

文章编号: 2095-4980(2022)03-0292-05

## 无线传感网络中基于探测包的多径路由

刘小强<sup>1,2</sup>

(1.河南科技大学 应用工程学院, 河南 三门峡 472000; 2.三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

**摘要:** 多径路由是应对无线传感网络(WSNs)的链路质量差的重要技术。现存的构建多径路由依赖集中运算或迭代的分布式运算, 消耗大量的运行时间。为此, 提出基于探测包的多径路由(EPMR)。EPMR路由先利用探测包的传输, 收集局部拓扑信息。依据接收探测包的到达时间, 设置端口优先级, 优先考虑端口优先级的节点参与路由。一旦参与了一条路径, 节点不再参与源节点与目的节点间的其他路径, 进而保证多径间的不相交性。仿真结果表明, 提出的EPMR提升了数据包传输成功率, 缩短了运行时间。

**关键词:** 无线传感网络; 多径路由; 不相交路径; 探测包; 端口优先级

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020184

## Exploration packet-based multipath routing in Wireless Sensor Networks

LIU Xiaoqiang<sup>1,2</sup>

(1.School of Applied Engineering, Henan University of Science and Technology, Sanmenxia Henan 472000, China;

2.Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia Henan 472000, China)

**Abstract:** Multipath routing is essential to overcome the high loss rate in Wireless Sensor Networks(WSNs). Current proposals rely on centralized computation or iterative distributed algorithms and consume large amount of convergence time. Therefore, Exploration Packet-based Multipath Routing(EPMR) is proposed in this paper. EPMR routing first collects local topology information by using the transmission of exploration packets. According to the arrival time of the received exploration packet, the port priority is set, and the node that gives priority to the port priority participates in the route. Once participating in a path, the node will no longer participate in other paths between the source node and the destination node pair, thus ensuring the disjunction between multiple paths. Simulation results show that the proposed EPMR improves the packet transmission success rate and cuts the running time.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks(WSNs); multipath routing; disjoint path; Exploration Packet; port priority

无线传感网络(WSNs)在军事、工业、机器人和医疗康复等领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。WSNs通过大量微型传感节点, 捕获应用环境内的数据, 并将数据传输至控制中心, 进而实现对应用环境的监测。传感节点通常由电池供电, 其能量有限, 且一般不可重复补充。因此, 节点能耗是评估WSNs的重要指标<sup>[2]</sup>。节点能量一旦消耗殆尽, 无法感测数据, 也不能参与路由, 降低了数据传输的可靠性, 也增加了传输数据的时延。因此, 构建能量有效的可靠路由成为WSNs的热点。依据路由特性, WSNs路由机制一般可分为单径和多径路由<sup>[3]</sup>。相比于多径路由, 单径路由易实施, 但容错性差。多径路由对部分路径的断裂具有较强的鲁棒性。多径路由的本质是采用冗余路由策略<sup>[4]</sup>, 即构建多条备用路径, 防止某一条路径的断裂, 导致无法将数据传输至目的节点。依据构建多径路径的方式, 多径路由可分为基于集中式和分布式两种。集中方式需预知全局网络拓扑图, 计算复杂且通信成本高; 而分布方式只需局部的节点信息, 减少了通信成本。文献[5]采用基于最短路径的分布方式(Shortest Path-Distributed Multipath, SPDD)构建多径路径策略。文献[6]提出基于迭代多路径(Iterative Multipath, IM)策略, 在源节点与目的节点间构建多条不相交低时延路径。本文提出基于探测包的多径路由(EPMR)。EPMR路由通过探测包捕获局部的网络拓扑信息, 再通过路径选择阶段完成多径路由的构建。与现存的多径路由分布式构建算法不同, EPMR算法采用单次迭代, 加速构建路由的速度, 缩短运行时间。仿真结果表明, 提出的EPMR提高了

