

文章编号: 2095-4980(2020)05-0913-05

WSNs 中基于转发区域调整的能效地理路由

徐立, 白金牛, 柳原

(包头医学院 计算机科学与技术系, 内蒙古 包头 014040)

摘要: 针对无线传感网络(WSNs)的数据传输问题, 提出基于转发区域调整的能效地理位置路由(FAEG)。FAEG 限定了数据包的转发区域, 构建候选转发节点集, 并从节点集中选择权重大的节点传递数据包; 通过节点剩余能量和离目的节点距离信息计算节点权重, 使剩余能量大和离目的节点近的节点具有优先传递数据包的资格, 提高了路由稳定性。节点遭遇路由空洞时, 则调整转发区域, 在更广范围内选择传输数据包的节点。仿真结果表明, 提出的 FAEG 降低了能耗, 并提高了数据包传递率。

关键词: 无线传感网络; 地理位置路由; 转发区域; 路由空洞; 权重

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019437

Forwarding area-tune energy efficient geographic routing in Wireless Sensor Networks

XU Li, BAI Jinniu, LIU Yuan

(Department of Computer Science and Technology, Baotou Medical College, Baotou Inner Mongolia 014040, China)

Abstract: Forwarding Area-Tune Energy Efficient Geographic(FAEG) routing is proposed to solve the problem of data transmission in Wireless Sensor Networks(WSNs). In FAEG, the forwarding region of packet is controlled, and forwarding node set is constructed. The node with big weight is selected to transfer packet. By calculating the weight based on both the remaining energy of the node and the distance from the destination node, the remaining energy of the node is large and the node close to the destination node is qualified to firstly deliver the packet, which improves the routing stability. When a node encounters a routing void, the forwarding area is adjusted to select the node transmitting the packet in a wider area. Simulation results show that the proposed FAEG routing reduces energy consumption and improves packet transmission rate.

Keywords: Wireless Sensor Networks; geographic routing; forwarding area; routing void; weight

无线传感网络(WSNs)是由微型、具有感知能力的传感节点在没有固定基础设施支持情况下, 自组织形成的一种无线网络^[1-2]。WSNs 已在多个领域内广泛使用, 如森林防火、康复医疗、智能家居。传输数据是基于 WSNs 应用的关键, 因此, 路由问题是 WSNs 领域的研究热点。

由于节点属微型节点, 传感节点的资源受限, 尤其是节点的能量。有限的能量制约 WSNs 的路由。传感节点一般由电池供电, 当节点能量消耗殆尽^[3], 节点就无法感测/传输数据。因此, 在设计 WSNs 路由时, 必须考虑到节点能耗。

相比于其他路由机制, 地理位置路由只需依据局部节点位置信息构建路由, 避免了整个网络的信息泛洪, 控制开销低。因此, 地理位置路由在 WSNs 中广泛使用, 如文献[4]提出基于可容定位误差的地理位置路由。贪婪转发是地理位置路由常用的路由策略。所谓贪婪转发就是选择离目的节点更近的邻居节点传输数据。该转发策略简单, 易实施, 缩短了数据传输路径, 但贪婪转发容易遭遇路由空洞^[5], 即没有比自己离目的节点更近的邻居节点。如, 文献[6]考虑到地理位置路由的路由空洞问题, 并提出处理路由空洞的策略。但该路由策略只

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2019MS06036); 内蒙古自治区高等学校科学研究资助项目(NJZY18190)

作者简介: 徐立(1983-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无线网络路由、医学图像处理、模式识别等。email:xin124_xin@163.com

限于二维空间，无法拓展至三维空间^[7]。文献[8]针对三维空间，提出了角度转发的空洞处理路由(Angular Void Handing Routing, AVHR)策略。文献[9]也考虑了路由空洞问题，并提出基于转发角度调整的路由协议(Angular Routing Protocol, ARP)，但 ARP 是针对移动自组织网络，并非针对 WSNs。文献[10]针对三维 WSNs 网络，提出了实时地理位置路由(Real-Time Geographical Routing, RTGR)。RTGR 给每个数据包设置一个转发区域，只有在该区域内的节点才能接收此数据包，限定了参与路由的节点。

