

一种无线传感器网络的最小能耗路由算法

刘湘雯¹, 卢虎¹, 石云平²

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051; 2. 西安邮电学院, 陕西西安, 710121)

摘要 针对无线传感器网络能量有效性问题, 结合真实网络中节点的功率只能在离散值中选取的特点, 研究了最小能耗路由算法。以经典能耗模型为基础, 给出了理想情况时的最小能量路径, 认为其是一个线性规划问题, 最终给出了尽量逼近理想情况的最小能量路径算法——最近最优点路由(Proximate Optimal - Point Routing, POPR)算法。POPR算法基于地理位置信息, 具有分布式、在实际中更易于实现的特点。最后, 对算法的性能进行了仿真分析, 并与多种经典算法进行了比较分析, 结果表明该算法在节点密度比较高时, 具有较好的性能。

关键词 无线传感器网络; 最小能量路由; 离散功率; 地理位置

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.0016

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0075-05

在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中, 由于传感器节点主要依靠电池供电, 能量是极为重要的网络资源, 如何最大限度地提高节点及网络的能量有效性, 使网络以有限的能量工作尽可能长的时间, 是该类网络的主要设计目标之一^[1-2]。采用能量有效路由协议是提高 WSN 能量有效性的一种重要手段, 而最小能量路由是能量有效路由协议的一个重要分支^[3-4]。最小能量路由追求数据端到端传输的最小能耗, 在传输单个数据分组的过程中具有最高的网络能量效率。

地理路由在能量有效路由协议中占有非常重要的地位, 如果节点具有移动性, 地理位置路由需要位置管理机制使得全网节点获知其实时的位置信息, 给网络带来比较大的开销。在节点不具有移动性的情况下, 只需要在网络开始时获得网络内其它节点的地理位置信息。对于 WSN, 首先, 在很多应用场景中, 传感器节点布设之后静止不动, 在节点位置相对静止的前提下, 地理路由具有开销小, 可扩展性强的特点; 其次, 由于 WSN 通常需要查询某个地理区域或位置的节点的信息, 地理位置信息在传感器网络中通常是必备的; 再次, 对于很多应用场景, 从业务的角度来看, WSN 只是在传感器节点到 Sink 之间有业务, 传感器节点间没有业务, 因此, 每个节点只需要知道邻居节点以及 Sink 的位置信息, 就可以实现路由过程。因此, 在 WSN 中采用地理位置路由是一种很好的选择。

目前有多种基于地理位置信息的最小能量路由^[5-7]。PALR^[5]基于节点发送功率可以连续调整的假设, 利用地理位置信息, 采用分布式、基于局部网络状态信息进行路由决策, PALR 的目标是追求端到端最小能耗, 其选择最优下一跳的方法为, 每个节点根据自己到邻居节点的能量消耗以及邻居节点到目的估计的能量消耗选择一个使得端到端能耗最小的节点作为下一跳。文献^[6]提出了一种通过最大化单跳能量效率以最小化端到端能耗的路由策略。其中, 能量效率定义为功率消耗与前进距离的比值, 即 $\eta = \frac{P_{\text{consumption}}}{D_{\text{advance}}}$, 在这种策略下, 每个节点都选择单跳能量效率最高的邻节点作为自己的下一跳, 其存在的主要问题是: 每个节点都追求单跳能量效率的最大化, 造成经过的每一跳距离的不平均, 局部最优, 全局未必最优, 当从源节点到目的节点之间的平均跳数较少时, 采用该方式未必能达到最优的能耗性能。GLB - DMECR^[7]也是基于地理位置信

* 收稿日期: 2011-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174194)

作者简介: 刘湘雯(1977-), 女, 讲师, 博士, 主要从事无线网络、无线传感器网络、云计算等研究。

E-mail: wujingkj@126.com

息的最小能耗路由算法, GLB - DMECR 采用分布式、基于局部网络状态信息的工作机制, 利用理想的最小能耗路径来引导路由选择过程, 节点根据自己、目的节点和一跳范围内的邻节点的位置信息, 在理想最小能量位置或接近理想最小能量位置处找到一个下一跳节点。