路径的可靠性，提升了数据包传输成功率，缩短了算法运行时间。

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型

在  $\ell \times \ell$  区域内部署  $n$  个静态传感节点，构建节点集  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。这些节点一旦部署后，就不再移动，即静态节点。令  $d_{i,j}$  表示节点  $s_i$  与节点  $s_j$  间的距离。如果  $d_{i,j}$  小于  $R_{\max}$ ，则认为节点  $s_i$  与节点  $s_j$  为邻居节点，其中  $R_{\max}$  表示节点的最大通信半径。

用  $G = (V, E)$  表示网络拓扑，其中  $V$  表示网络节点； $E$  表示链路集。定义 1 给出不相交路径的定义。

**定义 1** 不相交路径<sup>[7]</sup>

节点  $s_i$  与节点  $s_j$  间的任意两条路径分别为  $p_1 = (s_i, s_k, s_{k+1}, \dots, s_j)$  和  $p_2 = (s_i, s_t, s_{t+1}, \dots, s_j)$ 。如果  $p_1$  与  $p_2$  中除了首尾两节点( $s_i$  与  $s_j$ )之外，没有其他节点相同，则  $p_1$  和  $p_2$  是不相交路径。

### 1.2 能耗模型

考虑图 1 的能耗模型<sup>[8-9]</sup>。节点传输  $m$  bit 的数据所消耗的能量：

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

式中： $d$  为传输距离； $E_{\text{elec}}$  为发送数据电路传输单比特数据所消耗的能量； $\epsilon_{\text{fs}}$  和  $\epsilon_{\text{amp}}$  分别为在自由空间、双径衰落传输模型下的能量消耗因子； $d_0$  为距离阈值。

节点接收  $m$  bit 数据所消耗的能量：

$$E_r = mE_{\text{elec}} \quad (2)$$

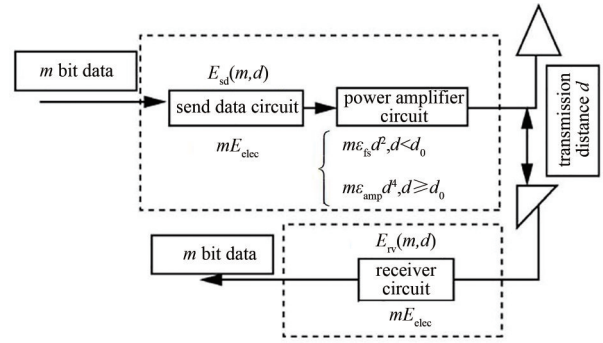


Fig.1 Energy consumption model  
图 1 能耗模型

## 2 EPMR

### 2.1 局部网络拓扑信息

任意节点(假定为节点  $s_i \in S$ )向节点  $s_j \in S$  传输数据，节点  $s_i$  收集局部的网络信息。节点  $s_i$  称为源节点， $s_j$  称为目的节点。

为捕获局部拓扑信息，源节点  $s_i$  向邻居节点传输探测包(Exploration Packet, EP)，其包含节点的 ID 号、EP 包的版本号 Ver\_n 以及 EP 包遍历的路径 List\_m。最初，EP 的版本号  $\text{Ver}_n = \{ \langle s_i, 0 \rangle \}$ 。其中  $\langle s_i, 0 \rangle$  表示该 EP 包是由源节点  $s_i$  转发，且第一次转发。路径 List\_m 存储了转发 EP 包的节点的 ID 号。因此，List\_m 的初始值内只包含源节点  $s_i$ ，即  $\text{List}_m = \{ s_i \}$ 。

当邻居节点(假定为节点  $s_k$ )收到 EP，首先检查自己缓存区是否已有该 EP 的版本。如果是之前未接收过的包，则将该包的版本号缓存至自己的缓存区<sup>[10]</sup>。若缓存区已有，则直接丢弃，并给发送 EP 的节点设置端点优先级(Input Port Priority, IPP)。节点  $s_k$  收到节点  $s_i$  发送的 EP 包，如  $s_k$  是第一次收到此包，则  $s_k$  将节点  $s_i$  的 IPP 值设为 1，即  $\text{IPP}_{k \rightarrow i} = 1$ ；若是第二次收到，则  $\text{IPP}_{k \rightarrow i} = 2$ 。依次类推。显然，IPP 反映了节点与不同邻居节点间路径性能。IPP 值越小，可能其对应节点的路径越短。

