

文章编号: 2095-4980(2021)02-0224-05

WSNs 中优化移动信宿路径的数据收集算法

吕虹

(贵州广播电视大学(贵州职业技术学院) 信息工程学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 收集数据是部署无线传感网络(WSNs)的根本目的。采用移动信宿策略可有效缓解WSNs的能耗问题, 信宿的移动路径是该策略的关键。为此, 提出基于伪驻留点的数据收集(VRDC)算法。VRDC算法先依据驻留点规划信宿路径, 再依据路径选择伪驻留点(VRPs)。VRPs可通过一跳直接向移动信宿传输数据, 而其他的节点则将数据传输至最近的VRPs, 进而减少传输跳数, 降低能耗。仿真结果表明, 提出的VRDC算法能有效降低能耗, 并平衡节点间的能耗。

关键词: 无线传感网络; 数据收集; 路径规划; 伪驻留点; 能耗

中图分类号: TN926; TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019493

Data collection algorithm for optimizing mobile accommodation path in WSNs

LYU Hong

(Electronic and Computer Engineering, Guizhou Radio & TV University, Guiyang Guizhou 550001, China)

Abstract: Data collection is the fundamental purpose of deploying Wireless Sensor Networks(WSNs). The adoption of mobile accommodation strategy can effectively alleviate the problem of energy consumption of WSNs. The mobile path is the key of the strategy. Therefore, Virtual Rendezvous points-based Data Collecting(VRDC) algorithm is proposed in this paper. The VRDC algorithm first plans lodging paths based on the host Points, and then selects Virtual Rendezvous Points(VRPs) based on the host Points. VRPs can transmit data directly to the mobile address via one hop, while other nodes can transmit data to the nearest VRPs, thereby reducing the number of transmission hops and energy consumption. Simulation results show that VRDC algorithm can effectively reduce energy consumption and balance energy consumption among nodes.

Keywords: Wireless Sensor Networks; data collection; path planning; Virtual Rendezvous Points; energy consumption

无线传感网络(WSNs)^[1]已在多个应用范围内使用, 如军事监测、环境勘察、智慧农业、智能家居、康复医疗等。每个节点具有感测、处理数据的能力, 并以多跳方式将所感测的数据传输至信宿^[2]。在多跳通信中, 由于靠近信宿的节点承担了更多的数据转发任务, 它们的能量消耗速度更快^[3-4], 容易形成能量空洞。一旦出现能量空洞, 网络就被分割。因此, 平衡节点间的能耗是避免能量空洞的关键。

通过信宿的移动能有效平衡网络能耗^[5-6], 而规划信宿的移动路径是该策略的关键。最简单的方法就是遍历每个节点, 进而直接接收感测数据^[7]。但该方法并没有解决巡回售货员问题(Traveling Salesman Problem, TSP)^[8]。TSP问题就是如何以最短的路径遍历所有节点。然而, 随着网络规模的增加, 节点数剧增, 得到最短的路径是一项不小的挑战; 同时, 遍历网络内每个节点是非常耗时的。为减少遍历时间, 移动信宿(Mobile Sink, MS)只遍历网络内部分点, 这些点称为驻留点(Rendezvous Points, RPs)^[8-11]。移动信宿沿着RP移动, 并在每个RP位置收集数据。文献[9-10]提出伪驻留点(VRPs)概念, VRPs是指位于RPs附近的节点, 这些VRPs通过一跳直接将数据传输至MS, 而剩下的节点将数据传输至最近的VRP。通过减少通信跳数, 降低数据包丢失率, 构建最优的VRPs, 能够提高能量效率。但如何依据RPs集规划路径, 并构建最优的VRPs仍是一项挑战。而三维WSNs又加大了这项工作的难度。

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-01-13

基金项目: 贵州省高等学校人文社会科学研究基地资助项目(2018jd113)

作者简介: 吕虹(1986-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无线传感网络、数据收集, 路由、算法设计分析, 信息处理等。email:ghsg_kl8@sina.com