以上几种基于地理位置信息的路由算法, 都基于节点发送功率可以在最大通信范围内任意调整的假设, 而在实际中, 节点的发送功率并不是可以任意调整的, 而只能在一些离散值中选取, 因此, 研究这种实际网络的基于地理位置信息的最小能量路由是非常必要的。本文利用整数线性规划对离散功率时的最小能量路径进行了分析, 并提出了一种 WSN 基于离散功率的利用地理位置信息的最小能量路由算法 POPR, POPR 选择距离理想下一跳最优点最近的节点作为下一跳, 具有如下特点: ①基于功率可以从几个离散值中选取的假设, 本地选择一个最佳的发送功率; ②利用地理位置信息, 以线性规划的方法得到最优下一跳位置; ③每个节点只根据自己、目的节点和一跳范围内的邻节点的位置信息独立地进行决策, 是一种分布式的、基于局部网络状态信息的工作机制, 具有可扩展性好的特点, 非常适合 WSN 无中心控制、节点容易失效、网络规模大的特征。

1 问题分析

对于最小能量路径问题, 首先需要回答理想情况时的最小能量路径是怎样的。下面就以最常见的能耗模型为基础, 研究理想情况时的最小能量路径。

1.1 能耗模型

本文采用文献[5]等采用的节点能耗模型, 接收并发送一个分组的功耗为:

$$P(d) = P_{tx}(d) + P_{rx} \quad (1)$$

式中: $P_{tx}(d)$ 为把一个分组发送到距离为 d 的节点的功耗; P_{rx} 为接收一个分组的功耗。

发送功耗 $P_{tx}(d)$ 与节点 (n_1, n_2) 间的距离 $d(n_1, n_2)$ 有关, 节点 n_1 向 n_2 发送一个长度为 r 的分组的功耗为:

$$P_{tx}(n_1, n_2) = (\alpha_{11} + \alpha_2 d(n_1, n_2)^n) r \quad (2)$$

式中: $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_2$ 分别为接收机电路、发射机基带电路和发射机放大电路的能耗参数; n 为路径衰减因子, 一般为 2 - 4 之间的整数。

接收一个长度为 r 的分组的功耗为:

$$P_{rx} = \alpha_{12} r \quad (3)$$

令 $\alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12}$ 。在该模型下, 如果考虑单发单收情况, 则距离为 d 的一跳传输所造成的网络最小功耗为:

$$P(d) = (\alpha_{11} + \alpha_2 d^n + \alpha_{12}) r \equiv (\alpha_1 + \alpha_2 d^n) r \quad (4)$$

将 1 bit 数据传输距离 d 时的最小能耗为:

$$E(d) = \alpha_{11} + \alpha_2 d^n + \alpha_{12} \equiv \alpha_1 + \alpha_2 d^n \quad (5)$$

1.2 理想情况时的最小能量路径

对于连续功率时的最小能量路径, 基于以上能耗模型, 文献[8]通过其中的 2 个定理给出并证明了如下 2 个问题: ①在节点能耗参数、源到目的距离 d 都已给定的情况下, 源到目的之间采用几跳传输, 可以达到端到端能耗最小? ②在跳数确定后, 每一跳的传输距离为多远? 这 2 个定理为:

定理 1 在源到目的距离 d 和跳数 K 给定的情况下, 当每一跳的距离都相等且等于 d/K , 即源、目的和所有中继节点都在同一条直线上, 且相邻两节点之间的距离完全相同时, 端到端的总功耗 $P_{\text{link}}(d)$ 最小。

定理 2 最优跳数 K_{opt} 总是 $\lfloor \frac{d}{d_{\text{char}}} \rfloor$ 或 $\lceil \frac{d}{d_{\text{char}}} \rceil$ 二者之一, 其中, d_{char} 为特征距离, 它独立于 d , 并且表示为 d_{char}

$$= \sqrt[n]{\frac{\alpha_1}{\alpha_2(n-1)}}。$$

对于节点只有一个发送功率的网络, 最小能量路径只有一种可能, 理想端到端最小能耗为 $P_{S-\text{sink}} =$

$\sum_{i=1}^{\lceil d/d_0 \rceil} P_i = \lceil d/d_0 \rceil P_0$, 其中 d_0 是节点能够传输的距离, P_0 为根据能耗模型得到的将数据传输距离 d_0 的功耗。