若缓存区第一次收到该包，就将  $\text{IPP}_{k \rightarrow i}$  设置为 1，即  $\text{IPP}_{k \rightarrow i} = 1$ ，并将自己的 ID 号加入 List\_m 中，即  $\text{List}_m = \{ s_i, s_k \}$ ，并转发。

每个节点重复上述过程，直到将 EP 传输到目的节点。然后进入第二阶段(多条路径的选择)。图 2 给出节点接收 EP 包的处理过程。

图 3 为传输 EP 的示例。S 为源节点，D2 为目的节点。源节点 S 先向邻居节点(A,B,C)传输 EP(原 EP 包)。这些邻居节点接收后，就进行转发 EP。它们转发的 EP 是 EP 的副本。每个节点依据所接收的 EP 包的到达时间，设置端口优先级。第一次收到，其端口优先级最高，且为 1。

### 2.2 路径选择

目的节点接收到来自不同节点传输的 EP 包后, 构建连通目的节点的路径(EP 包中包含源节点的 ID 和位置)。由于可能收到来自多个节点转发的 EP 包, 目的节点可以建立多条不相交路径。

目的节点一旦收到 EP 包, 则回复 EP 包(Reply EP, REP)。首先, 目的节点从 EP 包中提取 List\_m 的信息。List\_m 中携带了 EP 从源节点遍历至目的节点的过程; 然后, 目的节点依据 List\_m 列表中的信息, 传输 REP。一旦收到 REP, 节点(中间节点)就判断是否需要向其邻居节点转发 REP。中间节点优先考虑 IPP 值最小的邻居节点作为下一个转发节点。

具体而言, 令  $N_i$  表示节点  $s_i$  的一跳邻居节点。若节点  $s_i$  收到 REP 包, 则从  $N_i$  中选择具有最小 IPP 值的节点作为 REP 包的下一跳转发节点  $Next\_hop(s_i)$ :

$$Next\_hop(s_i) = \min_{s_j \in N_i} IPP_{i \rightarrow j} \quad (3)$$

若节点  $s_j \in N_i$  被选择传输 REP 包后, 将  $s_j$  从一跳邻居节点集  $N_i$  中剔除, 即  $N_i = N_i / s_j$ , 则在构建下一条路径时, 不会再选择下一个节点构建路径, 实现多条路径间的不相交。

每个节点重复上述过程, REP 可到达源节点。一段时间后, 源节点就会获取来自不同路径的 REP, 进而实现了源节点与目的节点间的多径。

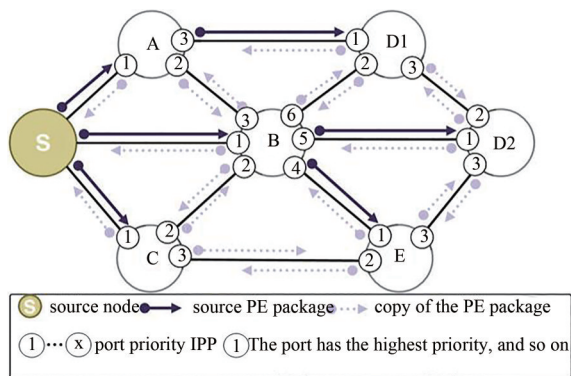


Fig.3 Process of transferring EP packages and setting up IPP  
图3 传输 EP 包以及设置 IPP 的过程

