由表中。任播路由表需保存该 Sink 的任播地址、单播地址、发布时 Sink 的坐标 (x_1, y_1) 、移动方向(角度 α)和速度 V 、当前移动轨迹的发布时间、当前锚节点 ID 和汇报成功概率 P , 其结构如图 3 所示。

Destination (Anycast)	Destination (Unicast)	Coordinate	Angle α	Speed V	Publish Time T_c	Anchor Node		Probability P
--------------------------	--------------------------	------------	----------------	-----------	-----------------------	----------------	-------	--------------------

图 3 任播路由表结构图

上一节讨论的 Δt 实际上还应包括监测数据分组传递至 Sink 的时延, 如下所示:

$$\Delta t = t_u - t_c + t_v \quad (6)$$

式中, t_v 为监测数据分组从源节点 S 到达 Sink 的时延。本文假设每一跳时延为 t_h , Sink 与 S 的物理距离为 D , 则 Sink 与 S 之间的跳数 $H \approx D/r$, 由此可得, S 至该 Sink 的时延 t_v 如下:

$$t_v \approx t_h D/r \quad (7)$$

标记 $\Delta x = x_1 - x_0$, $\Delta y = y_1 - y_0$ 。当数据分组从 S 出发至 Sink 时, Sink 仍然正在移动。 Δt 时间后, Sink 与 S 之间的距离 D 值计算如下:

$$D = \sqrt{(\Delta x + \Delta t V \sin \alpha)^2 + (\Delta y + \Delta t V \cos \alpha)^2} \quad (8)$$

结合式(6)~式(8), 可得

$$D = (-\chi + \sqrt{\chi^2 - 4\gamma\zeta})/2\gamma \quad (9)$$

其中,

$$\chi = -2\left(\frac{t_h(t_u - t_c)V^2}{r^2} + \frac{V t_h}{r}(\Delta x \sin \alpha + \Delta y \cos \alpha)\right) \quad (10)$$

$$\gamma = 1 - (V t_h/r)^2 \quad (11)$$

$$\zeta = -\frac{2(t_u - t_c)V}{r}(\Delta x \sin \alpha + \Delta y \cos \alpha) - \Delta x^2 - \Delta y^2 \quad (12)$$

由于

$$\chi^2 - 4\gamma\zeta = \left(\frac{2t_h(t_u - t_c)V^2}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{2t_h}{r}\right)^2 + \frac{8(t_u - t_c)\tau}{r} > 0 \quad (13)$$

因此, 式(9)有实数解。式(13)中

$$\tau = \Delta x V \sin \alpha + \Delta y V \cos \alpha \quad (14)$$

解得 D 值后, 根据式(6)、式(7), 可解出 Δt , 代入式(5), 可解出以该 Sink 作为任播目标汇报成功的概率 P , 并写入 S 的任播路由表中。

2.4 任播路由选择

本文采用任播路由机制, 即源节点选择能耗效率最高的

Sink 作为目标汇报监测情况。传统算法简单以距离最近的 Sink 作为目标, 但较早发布其移动信息(即 $t_u - t_c$ 值较大)的 Sink 由于较长时间没有更新其移动信息, 偏离预定轨迹的方差较大, 以其为目标汇报的失败概率也较大(根据式 5), 从而增加重传能耗, 能耗效率未必很好。因此, 本文定义能耗率 Q 的计算如下:

$$Q = E/P \quad (15)$$

式中, E 是传输监测数据分组的能耗, 包括发送能耗及所带来的接收能耗; P 是汇报成功率。显然, 能耗率 Q 值越小, 其能耗效率越佳。

记 $\{E_T \times k\}$ 为发送 k 比特数据的能耗, 记 $\{E_R \times k\}$ 为接收 k 比特数据的能耗。 $\{E_T \times k\}$ 和 $\{E_R \times k\}$ 的计算分别如式(16)和式(17)所示:

$$\{E_T \times k\} = E_{amp} \times r^n \times k + E_{elec} \times r \quad (16)$$

$$\{E_R \times k\} = E_{elec} \times k \quad (17)$$

其中, 式(16)中的 n 为衰减指数, 设定 $n=2$; 设定发送时一律以通讯距离为 r 的功率进行通讯。

设 WSN 节点密度为 ρ , 由于无线传播采用广播发送机制, 发送时通讯范围内的节点都将收到源节点的数据分组, 因此每一跳实际接收能耗为 $(\rho \pi r^2 - 1)\{E_R \times k\}$ 。设源节点 S 根据式(9)计算出其距离 A_i 为 D_i , 则跳数 $H_i \approx D_i/r$, 发送 k 比特至 A_i 的能耗 E_i 计算如下:

$$E_i = H_i \{E_T \times k\} + H_i \{E_R \times k\} (\rho \pi r^2 - 1) \quad (18)$$