对于节点有多个离散发送功率可选择的网络,路径有多种可能,如何在这多条路径中找到最小能量路径是一个需要解决的问题。这个问题可以看作一个优化问题。

目标函数: $\text{Minimize}(aP_1 + bP_2 + cP_3 + \dots)$

约束条件:

$$ad_1 + bd_2 + cd_3 + \dots \geq \text{dist}_{S-D} \quad (6)$$

目标函数是最小化端到端路径的能耗,其中, P_1 为把数据传输 d_1 的功耗,其关系由式(5)得到, P_2, P_3 以此类推。 a, b, c 为整数,给出了路径上不同发送功率或者 d_i 对应的转发次数。约束条件给出路径的距离之和能够到达目的节点。对于该整数线性优化问题,可以采用经典的分支定界法求解^[9]。

2 最优点最近最小能量路由算法

对于节点发送功率只能在几个离散值中选择的网络,根据以上线性规划,可以得到理想情况下的最小能量路径,这里我们提出一种最优点最近路由(Proximate Optimal - Point Routing, POPR)算法,POPR 利用地理位置信息,以分布式的方法逼近理想情况的最小能量路径,在介绍 POPR 之前,首先给出网络模型:

- 1) 传感器节点随机分布并且在网络运行过程中保持静止;
- 2) 所有节点的地理位置信息已知;
- 3) 只有传感器节点与 Sink 之间有业务,传感器节点之间没有业务;
- 4) 除了 Sink 节点,其它所有传感器节点类型相同,具有相同的初始能量、可调离散功率级等。

首先给出定义:

定义 1 下一跳节点集合 N ; 距离 Sink 更近的邻居节点集合。图 1 中所示的阴影区。

定义 2 最优点: 节点各个发送功率范围与节点到 Sink 的连线的交点。如图 1 所示,发送范围 d_1, d_2, d_3 对应的最优点分别为 $I_{d_1}, I_{d_2}, I_{d_3}$ 。

定义 3 邻居节点的前向最优点: 通信范围包含该邻居节点的最近最优点。例如,图 1 中, N_1 的前向最优点为 I_{d_2}, N_2 的前向最优点为 I_{d_3} 。

定义 4 邻居节点的后向最优点: 通信范围不包含该邻居节点的最近最优点。例如,图 1 中, N_1 的后向最优点为 I_{d_1}, N_2 的后向最优点为 I_{d_2} 。

POPR 中,节点在选择下一跳时,根据自己的离散功率

级、该功率级能够到达的距离以及节点到 Sink 的距离,采用线性规划,求解出源到 Sink 的最小能量路径采用其中的哪几个发送功率级以及该功率级的发送次数,也就是整数线性规划中的 a, b, c 。然后,节点计算 N 中所有节点到各个发送功率级对应的最优点的距离,具体选择下一跳的做法有 4 种:

1) S 有 3 个可选发送功率,对应的距离分别为 d_1, d_2, d_3 。节点 S 比较 N 中的邻居节点与最优点 I_{d_1}, I_{d_2} 和 I_{d_3} 的距离,选择距离最近的节点作为下一跳,并把发送功率调整为能够到达所选节点的功率。

2) 节点 S 在比较 N 中的邻居节点与最优点的距离时,考虑该节点的线性规划结果中是否有到该节点的发送功率,如果没有,则该节点不参与计算。

3) 节点 S 只比较邻居节点与该邻居节点的前向最优点的距离,选择距离最近的节点作为下一跳,并没有考虑规划结果中是否有该功率级。

4) 节点 S 在比较邻居节点与该邻居节点的前向最优点的距离时,考虑该节点的线性规划结果中是否有到该邻居节点的发送功率,如果没有,则该节点不参与计算。例如,线性规划结果中 d_1 对应的转发次数为 0,则 $|N_3 I_{d_1}|$ 不参加比较。