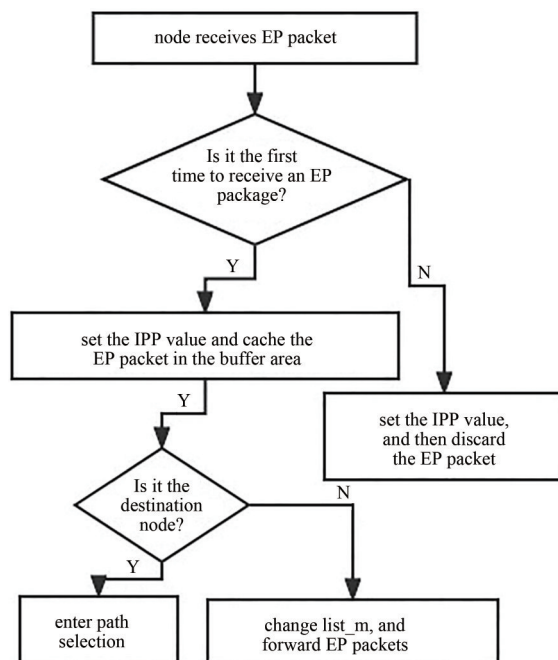


Fig.2 Process of processing EP package by a node  
图2 节点处理 EP 包的过程

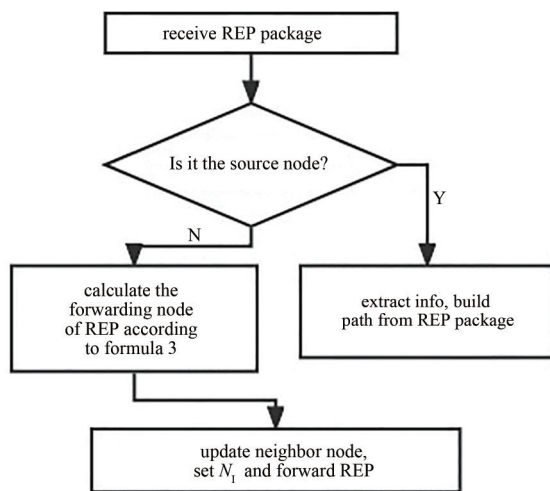


Fig.4 Process of processing REP package by a node  
图4 节点处理 REP 包的过程

图 4 为中间节点收到 REP 的处理过程。一旦收到 REP, 先判断自己是否为源节点, 若是, 依据 REP 包中的 List\_m 信息, 构建源节点至目的节点间的路径; 否则, 依式(3)产生下一跳转发节点, 并更新邻居节点, 再转发 REP。

### 2.3 路径选择示例

图 5 为源节点 S 至目的节点 D1 的路径。对于目的节点 D1, 它有 3 个邻居节点 {A, B, D2}。D1 从 3 个邻居节点中选择端口优先级 IPP 值, 节点 A 的 IPP 值最低, 因此, 首先选择节点 A, 构成第 1 条路径 {D1 → A → S}。重复上述过程, D1 节点在选择第 2 条路径时, 不再考虑已参与第 1 条路径的节点。

## 3 性能分析

### 3.1 仿真环境

利用 NS3 软件建立仿真平台<sup>[11]</sup>, 分析 EPMR 的性能。在 100 mm×100 mm 区域内部署 50 个节点, 具体的仿真

参数见表 1。

选择 SPDD 和 IM 策略作为参照，并分析能耗、数据包传输成功率、路径数及运算时间。其中选取每传输一个数据包至目的节点的平均能耗(简称平均能耗)指标分析算法的能耗；数据包传输成功率等于目的节点成功接收的数据包数与源节点传输的总的数据包数之比。

### 3.2 数据包传输成功率

首先，分析 EPMR, SPDD 和 IM 的数据包传输成功率随节点数的变化情况，见图 6。从图 6 可知，随着节点数的增加，数据包传输成功率不断提升，但当节点数增加至 35 后，数据包传输成功率却随节点数的增加而下降。原因在于：节点数的增加，提高了网络连通性，但当节点数增加至一定数量后，节点数的继续增加，加大了拥塞率，因此降低了数据包传输成功率。