这些协议只关注了路由空洞问题，并没有考虑到能耗问题^[11-12]。而节点能量是 WSNs 的重要因素。为此，提出基于转发区域调整的能效地理位置路由(FAEG)。FAEG 先设定转发角度，再构建候选转发节点集；然后，依据节点距离和能量信息计算节点权重，并择优选择节点权重大的节点作为下一跳转发节点；若遭遇路由空洞，则逐步增加转发角度。仿真结果表明，提出的 FAEG 减少了节点能耗，并提高了数据包传递率。

1 FAEG

1.1 网络模型

n 个同构的传感节点随机分布在 $l \times l \times l$ 区域内。节点感知环境数据，再将数据传输至信宿。不失一般性，信宿位于区域中心。假定节点利用定位算法，能够获取自己的位置信息和信宿位置。所有节点的通信半径相同，令 R 表示节点的通信半径。

1.2 能量消耗模型

采用如图 1 所示的能耗模型。如果传输距离 d 小于或等于参考距离 $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{amp}}$ ，则利用多径衰落计算能耗；否则，采用自由模型，如式(1)所示：

$$E_{sd}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{amp}d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： E_{elec} 为传输单比特数据所消耗的能量； ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别为多径衰落模型和自由空间模型传输的功耗参数^[11]； m 为比特数。

接收 m 比特的数据包所消耗的能量 $E_{rv}(m, d)$ ：

$$E_{rv}(m, d) = mE_{elec} \quad (2)$$

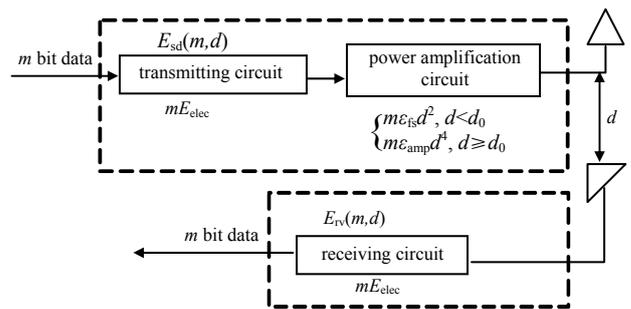


Fig.1 Model of energy consumption
图 1 能耗模型

2 FAEG 算法

FAEG 由构建候选转发集、选择下一跳转发节点以及传输数据 3 个阶段组成。在构建候选转发节点集阶段，源节点通过转发角度构建候选转发节点，然后，通过第二阶段从候选转发节点集中选择下一跳转发节点，最后，利用下一跳转发节点传输数据包。

2.1 候选转发节点集

将需要向目的节点传输数据的节点称为源节点。源节点先依据自己的位置信息和目的节点的位置信息转发角度 α 。为抑制开销，最初节点转发角度为 60° ，源节点与目的节点位置的连线平分该转发角，如图 2 所示。源节点 i 需向目的节点传输数据，依据源节点与目的节点的位置设置转发角度，最初转发角度为 60° ，即 $\alpha_0 = 60^\circ$ 。接下来，源节点依据转发角度构建候选转发集。令 N_i 表示源节点 i 的一跳邻居节点集。源节点 i 计算与 N_i 内节点连线与目的节点连线的夹角，将夹角小于转发角 α 的节点纳入候选转发节点集 ψ_i 。

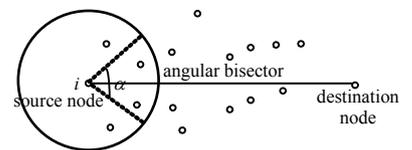


Fig.2 Forwarding angle
图 2 转发角度

具体而言，对于任意邻居节点 $j \in N_i$ ，源节点 i 先计算矢量 r_{ij} 和矢量 r_{id} ，再依据式(3)计算夹角 θ_j ：

$$\theta_j = \arccos \left(\frac{r_{ij} \cdot r_{id}}{|r_{ij}| |r_{id}|} \right) \quad (3)$$

源节点 i 将 θ_j 与转发角 α 进行比较, 如果 θ_j 小于转发角 α , 源节点 i 就将邻居节点 j 纳入候选转发节点集 ψ_i , 如式(4)所示:

$$\forall j \in N_i, \psi_i \leftarrow j, \text{if } \theta_j \leq \alpha \quad (4)$$

