

无线传感器网络中基于空间相关性的移动代理路由算法 *

胡海峰, 杨 震

(南京邮电大学通信与信息工程学院宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏南京 210003)

摘 要: 资源受限的传感器节点密集分布在无线传感器网络监控区域, sink 节点通过收集节点间观测信息对监控区域内发生的事件进行感知. 本文提出 SCMAR (Spatial Correlation-based Mobile Agent Routing) 路由算法, 在移动代理架构内, 利用节点观测数据的空间相关性以能量有效的方式对感知事件进行估计. 仿真结果表明 SCMAR 在各种应用环境下能量有效性均优于 MARDF (Mobile Agent Routes for Data Fusion) 路由算法.

关键词: 无线传感器网络; 移动代理; 空间相关性; 路由算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2397-05

Spatial Correlation-Based Mobile Agent Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

HU Hai-feng, YANG Zhen

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education, College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Wireless Sensor Networks (WSN) are mainly characterized by dense deployment of resource-constrained sensor nodes which collectively transmit information about sensed events to the sink. In this paper, a Spatial Correlation-based Mobile Agent Routing (SCMAR) algorithm is proposed to exploit the spatial correlation between the sensed data to estimate the event with energy efficient way using the mobile agent paradigm. The simulation results show that SCMAR achieves better performance than existing Mobile Agent Routes for Data Fusion (MARDF) routing algorithm from perspectives of energy consumption in a variety of correlated data gathering applications.

Key words: wireless sensor networks (WSN); mobile agent; spatial correlation; routing

1 引言

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 是由大量的随机分布在某一地理区域传感器节点 (以下简称节点) 组成, 节点通常使用电池供电. WSN 监控区域内各节点对某一事件 (如跟踪的目标、物理量异常的特定区域) 进行测量, 由于节点拓扑结构的高密度, 节点的观测数据之间存在高度的空间相关特性.

WSN 中节点观测数据的空间相关性问题, 已有一些文献进行了研究, 文献[1]对 WSN 节点观测数据的时空相关性进行建模, 并且在此基础上讨论了设计高效率、可靠通信协议的方法. 文献[2]对 WSN 中各种应用和相关度条件下的空间相关性进行数学建模, 并在已有算法的基础上验证了该模型的有效性. 文献[3]提出一种在分簇路由协议支持下的时间、空间多维度的数据压

缩算法, 以减少整个无线传感器网络中数据发送量. 文献[4]提出一种能量有效的分簇算法 (CAG), 根据用户查询误差门限和节点数据的空间相关性进行分簇, 以减少数据传输开销并满足应用精度要求. 文献[5]提出 CC-MAC 协议, 根据空间相关性确定相关区域的半径, MAC 协议控制相关区域内竞争信道成功的节点成为代理节点, 进行数据发送, 并通过优先级设定保证代理节点数据报的多跳传递.

上述文献中所提的通信协议都是通过增加控制和通信开销, 以减少节点以无线多跳方式发送到信息汇聚点 (如 sink 节点) 的相关性观测数据, 这种数据处理模式称为 C/S (客户端/服务器) 架构, 文献[6]提出了基于移动代理 MA (Mobile Agent) 协同信号和信息处理模式, 即处理中心派遣出 MA, 通过 MA 的迁移, 搜集并融合相关节点数据, 最后携带处理结果返回处理中心. 文献[7]

提出了在 WSN 中, MA 的路由(访问节点的顺序)直接影响了融合数据的质量和通信开销, 并采用遗传算法来计算路由优化的近似解. 文献[8]讨论了 WSN 中基于 MA 的应用、体系结构、中间件设计和多代理协同等问题, 并验证了 MA 能量有效性和事件感知的自适应性. 文献[9]提出了在 WSN 中优化的 MA 路由技术, 使用启发式算法以减少 MA 收集数据的路由开销, 同时保持 MA 较低的计算复杂度.

如何在 MA 的工作模式下, 研究基于空间相关性数据收集的能量有效的路由算法成为有待研究的重要课题, 从目前来看, 还没有相关论文对此进行研究, 因此本文提出一种新的基于空间相关性的移动代理路由算法 SCMAR(Spatial Correlation-based Mobile Agent Routing), 根据 WSN 的空间相关性, 确定事件区域范围, 选择合适的代理节点集合, 计算出能量有效的迁移路由, 让 MA 迁移并搜集代理节点的观测数据, 以能量有效的方式, 对 WSN 中发生的事件进行估计, 并满足应用的失真度要求.