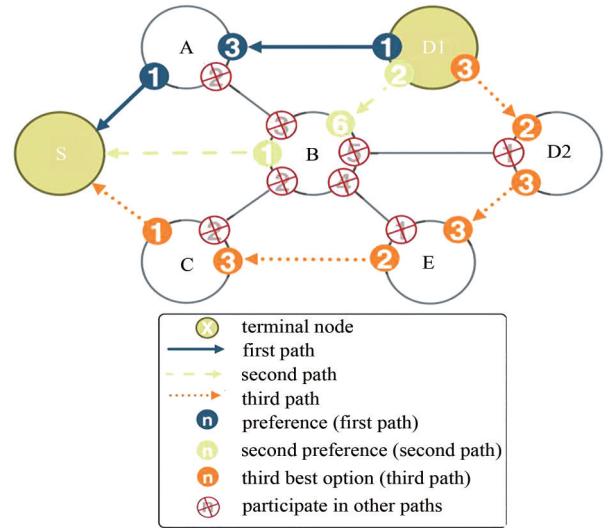


Fig.5 Example of building a disjoint path  
图 5 构建不相交路径示例

表 1 仿真参数  
Table1 Simulation parameters

simulation area/m <sup>2</sup>	node transmission distance/m	MAC layer protocol	channel bandwidth range/(Mb·s <sup>-1</sup> )	initial node energy/J	$E_{elec}/(nJ·bit^{-1})$	$\epsilon_B/(pJ·bit^{-1}·m^{-2})$	$\epsilon_{amp}/(pJ·bit^{-1}·m^{-4})$
100×100	250	IEEE802.11	20~100	1	50	10	0.001 3

相比于 SPDD 和 IM，EPMR 提高了数据传输成功率。在节点数小于 15 时，EPMR 路由的数据包传输成功率低于 SPDD 和 IM，但随着节点的增加，数据传输成功率快速增加。这主要是因为 EPMR 构建了多径路由，并且优先利用第一路径传输数据包。

### 3.3 平均能耗

SPDD, IM 和 EPMR 的平均能耗见图 7。从图 7 可知，相比于 SPDD 策略，EPMR 的平均能耗并没有下降。这主要是因为 SPDD 路由采用最短路径，减少构建路径的控制包数，降低了节点能耗。IM 的平均能耗最高，原因在于 IM 通过反复迭代构建多径路由，增加了节点能耗。

### 3.4 路径数及运算时间

表 2 给出了 EPMR, SPDD 和 IM 的路径数以及运算时间。运算时间是路由算法构建所有源节点至目的节点所有不相交路径时所消耗的时间。从表 2 可知，EPMR 路由的运算时间为 0.304 5 s，介于 SPDD 和 IM 之间。

EPMR, SPDD 和 IM 所构建的路径条数分别为 230, 225 和 234，IM 构建的路径条数最多。尽管 IM 搜索路径能力强，但这是以运算时间和能耗(见图 7)为代价。

## 4 结论

为提升无线传感网络的路由可靠性，本文提出了 EPMR。EPMR 旨在提高数据包传输成功率的同时，减少构建多径路由所消耗的时间，降低能耗。EPMR 通过探测包的交互，收集网络内局部拓扑信息，构建多径，避免反复迭代运算，减少了能耗。仿真结果表明，相比于同类的 IM，EPMR 的数据包传输成功率得到提升，平均能耗和运算时间也得到压缩。但相比于 SPDD，

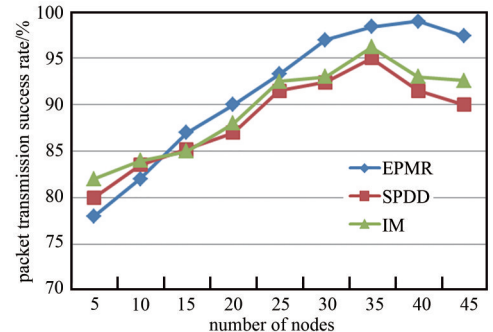


Fig.6 Packet delivery ratio  
图 6 数据包传输成功率

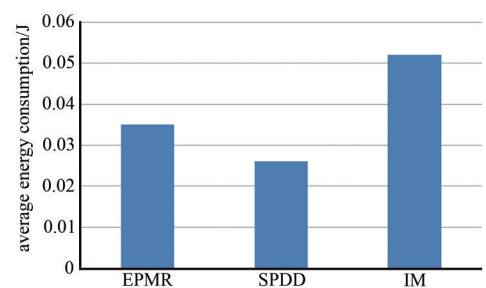


Fig.7 Average energy consumption  
图 7 平均能耗

表 2 路径数及运算时间  
Table2 Number of path and operation time

	EPMR	SPDD	IM
operation time/s	0.304 5	0.229 9	13.97
number of built paths	230	225	234