文献[11-12]研究了三维 WSNs 的 MS 路径规划问题,但这些算法的复杂度较高。文献[10]提出一个低复杂度的路径规划策略,但其移动路径长,增加了网络时延。为此,针对三维 WSNs,提出基于 VRPs 的数据收集算法 (VRDC)。VRDC 算法利用 RPs 集产生最优路径,并在 RPs 附近产生 VRPs。MS 沿着所规划的路径移动,再从这些 VRPs 位置收集数据。仿真结果表明,提出的 VRDC 算法有效减少了能耗,提高了网络寿命。

1 系统模型

1.1 约束条件

假定 n 个节点随机分布于 $l \times l \times l$ 立体区域内。这 n 个节点构成节点集 $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, 其中 s_0 为信宿。所有节点具有相同的通信半径。令 r 表示节点的通信半径, MS 为能够移动的自主车,其自身能够收集节点数据,且其能量不受限。

依据文献[10]的簇构建算法,将 n 个节点划分为多个簇,并将每个簇的中心位置作为 RP。假定网络内形成 m 个 RPs,这 m 个 RP 构建 RPs 集: $M = \{RP_1, RP_2, \dots, RP_m\}$ 。如图 1 所示,其中 BS 表示基站; ME 表示移动信宿; ND 表示传感节点; CH 表示簇头。VRDC 算法需解决的问题,就是如何依据这 m 个 RPs 规划 MS 移动的最优路径,同时,构建最优的 VRPs,进而以低的能耗收集网络内感测数据。

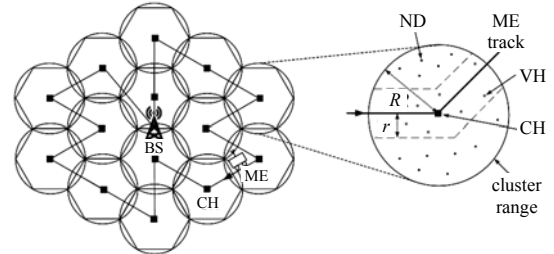


Fig.1 Cluster-based network structure of WSNs
图 1 基于簇的 WSNs 网络结构

1.2 能耕模型

传感节点的多数能量消耗于发送数据和接收数据。引用文献[13]的自由空间能耗模型,节点 s_i 向节点 s_j 传输 β 比特数据所消耗的能量 $E_{tx}(i, j)$ 为:

$$E_{tx}(i, j) = \beta \times \alpha_{tx} + \alpha_{fs} \times d_{ij}^\gamma \times \beta \tag{1}$$

式中: α_{tx}, α_{fs} 分别为发送、处理单位比特数据所消耗的能量; d_{ij} 为节点 s_i 与节点 s_j 间的欧式距离; γ 为衰落指数,一般 $\gamma \in [2, 4]$ [9]。

令 $E_{rx}(i, j)$ 表示节点 s_i 接收 β 比特数据所消耗的能量:

$$E_{rx}(i) = \beta \times \alpha_{rx} \tag{2}$$

因此,可依式(3)计算节点 s_i 所消耗能量 E_i :

$$E_i = E_{tx}(j, i) \times (\mathcal{G}_i + u_i) + E_{rx}(i) \times u_i \tag{3}$$

式中: \mathcal{G}_i 为节点 s_i 所产生的比特数; u_i 为节点 s_i 从孩子节点所接收的比特数,其定义如式(4)所示:

$$u_i = \begin{cases} \sum_{j \in \xi_i} \mathcal{G}_j, & \text{if } \xi_i \neq \Phi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

式中: ξ_i 为节点 s_i 的孩子节点集; \mathcal{G}_j 为节点 s_j 向节点 s_i 传输的比特数。

2 VRDC 算法

2.1 移动信宿的路径规划

为有效提高数据收集效率,VRDC 算法要求 MS 遍历网络内所有 RPs。执行路径规划的步骤如下:

1) 先将基站 S_0 加入 RP 集,即 $M \leftarrow M \cup S_0$ 。

2) 在 x 轴平台上寻找最左、最右和中间的 RP 节点,分别表示 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 和 \mathfrak{R}_3 。计算由 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 和 \mathfrak{R}_3 构成距离矩阵 $\mathbf{Q}_{(3 \times 3)}$, $\mathbf{Q} = [\mathfrak{R}_{(i,j)} - \mathfrak{R}_j], i, j = 1, 2, 3$ 。再判断矩阵 \mathbf{Q} 的行列式 $\det(\mathbf{Q})$ 值,如果 $\det(\mathbf{Q}) \leq 0$,则将 $\mathfrak{R} = \{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \mathfrak{R}_3\}$ 加入集 A (最初 A 集为空),即 $A \leftarrow \mathfrak{R}$; 否则,将 \mathfrak{R} 加入集 B (最初 B 集为空)。随后,将已处理的 3 个 RP 节点从 M 集中删除,即 $M \leftarrow M - \mathfrak{R}$ 。重复上述过程,直至 M 集为空。

3) 将形成的集 A 和集 B 进行排序。在集 A 内对 RPs 按 x 轴坐标升序排序;而在集 B 内对 RPs 按 x 轴坐标降序排序。然后将 A 和 B 加入 φ 集。 φ 集表示由 RPs 构建的路径点。最后,对 φ 再进行循环移动,直至 S_0 成为第一个 MS 到达的位置。最终,MS 依据 φ 中的 RPs 进行移动。

2.2 VRPs 的构建

VRPs 是实际的数据收集点, MS 直接从 VRPs 收集数据, 而其余的节点将数据传输至离自己最近的 VRP。因此, 构建最近的 VRPs 成为数据收集的关键。

对于 φ 集内任意 2 个 RPs 点(假定为 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$), 节点 s_i 离 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 连线的距离表示为 $d(s_i)$ 。如果 $d(s_i)$ 小于节点的通信半径 r , 则将节点 s_i 作为 VRP。

最初由点 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 和点 P 构成一个三角形, 其中点 P 表示节点 s_i 的位置。令 a, b 和 c 分别表示该三角形三边的长度:

$$\begin{cases} a = d(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2) \\ b = d(\mathfrak{R}_2, P) \\ c = d(P, \mathfrak{R}_1) \end{cases} \quad (5)$$

再依据式(6)计算点 P 离 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 线段的距离 $d(s_i)$:

$$d(s_i) = \frac{\tau}{b} \quad (6)$$

式中 $\tau = s \times (s - a) \times (s - b) \times (s - c)$, $s = (a + b + c) / 3$ 。

图 2 为数据收集示例, 菱形表示 VRPs, 三角形表示 RPs, 圆点为传感节点。当 MS 沿着路径移动时, 就从路径附近的 VRPs 收集数据。

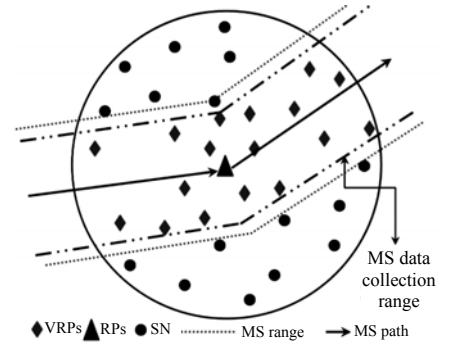


Fig.2 Examples of data collection based on VRPs
图 2 基于 VRPs 数据收集示例

3 性能分析

3.1 仿真环境

为更好地分析 VRDC 算法性能, 利用 Matlab 软件建立仿真平台。在 $300\text{ m} \times 300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 区域内部署 100 至 400 个节点, 具体的仿真参数如表 1 所示。

选择能效路径选择策略 (Energy-Efficient Path Selection, EEPS)算法^[9]、基于移动信宿和簇群的混合数据收集 (Hybrid Data Collection Approach, HDCA)算法^[10]