根据式(15), 源节点可以计算出该节点至每个 Sink 的能耗率 Q , 选择 Q 值最小的 Sink 作为此次汇报的目标。

3 实验与分析

以下我们以 ALURP^[11] 作为对照协议, 在不同 Sink 速度和不同网络规模下观察 ALURP 和 ARPMS 的表现。

仿真模拟一个具有 N 个(800~1200)节点的网络, 节点随机分布在 $500 \times 500\text{m}$ 矩形区域里。网络设置如下: 节点传输半径 $r=30\text{m}$; 指定 Sink(任播组员), 设置组员数目 $M=4$, Sink 具有无限能量, 移动速度 V 为 $5 \sim 25\text{m/s}$, 每隔 10s 改变一次方向, Sink 偏离预定轨迹的角度 θ 在区间 $(-\pi/4, \pi/4)$ 服从标准正态分布; 设置 $E_{amp} = 100\text{pJ/bit/m}^2$, $E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$; N 个传感器节点都以参数 $\lambda=0.001$ 的泊松分布汇报监测事件至任一 Sink, 监测数据分组大小为 1KB 。设置 ALURP 的自适应区域半径为 40m 。

设置 Sink 移动速度 $V=15\text{m/s}$, 不改变区域面积, 不断调节节点数目(800~1200), 运行 100s, 实验观察各协议数据分组到达率(Packet Delivery Fraction, PDF)和能耗率(Q 值), 结果分别如图 4 和图 5 所示。

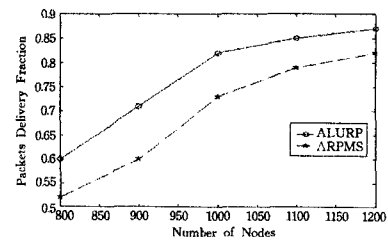


图 4 节点数目和数据分组到达率

ALURP 和 ARPMS 在散播 Sink 位置信息以及源节点汇

(下转第 191 页)

[17] Parakh A. Oblivious Transfer Using Elliptic Curves [J]. Cryptologia, 2007, 31(2): 125-132

[18] Choi S G, Hwang K-W, Katz J. Secure Multi-Party Computation of Boolean Circuits with Applications to Privacy in On-Line Marketplaces[C]// Topics in Cryptology-CT-RSA 2012, LNCS 7178, San Francisco, CA, USA, 2012; 416-432

[19] 王凤和, 胡予濮, 刘振华. 格基不经意传输协议[J]. 通信学报, 2011, 32(2): 125-130

(上接第 168 页)

报监测数据分组至 Sink 的过程中都采用多跳转发机制, 因此由图 4 可看出, 随着节点数增加, 即节点密度 ρ 增加 (0.0032 ~ 0.0048), 各协议 PDF 都相应增加。但 ARPMS 采用预测路由机制, Sink 在移动过程中可能会偏离预定轨道, 从而导致汇报数据即便成功到达预定位置仍有概率失效, 而且 ARPMS 采用任播机制, 选择 Sink 的判据为能耗效率最高而不是汇报成功率最高, 从而也影响了 PDF 的表现。

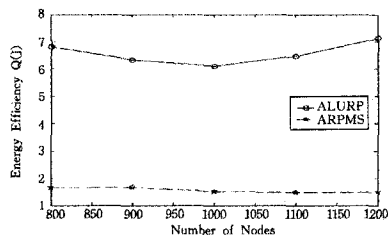


图 5 节点数目和能耗率 Q

由图 5 可知, 尽管 ALURP 的 PDF 优于 ARPMS, 但其能耗效率却很低 (Q 值较高)。这是由于 ALURP 中的 Sink 只要越过其自适应区域 (半径为 40m), 就要时时全网泛洪通知所有节点, 此时能耗 E 值很高, 从而连累 Q 值的表现。

