

# 概率可通链路的无线传感器网络最小能量路由

刘湘雯<sup>1</sup>, 薛峰<sup>2</sup>, 卢虎<sup>3</sup>

(1.空军工程大学理学院,陕西西安,710051;2.武警陕西总队通信站,陕西西安,710000;  
3.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077)

**摘要** 考虑了概率可通链路的无线传感器网络最小能量路由,并对其进行了研究,从理论上分析了链路依概率可通时,理想情况下的最小能量路由,并给出了考虑概率可通链路的最小能量路由算法 PRLMER,该算法基于地理位置信息,考虑实际的链路可通概率,实现最小能量路由。仿真结果表明,与 GPSR 算法相比,PRLMER 在保证比较高的分组递交率的同时大幅降低了分组的端到端能耗。

**关键词** 概率可通链路;无线传感器网络;最小能量路由

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.014

**中图分类号** TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0058-05

## Minimum Energy Routing Based on Probability Reaching Link in Wireless Sensor Networks

LIU Xiang-wen<sup>1</sup>, XUE Feng<sup>2</sup>, LU Hu<sup>3</sup>

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Signal Station, Armed Police Shaanxi Corps, Xi'an 710000, China;

3. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The ideal minimum energy routing is analyzed in this paper. Minimum energy routing algorithm is presented based on probability reaching link PRLMER by utilizing geographic location information, and considering link reaching probability to realize minimum energy routing. The simulation results show that PRLMER lowers the consumption of the end-to-end energy greatly while affording higher packet delivery ratio in comparison with GPSR.

**Key words:** probability reaching link; wireless sensor networks; minimum energy routing

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种能量严重受限的网络。如何从网络层提高 WSN 的能量效率是一个重要的研究方向,也就是能量有效路由。

目前国内外已经有一些文献研究能量有效路由。但是,这些能量有效路由大多基于圆盘链路模型,见图 1。有实践结果表明,在真实环境中,无线

链路大致分为 3 个区域:连通区,过渡区,非连通区<sup>[1]</sup>。这些区域是不规则的,而且过渡区域在整个通信范围中占有比较大的比重。图 2 为概率可通通信模型考虑了真实的概率可通链路模型后,由图 2 发现其给上层协议的设计带来很大的影响,本文则要研究考虑了概率可通链路的最小能量路由。

**收稿日期:**2013-04-16

**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,陕西华县人,讲师,博士,主要从事自组织网络,无线传感器网络研究。

E-mail:wujing@126.com

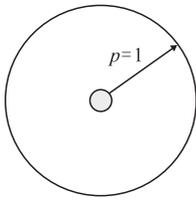


图1 圆盘通信模型

Fig.1 Disk communication model

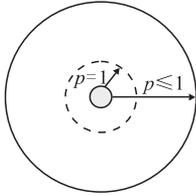


图2 概率可通通信模型

Fig.2 Probability reaching communication model

目前,国内外已有一些探讨概率可通链路的路由协议的文献。文献[2]在一个更接近实际无线环境的29个节点的802.11b测试床环境中,验证了DSDV和DSR最小跳数路由的性能比较差。文献[2]考虑链路可通概率,给出了一个更合理的估计传输次数(Expected Transmission Count,EXT)度量指标引导路径的选择。ETX度量指标的目标是最小化分组成功递交到目的节点的总传输次数,其总传输次数考虑了出错重传次数。文献[3]基于此度量指标,对DSDV和DSR路由协议改进,在路由更新分组或者路由请求分组传播的过程中,通过更新链路的ETX或者累加沿途路径上链路的ETX,得到一条包括重传次数在内的最小跳数路径。Karim Seada等在文献[1]中的概率可通链路模型的基础上,分析了基于衰落信道的贪婪转发地理路由问题<sup>[4-5]</sup>。作者基于对该链路模型的分析,给出了考虑源到目的能量效率的度量指标——单位能量成功递交的分组个数,以及几种贪婪转发策略——基于距离,基于接收率以及基于距离和接收率的乘积。

国内有研究人员研究考虑实际情况的链路选择问题,这与本文研究的问题有一定的关系。文献[6]为了在能量受限的无线传感器网络中以较低的控制开销选择出具有高分组递交率的链路,提出一种基于贝叶斯估计的依概率链路选择算法(BPLS)。该算法将链路探测过程分成若干轮,在每轮中对链路分组递交率进行贝叶斯估计,依据估计结果决定下一轮探测中选择该链路的概率。文献[7]针对WSN中不可靠链路通信耗能过大的问题,基于链路质量进行路由代价函数构建,并为各条路径分配适当的选择概率,采用最小跳数转发策略设计了代价均衡路由选择算法CBLQ。这些路由算法只是给出了考