本文的具体安排如下: 第2节讨论了事件驱动的空间相关性模型, 并在此基础上确定了事件区域的范围; 第3节具体描述 SCMAR 的算法思想和基本模块; 第4节用仿真的方法对 SCMAR 的性能进行了分析; 最后给出了全文的总结.

2 事件驱动的空间相关性模型

WSN 监控区域内的事件源 S 会触发节点 $n_i (i = 1, \dots, N)$ 获得感知数据 $S_i (i = 1, \dots, N)$, 其中 N 为 WSN 中总的节点数, 感知数据 $S_i (i = 1, \dots, N)$ 之间符合扩散模型^[2], 并形成以事件源 S 为中心的事件区域 EA (Event Area), 由于 WSN 节点密集分布在监控区域, S_i 之间以及 S_i 和 S 之间存在不同程度的空间相关性.

假设事件源 S 所在位置 $(0,0)$ 有一虚拟节点 $n_{(0,0)}$, 其感知数据为 $S_{(0,0)}$, 事件源 S 触发的事件区域边界节点 $n_{(r,\theta)}$ 的感知数据 $S_{(r,\theta)}$ 满足 $|S_{(r,\theta)} - S_{(0,0)}| \leq \mu$, 其中 μ 是误差门限, 反应了不同位置的感知数据和事件源之间的差异, r 是事件区域 EA 的半径. 根据文献[2]的数学模型变差函数为

$$\begin{aligned} \gamma(r) &= \frac{1}{2} E[(S_{(r,\theta)} - S_{(0,0)})^2] \\ &= \frac{1}{2} \sigma_z^2 \operatorname{erf}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \mu \sigma_z e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma_z^2}} = \Psi(\sigma_z, \mu) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Psi(\sigma_z, \mu)$ 是 σ_z, μ 的函数, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$. 通常 $\gamma(r)$ 有多种估计模型, 根据文献[2]选取 $\gamma(r) = c(1 - e^{-\lambda r^2})$, 其中参数 c 影响数据相关性的强弱, λ 反映了

数据相关性随距离变化的快慢. 参数 c 和 λ 取决于监控区域数据场空间相关特性. 于是可得

$$c(1 - e^{-\lambda r^2}) = \Psi(\sigma_z, \mu) \Rightarrow r = \left[\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{c}{c - \Psi(\sigma_z, \mu)}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

在各向同性统计过程中, 根据节点历史数据统计规律, 公式(2)可以计算出不同误差门限 μ 条件下的事件区域 EA 的半径 r , 确定了事件区域 EA 的分布范围, 从而 sink 节点派遣出移动代理 MA 只需搜集 EA 中节点的观测数据, 减少了 MA 处理数据的能量开销和执行时间.

3 基于空间相关性的移动代理路由算法

在事件区域 EA 中节点 $n_i (i = 1, \dots, L)$ 对事件的观测数据 X_i 为

$$X_i = S_i + N_i \quad (i = 1, \dots, L) \quad (3)$$

其中, 观测噪声 N_i 为独立同分布的高斯随机变量 $N(0, \sigma_N^2)$, L 为分布在事件区域 EA 内节点的个数, 设感知数据 S_i 为联合高斯随机变量(JGRVs), 且满足

$$\begin{aligned} E[S_i] &= 0, \operatorname{var}[S_i] = \sigma_S^2, \rho_{(i,j)} \\ &= \frac{\operatorname{Cov}(S_i, S_j)}{\sigma_S \sigma_S} = \frac{E[S_i S_j]}{\sigma_S^2} \quad (i, j = 1, \dots, L) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\rho_{(i,j)}$ 为 S_i, S_j 的相关系数, $\operatorname{Cov}(S_i, S_j)$ 为 S_i, S_j 的协方差.

sink 节点派遣移动代理 MA 搜集 EA 中节点的观测数据 $X_i (i = 1, \dots, M; M < L < N)$, 其中 M 是 EA 中 MA 实际迁移的节点个数, 并且对 X_i 进行平均以得到数据源 S 的估测值 $\hat{S}(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i$, 失真度 $D_E(M)$ 用来衡量估测值的偏离程度, $D_E(M)$ 定义为

$$D_E(M) = E[(S - \hat{S}(M))^2] \quad (5)$$

式(3)、(4)代入式(5), 失真度可以表达为

$$\begin{aligned} D_E(M) &= \sigma_S^2 + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M (\sigma_S^2 + \sigma_N^2) - \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_S^2 \rho_{(s,i)} \\ &\quad + \frac{2}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^M \sigma_S^2 \rho_{(i,j)} \end{aligned} \quad (6)$$