2.2 下一跳转发节点

从候选转发节点集 ψ_i 中选择下一跳转发节点, 存在 2 种情况: a) 候选转发节点集 ψ_i 不为空, 即 ψ_i 内存在节点, 称为 Case1; b) 若 ψ_i 为空, 则表明节点遇到路由空洞问题, 称为 Case2。

2.2.1 Case1

在 Case1 情况, 源节点需要从 ψ_i 中再精选下一跳转发节点。考虑到节点能量是 WSNs 的重要因素, 在选择下一跳转发节点时, 考虑节点的剩余能量。除剩余能量之外, 还考虑节点离目的节点距离。为此, 依据剩余能量和距离信息计算 ψ_i 中节点的权重, 再优先选择权重大的节点作为下一跳转发节点。

令 W_j 表示邻居节点 $j \in N_i$ 的权重, 其定义如式(5)所示。

$$W_j = \lambda \frac{E_j^r}{E_{\text{init}}} + (1 - \lambda) \frac{R}{D_j}, j \in \psi_i \quad (5)$$

式中: E_j^r, E_{init} 分别表示节点 j 的剩余能量和初始能量, E_j^r/E_{init} 反映了节点能耗情况, E_j^r/E_{init} 值越大, 表明节点的能耗速度越小; D_j 为节点 j 离目的节点的欧式距离; R 表示节点的一跳传输半径, R/D_j 反映了节点离目的节点的距离情况, R/D_j 值越大, 表明节点 j 离目的节点越近。因此, 选择权重大的节点作为下一跳转发节点; λ 为协调 E_j^r/E_{init} 与 R/D_j 两项的权重因子, 且 $\lambda \in (0,1)$ 。

2.2.2 Case2

Case2 情况表明已构建的候选转发节点集内没有可选的节点。这表明, 源节点遭遇路由空洞。在这种情况下, 就需扩大转发区域。首先, 增大转发角度 α 。采用逐步增加转发角度, 每次增加的步长为 $\Delta\alpha$ 。

先增加 $\Delta\alpha$, 即 $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$ 。增加转发角后, 再依式(4)重新构建候选转发节点集。判断新的候选转发节点集是否仍为空, 如不是, 进入 Case1 情况, 依据式(5)计算候选转发节点集内节点的权重, 再选择权重大的节点作为下一跳转发节点; 若仍为空, 则继续增加转发角度 α , 再重复上述过程。若转发角度 α 增至 360° 之后, 候选转发节点集仍为空, 表明源节点遭遇严重的路由空洞。这种情况下, 源节点采用存储—携带—转发的策略。

2.3 传输数据

依据 Case2 选择下一跳转发节点后, 源节点就将数据 data 传输至该节点。

图 3 为传输数据流程。先依式(4)构建候选转发节点集 ψ_i , 再判断 ψ_i 是否为空。如为空, 则增加转发角度, 再重新构建候选转发节点集; 若 ψ_i 不为空, 则依据式(5)计算节点的权值, 再选择权重最大的节点作为下一跳转发节点。最后, 源节点向该节点传输数据。

3 性能分析

3.1 仿真环境

利用 OMNET++ 软件建立仿真平台^[13], 分析 FAEG 路由性能。100~500 节点随机分布于 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 区域, 信宿位于区域中心。节点初始能量为 5 J。具体的仿真参数如表 1 所示。每次仿真独立重复 50 次, 取平均值作为最终仿真数据。

3.2 数据包传递率

数据包传递率是反映路由性能的重要指标之一。数据包传递率越高, 表明数据传输性能越好。图 4 为 FAEG 路由、AVHR 和 RTGR 路由的数据包传递率随节点数的变化情况。