设置节点数目为 1200, 不断调节 Sink 移动速度 V (5 ~ 25m/s), 运行 100s, 实验观察各协议 PDF 和 Q 值, 结果分别如图 6 和图 7 所示。

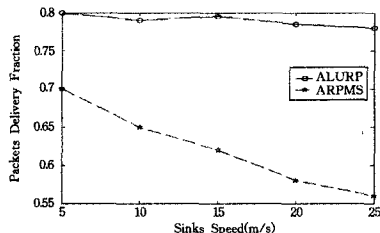


图 6 Sink 速度和数据分组到达率

由图 6 可知, ALURP 的 PDF 表现受 Sink 速度影响很小, 而 ARPMS 采用预测路由机制, 随着 Sink 速度的提高, Δt 时间后 Sink 偏离预定位置的距离 D 值方差增大, 汇报有较大概率失效, 从而影响 PDF 值, 而且 ARPMS 采用的基于能耗效率的任播机制也影响了 PDF 的表现。

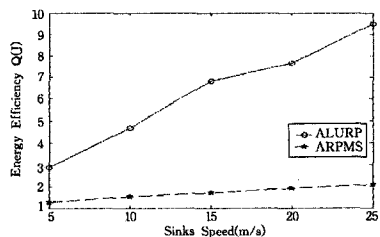


图 7 Sink 速度和能耗率 Q

由图 7 可知, 尽管 ALURP 的 PDF 优于 ARPMS, 但随着 Sink 速度的提高, Sink 的活动范围增大, 超出其自适应区域

的概率增加, 全网泛洪能耗增加很快, 从而导致能耗效率表现较差 (Q 值较大)。而 ARPMS 只在 Sink 改变方向时散播 Sink 位置信息, 与 Sink 移动速度无关, 能耗受 Sink 速度影响较小, 因此具有相对较好的能耗效率 (Q 值较小)。

结束语 提出一种基于预测路由机制的移动 Sink WSN 任播路由协议 (ARPMS)。在 ARPMS 中, Sink 只在移动速度或方向发生改变的时候才需散播其移动信息, 通过 Sink 散播的移动信息, 传感器节点可以计算 (预测) Sink 的当前和将来位置。由于 Sink 无需时时散播位置信息, 从而节省了大量能耗开销。尽管相比传统路由协议 (如经过改进的采用局部泛洪机制的 ALURP 协议), ARPMS 监测数据分组到达率有所下降, 但由于巨大的能耗节省, 其仍然比 ALURP 具有更好的能耗效率 (223% ~ 462%)。

参考文献

- [1] Shah D, Shakkottai S. Oblivious routing with mobile fusion centers over a sensor network[C]//Proceedings of 26th IEEE INFOCOM, 2007; 1541-1549
- [2] Yu J, Jeong E, Jeon G, et al. A dynamic multiagent-based local update strategy for mobile sinks in wireless sensor networks [J]. Proceedings of 11th international conference on computational science and its applications, 2011; 6785(4): 185-196
- [3] 钟智, 罗大庸, 刘少强, 等. 具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡簇路由协议[J]. 控制与决策, 2012, 27(8): 1211-1220
- [4] 郭剑, 孙力娟, 许文君, 等. 基于移动 sink 的无线传感器网络数据采集方案[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 176-184
- [5] Kim, J W, In J S, Hur K, et al. An intelligent agent-based routing structure for mobile sinks in WSNs[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2310-2316
- [6] Marta M, Cardei M. Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2009, 5(5): 542-555
- [7] Luo J, Hubaux J P. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 871-884
- [8] Han S W, Jeong I S, Kang S H. Low latency and energy efficient routing tree for wireless sensor networks with multiple mobile sinks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(1): 156-166
- [9] Rao J, Biswas S. Analyzing multi-hop routing feasibility for sensor data harvesting using mobile sinks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2012, 72(6): 764-777
- [10] Li X, Yang J L, Nayak A, et al. Localized geographic routing to a mobile sink with guaranteed delivery in sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(9): 1719-1729
- [11] Wang G, Wang T, Jia W, et al. Adaptive location updates for mobile sinks in wireless sensor networks[J]. J Supercomput, 2009, 47(2): 127-145