这几种做法中,第 1 种做法是最简单的,但是没有考虑最优路径中是否包含该节点到发起节点的发送功率。在第 2 种做法对其进行了改进,在比较最小距离时,只比较线性规划中要采用的节点的距离。第 3 种做法和第 4 种做法只比较节点与前向最优点的距离,但是第 3 种做法不考虑线性规划中是否有到该节点的发

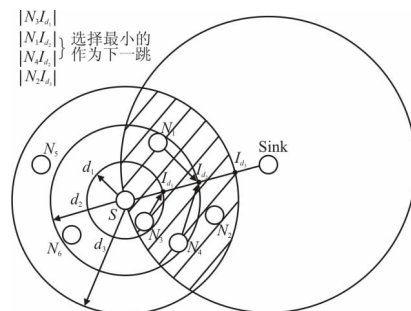


图 1 POPR 下一跳选择机制

Fig. 1 POPR next - top selecting scheme

送功率等级,最后一种做法既考虑了只计算与前向最优点的距离,还考虑了该节点是否在端到端最短路径所在的功率中。可以直观地知道,最后一种做法在节点密度比较高时,可以找到理想位置的节点,因此,能够达到比较好的端到端最小能耗。

3 仿真及性能分析

3.1 仿真条件

本文将 POPR 与 PALR^[5]和理想最优能耗的性能进行比较。由于本文重在分析网络层的路由选择策略,MAC 层和物理层的影响在此并未作考虑。仿真环境设置如下:Sink 节点位于圆盘的中心。 N 个传感器节点均匀分布在半径为 r ($r=500$ m) 的圆盘平面区域作为数据的中继转发节点以及数据源节点,它们在完成数据转发的同时也有数据要向 Sink 发送,这些节点之间没有业务。该数据分组在不同的路由策略下被传递到 Sink 节点,由此产生不同的端到端能耗。另外,不失一般性,我们只考虑传输 1 bit 的能量消耗。节点的能耗参数^[6]见表 1。

3.2 性能分析

图 2 是信道衰减指数 $n=2$ 时的性能图。在网络中节点通信范围一定以及网络范围确定的情况下,网络中节点个数的多少对应了节点的密度。理想情况的最小能量与网络中节点个数没有关系,这可以从图 2 中看出。

另外,GPSR 的做法在每一跳总是走最远的节点,并没有考虑能量的有效利用,因此,从图 2 可以看出,端到端能耗比较大。而 POPR-1 和 POPR-2 的性能比 GPSR 的性能还要差,这是因为,这 2 种做法在找下一跳节点时,只考虑在最优点最近寻找下一跳,并没有考虑该节点是否为前向最优点,有可能找到后向最优点,这就要求以大于该最优点的发送功率发送分组,降低了能量效率,从而导致端到端的平均能耗比较高。POPR-3 和 POPR-4 都考虑了在选择下一跳时,找距离前向最优点距离最近的节点,这使得每一跳的能量效率比较高,降低端到端的平均能耗,但是,由于 POPR-3 没有考虑在线性规划结果的功率级中寻找下一跳,其性能没有 Joule/m 算法和 PALR 的性能好。POPR-4 同时考虑了在线性规划结果的功率级中找下一跳,也使得其性能比较好,并且随着节点密度的增大,超过了 Joule/m 算法的性能,而且逼近 PALR 的性能。

从图 2 中还可以看出,PALR 的性能最好。这是因为,PALR 在选择下一跳时,是以追求最终的端到端的能耗最小为目标的,而 Joule/m 算法和 POPR-4 都是以间接的方式达到这个目标,Joule/m 算法是最大化每一跳的能量效率,达到端到端的能耗最小,当然,单跳的能量效率高,不一定端到端的能量效率高。POPR-4 在最优点附近找一个下一跳节点,这是以距离的接近达到最终到达目的能耗最小,这种策略,在节点密度比较高时,能够逼近 PALR 的性能。GPSR 在选择下一跳时,尽量一跳的距离最远,也就是总是用最大发送功率发送分组,因此,其端到端能耗性能不理想。