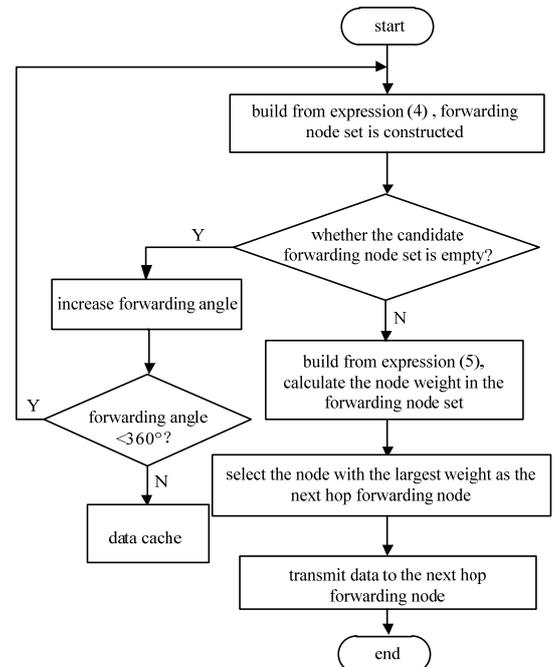


Fig.3 The flow of data transfer
图 3 传输数据的流程

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

parameter	value
simulation area	300 m×300 m×300 m
node number	100-500
node initial energy/J	5
communication radius/m	100
packet size/bytes	32
packet delivery rate	2 packets/s
$E_{elec}/(nJ/bit)$	50
$\epsilon_{fd}/pJ/(m^2 \cdot bit^{-1})$	100
$\epsilon_{amp}/pJ/(m^4 \cdot bit^{-1})$	0.01
simulation time/s	300

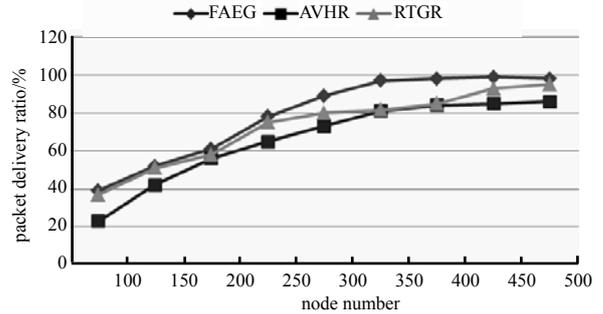


Fig.4 Packet delivery ratio

图 4 数据包传递率

从图 4 可知，最初随节点数增加，数据包传递率快速上升。但当节点数增加至 300 后，数据包传递率随节点数的增加而上升的速度变缓。原因在于：当节点数较少时，增加节点数提升了网络连通率，提高了数据包传递率；但当节点数增加到一定数量后，继续增加节点并不能提升数据包传递率。

相比于 AVHR 和 RTGR 路由，提出的 FAEG 路由的数据包传递率得到提升。当节点数达到 300 后，FAEG 路由的数据包传递率稳定在 100%。

3.3 节点平均剩余能量率

能耗是 WSNs 的重要性能指标。为此，分析 FAEG、RTGR 和 AVHR 路由的平均剩余能量率，其等于节点的剩余能量与初始能量之比的平均值，即式(5)第一项的均值。显然，平均剩余能量率越高，路由的能耗越低，意味着路由性能越优。

图 5 描绘了平均剩余能量率随节点数的变化曲线。从图 5 可知，节点数的增加，使 AVHR 和 RTGR 路由平均剩余能量率下降，但 FAEG 路由的平均剩余能量率并没有下降，保持较稳定的趋势。这主要是因为：它们三个路由机制不同。RTGR 路由在构建路由过程中，产生了较多冗余数据包，这增加了能耗。并且节点数越多，冗余数据包就越多，势必增加了能耗。而 FAEG 路由在选择下一跳转发节点时，考虑了节点的距离和能量，并择优选择下一跳转发节点，提高了路由稳定性。