根据文献[2], 相关系数 $\rho_{(i,j)} = \frac{c}{\sigma_S^2} e^{-\lambda r_{(i,j)}^2}$, $r_{(i,j)}$ 为节点 n_i, n_j 之间的距离, 代入公式(6), 可得

$$\begin{aligned} D_E(M) &= \sigma_S^2 + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M (\sigma_S^2 + \sigma_N^2) - \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M c e^{-\lambda r_{(s,i)}^2} \\ &\quad + \frac{2}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^M c e^{-\lambda r_{(i,j)}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 失真度的大小和 M 有关, 增加 MA 迁移的节点数目 M 可以减少失真度, 在相同节点数量 M 的情况下, 事件区域 EA 中节点 $n_i (i = 1, \dots, L)$ 和数据源 S 的距离 $r_{(s,i)}$ 越小, 失真度越小; EA 中节点 n_i, n_j 之

间的距离 $r_{(i,j)}$ 越大,失真度越小.

本文提出 SCMAR(Spatial Correlation-based Mobile Agent Routing)路由算法,利用动态规划思想,在满足 $D_E(M) \leq D_E$ 情况下,确定需要迁移的代理节点, D_E 为失真度门限值,使得移动代理 MA 迁移的节点数量 M 最小,并且使用插入算法^[10]选择能量有效的 MA 迁移路径. SCMAR 包括两个模块 1)选择代理节点模块 SCMAR-A;2)选择能量有效迁移路径模块 SCMAR-P.

step1: SCMAR-A (选择代理节点模块)代码如下:

失真度函数:

$$f(\mathbf{z}) = \begin{cases} 2\sigma_S^2 + \sigma_N^2 - 2ce^{-\lambda r_{(s,1)}^2}, \|\mathbf{z}\| = 1 \\ \sigma_S^2 + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M (\sigma_S^2 + \sigma_N^2) - \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M ce^{-\lambda r_{(s,i)}^2} \\ + \frac{2}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^M ce^{-\lambda r_{(i,j)}^2}, \|\mathbf{z}\| \neq 1 \end{cases}$$

$\mathbf{z}_i^{(j)}: n_i (i=1, \dots, L)$ 最优节点集合, 其中 $n_i \in \mathbf{z}_i^{(j)}$, $j = \|\mathbf{z}_i^{(j)}\|, \forall n_l, n_m \in \mathbf{z}_i^{(j)}, n_l \neq n_m$

$$\mathbf{z}_1^{(0)} = \mathbf{z}_2^{(0)} = \dots = \mathbf{z}_L^{(0)} = \phi$$

for $j = 1$ to L do

$$\Phi \leftarrow \phi$$

for $i = 1$ to L do

$$\Gamma \leftarrow \phi$$

if $n_i \notin \mathbf{z}_k^{(j-1)}; k = 1$ to L

$$\hat{\mathbf{z}}_k^{(j)} \leftarrow \{n_i\} \cup \mathbf{z}_k^{(j-1)}, \Gamma \leftarrow \Gamma \cup \{\hat{\mathbf{z}}_k^{(j)}\}$$

end

select $\mathbf{z}_i^{(j)} \in \Gamma, f(\mathbf{z}_i^{(j)}) = \min\{f(\Omega): \Omega \in \Gamma\}$

$$\Phi \leftarrow \Phi \cup \{\mathbf{z}_i^{(j)}\}$$

end

select $\mathbf{z}^{(j)} \in \Phi, f(\mathbf{z}^{(j)}) = \min\{f(\Omega): \Omega \in \Phi\}$

if $f(\mathbf{z}^{(j)}) \leq D_E$

$$\text{return}(\mathbf{z}^{(j)})$$

end

end

算法复杂度为 $O(\frac{L^3 - L^2 + 2L}{2})$, 根据公式(2)可以

确定 EA 范围的大小, EA 中节点的数量 L 一般满足: $L = N, N$ 为 WSN 中总的节点数.

step2: SCMAR-P (选择能量有效迁移路径模块)代码如下:

$t(e_{ij})$: 从节点 n_i 到节点 n_j 的单位数据传输能量

$d_{ij} = w_{MA} t(e_{ij})$: 节点 n_i 到节点 n_j 的能量消耗, w_{MA}

为移动代理 MA 的大小

$g(l)$: 序号为 y 的节点插入 l 边对应的两顶点之间时, MA 迁移路径总的能量增加量

$d_{ss} = 0; G \leftarrow (s, s), K \leftarrow \{n_s n_s\}, \text{sum_} w = 0; n_s$ 为 MA 进入事件区域的接入节点

for $u = 1$ to M do $d(u) = d_{ss}$ end;

for $k = 1$ to M do

选择 y , 使得 $d(y) = \max\{d(u): u = 1, \dots, M\}$;

for $l \in K$ do $g(l) = \text{in_weight}(l, K, y)$ end;