4 结束语

本文针对更切合实际 WSN 的节点功率离散化的特点,研究了其最小能量路由问题,分析了理想情况时的最小能量路径,提出了 POPR 离散功率最小能量路由算法,并分析了其性能。下一步需要进一步研究的问题是网络寿命最大化问题^[10],最小能量路由会导致网络中的部分关键节点快速失效,从而引起网络分割,缩

表 1 收发信机能耗参数

Tab.1 Energy consuming parameter of receiving and sending signal machine

信道衰减指数	$n=2$
收发信机能耗参数	$\alpha_{11}=45$ nJ/bit
	$\alpha_{12}=135$ nJ/bit
	$\alpha_2=10$ pJ/(bit·m ²)

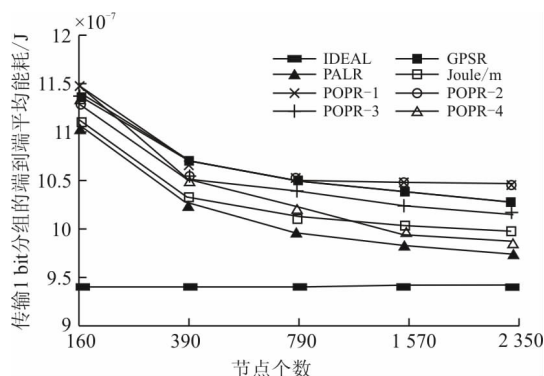


图 2 端到端平均能耗

Fig.2 End-to-end average energy consuming

短网络寿命,如何在建立最小能量路由的前提下,尽量延长网络寿命是需要进一步研究的问题。

参考文献(References):

- [1] Chong Chee - Yee, Kumar Srikanta P. Sensor networks: evolution, opportunities and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8):1247 - 1256.
- [2] Karl H, Willig A. Protocols and architectures for wireless sensor networks[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [3] Anastasi G, Conti M, Di Francesco M, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey[J]. Ad hoc networks, 2009, 7(3):537 - 568.
- [4] Singh S, Woo M, Raghavendra C S. Power - aware routing in mobile Ad hoc networks [C]//Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on mobile computing and networking. New York: ACM press, 1998:181 - 190.
- [5] Ivan Stojmenovic, Xu Lin. Power - aware localized routing in wireless networks[J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 2001, 12(11):1122 - 1133.
- [6] Gao J L. Analysis of energy consumption for Ad hoc wireless sensor networks using a bit - meter - per - joule metric[R]. IPN progress report, 2002:42 - 150.
- [7] Hou Huifeng, Liu Xiangwen, Yu Hongyi, et al. GLB - DMECR: geographic location - based decentralized minimum energy consumption routing in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 6th international conference on parallel and distributed computing, applications and technologies (PDCAT'05). Dalian: IEEE computer society, 2005:629 - 633.
- [8] Manish Bhardwaj, Timothy Garnett, Anantha Chandrakasan. Upper bounds on the lifetime of sensor networks[C]//IEEE international conference on communication. Cambridge, MA: IEEE press, 2001:785 - 790.
- [9] 韩中庚. 数学建模方法及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
HAN Zhonggeng. Mathematic modeling method and applications[M]. Beijing: Higher education press, 2005. (in Chinese)
- [10] Ouadoudi Zytoune, Youssef Fakhri, Driss Aboutajdine. Lifetime maximisation algorithm in wireless sensor network[J]. International journal of Ad hoc and ubiquitous computing, 2010, 6(3):140 - 149.

(编辑:徐楠楠)

Minimum Energy Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

LIU Xiang - wen¹, LU Hu¹, SHI Yun - ping²

(1. School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Aimed at the energy efficiency problem with discrete power in actual wireless sensor networks, minimum energy routing algorithm is studied. Based on the typical energy consuming model, the ideal minimum energy routing is presented. Ideal minimum energy routing is a linear programming problem, and a minimum energy routing algorithm which is close to the ideal minimum energy routing algorithm - - proximate optimal - point routing (POPR), is proposed. POPR is based on geographical location information and with the character of distributed and easy to be implemented in real life. The simulation results show that the performance of POPR becomes better when the node density is high.

Key words: wireless sensor network; minimum energy routing; discrete power; geographical location