虑链路质量的下一跳选择方法,并没有对链路质量导致的本质问题进行深挖,理论上的依据仍然欠缺。

## 1 考虑概率可通链路的最小能量路由研究

### 1.1 网络模型与能耗模型

在分析时,采用与文献[8~9]相同的能耗模型,能耗模型考虑如下因素:发送电路能耗、与距离有关的放大器部分能耗以及接收能耗。除此之外,在考虑了概率可通链路后,其更接近一个真实的网络(存在信号衰减及环境干扰),会出现出错重传的情况,为了更贴近实际,在建立能耗模型时需要考虑这部分的能耗。

下面给出一些定义: $E_{i-j}$ :第*i*跳节点与距离有关的放大器部分能耗总和; $E_r$ :接收能耗; $D$ :源节点到目的节点的距离; $N$ :源节点到目的节点的跳数; $p_{link}$ :分组一跳成功递交概率; $E_i$ :第*i*跳消耗的能量

根据文献[8~9]广泛采用的能耗模型可知,节点*i*向节点*j*发送一个长度为*l* bit的分组消耗的能量为: $E_{i-j} = l(a_2 + \alpha d_{ij}^k)$ 。

节点接收一个长度为*l* bit的分组消耗的能量为: $E_r = l\alpha_1$ ,其中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha$ 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。 $d_{ij}$ 为节点*i*到*j*的距离, $k$ 为路径衰减因子,一般为2~4之间的整数。

### 1.2 概率可通通信模型

电磁信号在传播过程中,强度随着距离以指数次方衰减,并经历随机衰减。最常用的无线电传播模型是对数距离路径损耗模型<sup>[10]</sup>,与发送节点距离为*d*的位置处,路径损耗 $PL(d)$ 为:

$$PL(d_{ij})[\text{dB}] = PL(d_0)[\text{dB}] + 10k \log\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + X_\sigma[\text{dB}] \quad (1)$$

式中: $d_{ij}$ 是发送节点与接收节点间的距离; $d_0$ 是参考距离, $k$ 依赖于周围环境和建筑物类型,在这里取值为4; $X_\sigma$ 是标准偏差为 $\sigma$ 的正态随机变量。在与发送节点距离为*d*的点处,接收功率 $P_r(d_{ij})[\text{dB}] = P_t[\text{dB}] - PL(d_{ij})[\text{dB}]$ 。如果采用NRZ,并且1 Baud=1 bit,那么成功接收一个分组的概率 $p = (1 - p_e)^{8l}$ ,其中, $l$ 是分组长度, $p_e$ 是误比特率,对于非相干2FSK调制, $p_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha(d_{ij})}{2}}$ , $\alpha(d_{ij})$ 是信噪比,如果噪声为 $P_n$ ,那么,

$$\alpha(d_{ij}) = P_t - PL(d_{ij}) - P_n = P_t - PL(d_0) - 10n \log\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) - X_\sigma - P_n \quad (2)$$

因此,与发送端距离为  $d$  的节点成功接收分组的概率为,  $p_{\text{link}}(d_{ij}) = \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha d_{ij}^k}{2}}\right)^{8l}$ 。

### 1.3 理想情况的最小能量路由

假设每一跳发送能耗、各个节点与距离有关的放大器部分的能耗、接收能耗都相等,且分别等于  $E_{t\_ij}$  和  $E_r$ 。而且可以证明,源到目的节点最小能量路径一定在源节点到目的节点的连线上,且中继节点一定处于均分源节点到目的节点的距离  $D$  的位置上<sup>[9]</sup>,见图 3。



图 3 理想情况下的最小能量路径

Fig.1 Minimum energy path for ideal case

在此理想情况下,源到目的节点发送一个分组消耗的能量为:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N (E_{t\_ij} + E_r) = N(E_{t\_ij} + E_r)$$

出错重传有 2 种情况,一种是端到端重传,即一旦发生错误,则从源节点重传;一种是逐跳重传,发生错误后只从上一跳节点重传。这里以端到端重传为例,分析在考虑了概率可通链路模型后的端到端最佳跳数。

节点从源节点到目的节点错误传输的概率为:  $p = 1 - p_{\text{link}}^N$

那么,节点从源节点到目的节点正确传输的概率为  $p_{\text{link}}^N$ 。

那么,正确传输需要耗费的总能量为:  $E_{\text{total}}^{\text{ERR}} = E_{\text{total}} \frac{1}{p_{\text{link}}^N} = N(E_{t\_ij} + E_r) \frac{1}{p_{\text{link}}^N}$ ,代入能耗模型,可得:  $E_{\text{total}}^{\text{ERR}} = Nl \left( \alpha + \alpha \frac{d^k}{N} \right) \frac{1}{p_{\text{link}}^N} = Nl \left( \alpha + \alpha \left( \frac{d}{N} \right)^k \right) \frac{1}{p_{\text{link}}^N}$ 。