和 ACO 的移动信宿路径决策 (ACO-based Mobile sink Path Determination, AMPD)算法^[12]作为参照, 对比分析 VRDC 算法的节点平均能耗、网络寿命以及能耗的均衡性。其中节点平均能耗是指 MS 移动一轮内, 所有节点的能耗平均值; 网络寿命是指从部署节点开始至第一个能耗殆尽节点出现的轮数。用公平指标 (Fairness Index, FI) 表述能耗的均衡性:

$$FI = 1 - \left(\frac{2 \times \lambda_e}{E_m - E_u} \right) \quad (7)$$

式中: λ_e 为传感节点能耗的标准差; E_m, E_u 分别为最大的能耗和最小能耗。 λ_e 定义为:

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(E_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \right)^2}{n}} \quad (8)$$

3.2 节点平均能耗

首先分析节点平均能耗随网络内节点数的变化情况, 如图 3 所示。从图 3 可知, 节点数的增加加大了节点平均能耗。原因在于: 节点数越多, 网络内要传输的数据包越多, 这加大了节点传输数据的负担, 最终增加了节点平均能耗。相比于 EEPS 算法、AMPD 算法和 HDCA 算法, 提出的 VRDC 算法有效控制了能耗。相比于 EEPS 算法, VRDC 算法的能耗下降约 26%。如, 当节点数为 400 时, VRDC 算法的平均能耗约 32 mJ, 而 EEPS 算法的平均能耗约 58 mJ。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

parameter	value
network area	$300\text{ m} \times 300\text{ m} \times 300\text{ m}$
number of nodes	100–400
initial energy of sensor node/J	100
communication range of sensor node/m	35
α_w ($\mu\text{J}/\text{bit}$)	42
α_r ($\mu\text{J}/\text{bit}$)	42
α_b ($\mu\text{J}/\text{bit}/\text{m}^2$)	29
path loss exponent	2
speed of mobile sink ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.5
packet size/bytes	30
data transmission rate ($\text{Kb} \cdot \text{s}^{-1}$)	40

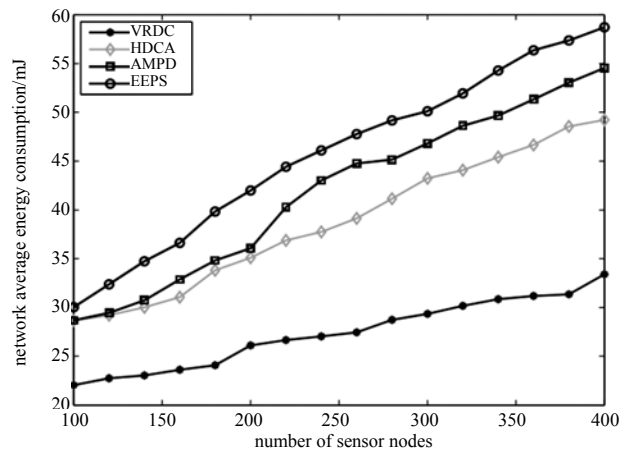


Fig.3 Average energy consumption
图 3 节点平均能耗

3.3 网络寿命

分析 VRDC 算法的网络寿命, 如图 4 所示。从图 4 可知, 节点数的增加, 使网络寿命呈下降趋势。相比于 EEPS 算法、EAPC 算法和 NDCMC 算法, VRDC 算法网络寿命下降速度缓慢。

此外, VRDC 算法的网络寿命也远高于 EEPS 算法、AMPD 算法和 HDCA 算法的网络寿命, 分别高了近 556 轮、517 轮和 435 轮。这与图 3 的能耗数据相对应。VRDC 算法通过均衡节点间能耗, 避免个别节点能量枯竭, 进而延长了网络寿命。