选择边 $f \in K$, 使得 $g(f) = \min\{g(l): l \in K\}$;

设 $f = e_{uv}; y$ 插入到 G 中 u, v 之间;

$K \leftarrow (K \setminus \{f\}) \cup \{n_u n_v, n_y n_v\}, \text{sum_} w = \text{sum_} w + g(f);$

re_assign(f, K, y); $d(y) \leftarrow 0$;

for $x \in \{1, \dots, M\} \setminus G$ do $d(x) = \min\{d(x), d_{yx}\}$;

end

算法结束时, K 中路径的顺序代表 MA 迁移的路由, SCMAR-P 计算复杂度为 $O(M^3)$, m 为代理节点数量, 满足 $M < L < N$.

4 实验仿真

在仿真过程中, 本文从能量开销的角度, 和 MARDF (Mobile Agent Routes for Data Fusion) 路由算法进行了对比, MARDF 是文献[7]中 MA 路由算法的基本模式, 该算法的主要缺点是没有考虑节点观测数据间的空间相关性, 在不同的应用失真度情况下, MA 都会遍历整个事件区域, 增加了不必要的能量开销.

本文用 NS2 仿真工具模拟 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 的监控区域, 节点随机均匀分布在监控区域内, 每个节点存储了本地测量数据 400Byte. MA 由节点 sink 派遣, MA 按照预定的路由迁移节点后返回 sink 节点, sink 节点的位置在仿真环境中固定于测量区域的中上方, MA 的大小设为 2kByte, 单位数据量的传输能量消耗为: $c(e_{x_k x_{k+1}}) = \beta d^\gamma + \epsilon$, 其中 $\gamma = 2, \beta = 100\text{pJ/bit/m}^2, \epsilon = 100\text{nJ/bit}, d$ 为节点间传输距离.

(a) 相关度参数变化时, SCMAR 和 MARDF 算法在能量开销方面的比较

在仿真过程中, $50\text{m} \times 50\text{m}$ 的监控区域随机放置 80 个节点, 误差门限值设为 1, 进行如下仿真, (1) $\lambda = 1/400$ 时, 影响相关性强弱的参数 c 分别设为 5、10、15, 比较两种算法在不同失真度条件下的能量开销; (2) $c = 5$ 时, 反映数据相关性随距离变化快慢的参数 λ 分别设为 $1/400, 1/200, 1/150$, 比较两种算法在不同失真度条件下的能量开销.

从图 1(a) 可知, 随着 c 增大, 数据相关性减弱, 事件区域半径变小, 所以两种算法的能量消耗都随着 c 增加而减少. 在相同 c 的情况下, 因为 MARDF 算法都需要 MA 遍历整个事件区域内的节点, 所以能量消耗不随失真度变化, 在图中表现为一直线. 当应用所需的失真度小于事件区域的最小失真度, SCMAR 选择整个事件区域 EA 的节点作为代理节点, 两种算法的能量开销相

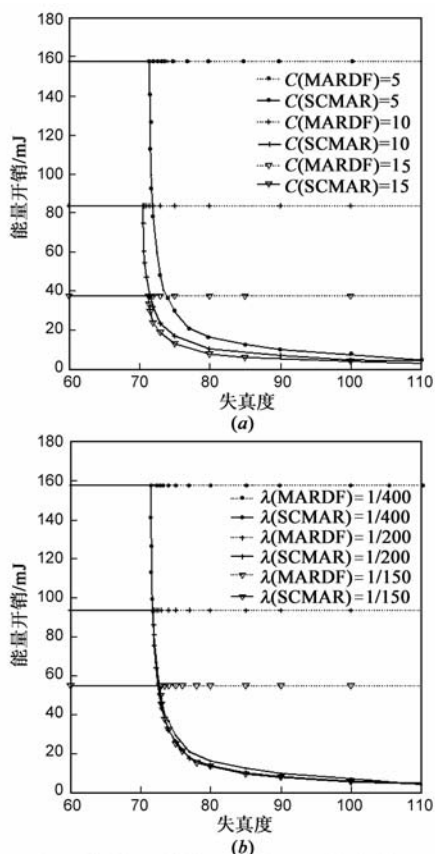


图1 算法能量消耗对比图(不同的参数 c 、 λ)

同;当应用所需的失真度大于最小失真度时,SCMAR 只需要选择合适的代理节点,MA 需要迁移的代理节点数量迅速减少,SCMAR 能量开销迅速下降,两种算法能量开销的差距迅速增加。