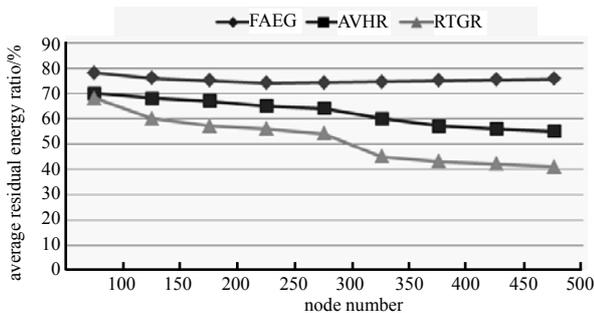


Fig.5 Average residual energy ratio

图 5 平均剩余能量率

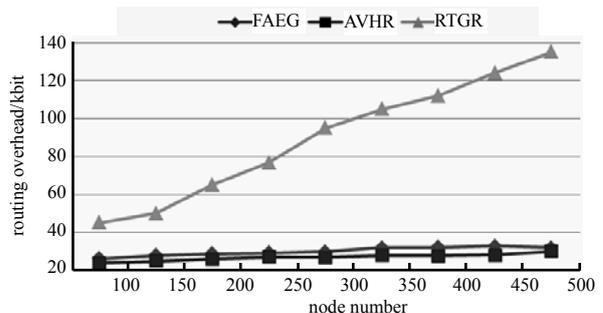


Fig.6 Routing overhead

图 6 路由开销

3.4 路由开销

路由开销也是衡量路由性能的一个重要指标。路由开销反映了传输数据包所产生的控制包情况。若产生的控制包越多，路由开销就越大。因此，设计路由时需压缩路由开销。数据包产生率是固定的(每个源节点每秒产生 2 个数据包)，网络内所传输的总的数据包数是固定的。路由开销越大，冗余数据包数越多，路由性能越差。

图 6 为 FAEG, RTGR 和 AVHR 3 个路由的路由开销随节点数的变化情况。从图 6 可知，RTGR 的路由开销随节点数的增加而快速增加，这主要因为：RTGR 引用了泛洪机制，节点数的增加使控制包数呈线性增长。相比之下，FAEG 和 AVHR 有效控制了路由开销，路由开销没有随节点数的增加而快速上升。

4 结论

考虑数据传输和能耗是无线传感网络的重要性能指标，提出基于转发区域调整的 FAEG。FAEG 依据转发区

域控制数据传输路径,抑制控制包。在选择下一跳转发节点时,考虑节点的能量和距离信息,使剩余能量过低的节点不参与路由。仿真结果表明,提出的 FAEG 提高了数据包传递率,并减少了节点的能耗。

参考文献:

- [1] 徐晶晶,张欣慧,许必宵,等. 无线传感器网络分簇算法综述[J]. 计算机科学, 2017,44(2):31-37. (XU Jingjing,ZHANG Xinhui,XU Bixiao,et al. Survey of clustering algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2017,44(2): 31-37.)
- [2] 王振朝,侯欢欢,连蕊. WSN 中基于位置预测的地理路由算法[J]. 计算机科学, 2018,45(5):59-64. (WANG Zhenchao, HOU Huanhuan,LIAN Rui. Geographic routing algorithm based on location prediction in WSN[J]. Computer Science, 2018, 45(5):59-64.)
- [3] 尚亚丽. WSNs 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 network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(6):1012-1016.)
- [4] 刘菁源,刘云. WSN 中可容定位误差的地理位置路由算法优化研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2015,52(2): 338-343. (LIU Jingyuan,LIU Yun. Geographic routing algorithms resilient to location errors in wireless sensor networks[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2015,52(2):338-343.)
- [5] 陶建林,方凯. 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. A WSN routing void repair method based on energy consumption priority[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2019,32(5):762-768.)
- [6] LIU J,SHEN H,YU L,et al. Characterizing data deliverability of greedy routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018,17(3):543-559.
- [7] KUHN F,WATTENHOFER R,ZOLLINGER A. An algorithmic approach to geographic routing in ad hoc and sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking(TON), 2018,16(1):51-62.
- [8] GUPTA N K,YADAV R S,NAGARIA R K. Void handling in 3rd wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 15th IEEE India Council International Conference. [S.l.]:IEEE, 2018:34-45.
- [9] GIRUKA V C,SINGHAL M. Angular routing protocol for mobile ad hoc networks[C]// The 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCSW05). Washington,DC,USA:IEEE, 2005:551-557.
- [10] RUBEAAI S F,ABD M A,SINGH B K. 3rd real-time routing protocol with tunable parameters for wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2016,16(3):843-853.
- [11] HUANG H,YIN H,MIN G. Energy-aware dual-path geographic routing to bypass routing holes in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018,17(6):1339-1352.
- [12] ABDALLAH A E. Low overhead hybrid geographic based routing algorithms with smart partial flooding for 3rd ad hoc networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018,9(1):85-94.
- [13] VARGA A. Omnet++ website[EB/OL]. (2018-04)[2019-01]. <https://omnetpp.org>.