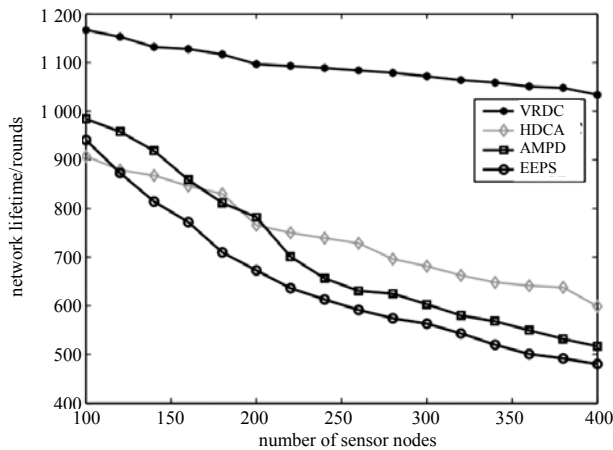


Fig.4 Network lifetime
图 4 网络寿命

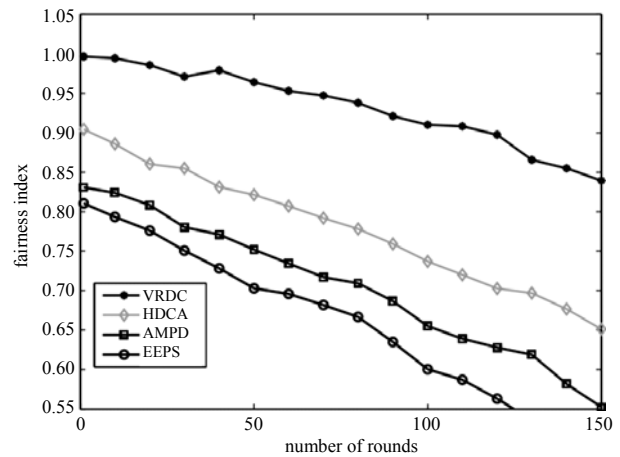


Fig.5 Fairness Index
图 5 能耗均衡的公平指标

3.4 能耗均衡

分析 EEPS 算法、AMPD 算法、HDCA 算法和 VRDC 算法的能耗均衡性能。图 5 为 4 种算法的能耗公平指标, 其定义见式(7)。从图 5 可知, 最初 FI 指标为 1, 随着执行轮数的增加, FI 逐步下降。但 VRDC 算法下降的速度变缓, 相比之下, EEPS 算法、AMPD 算法和 HDCA 算法下降速度很快。如, 当执行至 150 轮时, VRDC 算法的 FI 约 0.85, AMPD 算法、HDCA 算法的 FI 分别为 0.55、0.65, 而 EEPS 算法在执行至 120 轮时, 它的 FI 指标就降至 0.55。这些数据表明, VRDC 算法有效均衡了节点的能耗, 使网络内多数的能耗速度保持相对一致。

4 结论

通过信宿在网络内移动, 可有效减少节点传输数据的跳数, 并平衡节点间的能耗。为此, 提出 VRDC 算法。VRDC 算法先依据驻留点规划信宿的最优移动路径, 再依据此路径产生 VRPs。信宿从 VRPs 收集数据, 进而缩短了移动路径, 并平衡了节点间的能耗。仿真数据表明, 相比于同类算法, VRDC 算法有效缓解了能耗速度, 延长了网络寿命。

参考文献:

- [1] 李柳雅, 贾宗璞. 基于 CFSFDP 聚类算法的 WSN 高效分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(3): 884-888. (LI Liuya, JIA Zongpu. Energy-efficient clustering routing algorithm based on CFSFDP clustering algorithm in WSN[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(3): 884-888.)
- [2] 尚亚丽. WSNs 中基于能效感知的任播路由[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(6): 1012-1016. (SHANG Yali. An energy-efficient Anycast routing in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(6): 1012-1016.)
- [3] 陶建林, 方凯, 苗春雨, 等. 一种能耗优先的 WSN 路由空洞修复方法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 762-768. (TAO Jianlin, FANG Kai, MIAO Chunyu, et al. A WSN routing void repair method based on energy consumption priority[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(5): 762-768.)
- [4] 马忠彧, 马宏锋, 彭琳茹, 等. 面向环境监测的 WSN 中基于定向传输的高效路由算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 297-303. (MA Zhongyu, MA Hongfeng, PENG Linru, et al. Energy-efficient routing algorithm based on directional transmission in WSN network for environmental monitoring[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(2): 297-303.)

(下转第 249 页)