EPMR 的能耗和运算时间仍存在优化的空间, 这将是后期的工作方向。后期, 将进一步优化算法, 控制其能量和运算时间。此外, 本文只通过实验仿真分析了 EPMP 性能, 未能通过实例分析 EPMP 性能。这也将是后期的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 曹世华, 胡克用, 王李冬, 等. 基于分布式色调识别的无线传感网络  $k$  连通性路径检测[J]. 电信科学, 2018, 34(2): 65–73. (CAO Shihua, HU Keyong, WANG Lidong, et al. Distributed hue recognition based  $k$  connectivity path detection in WSN[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(2): 65–73.)
- [2] 范兴刚, 杨静静, 王恒. 一种无线传感器网络的概率覆盖增强算法[J]. 软件学报, 2016, 27(2): 418–431. (FAN Xinggang, YANG Jingjing, WANG Heng. Algorithm for enhancing probabilistic coverage in wireless sensor network[J]. Journal of Software, 2016, 27(2): 418–431.)
- [3] 金永贤, 朱虹. 基于分簇和蚁群的无线传感器网络多径路由协议[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(4): 400–407. (JIN Yongxian, ZHU Hong. Multipath routing protocol for wireless sensor networks based on clustering and ant colony[J]. Journal of Zhejiang Normal University(National Science), 2019, 42(4): 400–407.)
- [4] 彭艺, 李启骞, 朱豪, 等. 一种基于排序蚁群算法的无线 Mesh 多径路由协议[J]. 通信技术, 2020, 53(3): 634–640. (PENG Yi, LI Qiqian, ZHU Hao, et al. Wireless Mesh multipath routing protocol based on sorted ant colony algorithm[J]. Communications Technology, 2020, 53(3): 634–640.)
- [5] HADID R, KARAATA M H, VILLAIN V. A stabilizing algorithm for finding two node-disjoint paths in arbitrary networks[J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2017, 28(4): 411–435.
- [6] PAJARES D L. Iterative discovery of multiple disjoint paths in switched networks with multicast frames[C]// 2018 IEEE Conference on Local Computer Network. Chicago, USA: IEEE, 2018: 409–412.
- [7] 杨明霞, 毕宏博, 柴国飞. 无线传感执行器网络中多源容错拓扑控制算法研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(11): 1740–1747. (YANG Mingxia, BI Hongbo, CHAI Guofei. Multiple source fault-tolerant topology control method research in wireless sensor and actor network[J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2017, 30(11): 1740–1747.)
- [8] 肖铖, 孙子文. 基于蚁群系统的 WSN 能量均衡多路径路由协议[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(7): 1695–1700. (XIAO Cheng, SUN Ziwen. Ant colony system based energy-balanced multi-path routing protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(7): 1695–1700.)
- [9] 侯梦婷, 赵作鹏, 高萌, 等. 采用角度因子的蚁群优化多路径路由算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(1): 107–112. (HOU Mengting, ZHAO Zuopeng, GAO Meng, et al. Ant colony optimization multipath routing algorithm adopted angle factor[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(1): 107–112.)
- [10] 钟辉, 周甜甜. 跨层多径 AOMDV 路由协议的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 44(6): 1306–1313. (ZHONG Hui, ZHOU Tiantian. Research of the crosslayer multipath AOMDV routing protocol[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 44(6): 1306–1313.)
- [11] ns-3 simulator[EB/OL]. [2020-01]. <https://www.nsnam.org>.

#### 作者简介:

刘小强(1982-), 男, 陕西省咸阳市人, 硕士, 副教授, 主要研究领域为无线传感网络路由、数据传输、V2X 车联网及计算机应用. email: liu\_hanhao66@qq.com.