从图 1(b)可知,随着 λ 增大,数据相关性减弱,事件区域半径变小,所以图 1(b)和图 1(a)从整体上看是非常相似的,差别在于 λ 对能量开销的影响没有参数 c 明显,当失真度大于最小失真度时,不同 λ 的 SCMAR 算法的能量开销差别不大。

(b)节点密度变化时,SCMAR 和 MARDF 算法在能量开销方面的比较

在仿真过程中,50m×50m 的监控区域随机放置了 40、60、80 个节点,误差门限值为 1,参数设为: $\lambda = 1/200$, $c = 5$ 。比较两种算法在不同失真度条件下的能量开销。

由图 2 可知,MARDF 算法都需要 MA 遍历整个事件区域内的节点,所以能量消耗不随失真度变化,在图中表现为一直线。从代理节点和失真度的反比关系可知,SCMAR 的能量开销随着失真度的增加而迅速减少。并且 SCMAR 在失真度大于事件区域最小失真度的情况下,节点密度越大,越能选择到更合适的代理节点集合,所以相同失真度的情况下,代理节点的数量越小,

能量消耗越小。但是节点密度的影响对 MARDF 正好相反,节点密度增加直接导致移动代理迁移节点数量增加,能量开销明显增加。

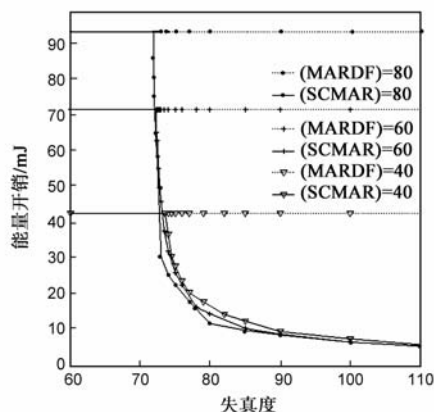


图2 算法能量消耗对比图(不同的节点密度)

5 结束语

本文提出了一种新的 SCMAR (Spatial Correlation-based Mobile Agent Routing) 路由算法,根据 WSN 的空间相关性,确定事件区域 EA 范围,选择合适的代理节点集合,计算出能量有效的迁移路由,让 MA 迁移并搜集代理节点的观测数据,对 WSN 中发生的事件进行估计,满足应用的失真度要求和 WSN 资源受限的客观需要。仿真表明 SCMAR 算法能很好的应用于 WSN 的空间相关性数据收集,并且在不同的空间相关度应用场景、不同的应用失真度和不同的节点密度情况下,都能以能量有效的方式满足应用对事件估计精确度的要求。

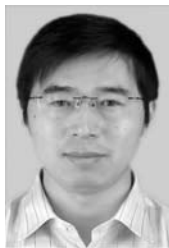
参考文献

- [1] M C Vuran, O B Akan, I F Akyildiz. Spatio-temporal Correlation: Theory and Applications for Wireless Sensor Networks [J]. Computer Networks Journal (Elsevier), June 2004, 45(3): 245–261.
- [2] A Jindal, K Psounis. Modeling Spatially Correlated Data in Sensor Networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, November 2006. 2(4): 466–499.
- [3] 尹震宇, 赵海. WSN 中基于分簇路由的多维度数据压缩算法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1109–1114.
- [4] S Yoon, C Shahabi. Exploiting Spatial Correlation Towards an Energy Efficient Clustered Aggregation Technique(CAG)[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2005[C], May 2005. 82–98.
- [5] M C Vuran, I F Akyildiz. Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, April 2006, 14(2): 316–329.
- [6] H R Qi, Y Y Xu, Wang X L. Mobile-agent-based collaborative

signal and information processing in sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE[C], 2003. 1172 – 1183.

- [7] Q Wu, N S V Rao, J Barhen, et al. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16 (6): 740 – 753.
- [8] M Chen, S Gonzalez, V C M Leung. Applications and design issues for mobile agents in wireless sensor networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(6): 20 – 26.
- [9] K Charalampos, M Aristides, G Damianos, P Grammati. Effective Determination of Mobile Agent Itineraries for Data Aggregation on Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(12): 1679 – 1693.
- [10] D Jungnickel. Graphs, Networks, and Algorithms[M]. Germany: Springer, 2004. 453 – 455.

作者简介



胡海峰 男, 1973 年出生于安徽六安, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为无线传感器网络中分布式信号处理. E-mail: hu hf@njupt.edu.cn



杨 震 男, 1961 年生于江苏苏州, 南京邮电大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代通信中的语音信号处理和通信信号处理. E-mail: yangz@njupt.edu.cn