若能说明上式是一个凸函数,则可以说明其存在最小值,则上式对  $N$  求导,并令其等于 0,即:  $\frac{dE_{\text{total}}^{\text{ERR}}}{dN} = 0$ ,则可以得到使得端到端能耗最小的最佳跳数  $N$ 。上式对  $N$  求导时,  $p_{\text{link}}$  也是  $N$  的函数。

图 4 是端到端能耗与跳数的关系曲线图。从图中曲线可以看到,当端到端跳数比较少时,一跳距离远,此时,出错概率比较大,会带来比较大的出错重传开销,导致分组从源节点成功递交到目的节点的端到端能耗比较大。当端到端跳数比较多时,一跳距离变近,出错重传开销变小,端到端能耗比较小。但是如果端到端跳数继续增大,由于接收能耗增大,导致端到端能耗反而会增大。因此,跳数不能太多也不能太少,而是存在一个适中的跳数,使端到端能

耗比较小。

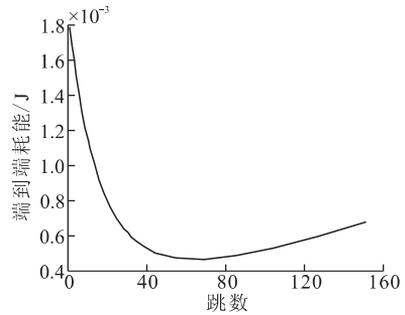


图 4 跳数与端到端能耗的关系曲线图

Fig.4 Relationship of hops with end-to-end energy consuming

## 2 基于概率可通链路的分布式最小能量路由

通过以上分析,考虑概率可通链路的最小能量路由的一种做法是:通过以上分析得到理论最佳跳数之后,能量有效路由就可以根据这个理想情况下的最佳跳数进行设计。但是,在实际设计算法时,不按照以上方法来做,因为链路可通本身就是一个概率问题,应与实际链路状况结合,设计最小能耗路由算法。这里我们给出了考虑概率可通链路的最小能量路由算法(Probability Reaching Link based Minimum Energy-consuming Routing, PRLMER)。

在介绍 PRLMER 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;
- 5) 假设节点的发送功率可以调整。

下面首先给出定义。

前向节点集合:距离 Sink 更近的邻居节点集合。图 5 中,阴影区内的节点即为  $N_0$  的前向节点集合,包括节点  $N_4, N_5$  和  $N_6$ 。

算法的设计理念是:由于目的节点发现分组出错后会要求发送节点重发分组,也就是出错重传,这显然会增大端到端能耗,链路质量的好坏是影响出错重传的一个很重要的因素。因此,选择链路质量好的节点作为下一跳节点可以降低分组的端到端能耗。当然,在选择下一跳时,不能一味追求链路质量好的节点作为下一跳节点,还需要考虑总路径的长短,因为,如果转发次数过多,会增加接收能耗,也会

导致端到端能耗增大,另外,增加不必要的转发次数,也会增大出错重传概率。

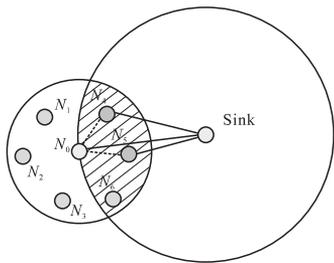


图5 PRLMER 下一跳选择机制

Fig.5 PRLMER next hop selecting scheme

根据以上路由算法设计理念,我们提出一种基于概率可通链路的最小能量路由算法 PRLMER。PRLMER 利用地理位置信息,选择下一跳节点时,首先在前向节点集合中选择链路质量足够好的节点作为备选的下一跳节点集合,然后,考虑到端到端能耗尽量小,根据备选集合中节点与 Sink 节点之间的距离,选择距离 Sink 最近的节点作为下一跳节点。通过这样的方式,分组一步一步传输到 Sink 节点。图 1 中,节点  $N_0$  要把分组发送到 Sink 节点, $N_0$  首先找到前向节点集合  $N_0, N_4$  和  $N_5$ ,然后在这 3 个节点中找满足链路质量约束的节点作为备选节点集合。例如, $N_0$  与  $N_4$  的可通概率为 95%, $N_0$  与  $N_5$  的可通概率为 88%, $N_0$  与  $N_6$  的可通概率为 60%,如果假设满足可通概率大于 85% 的节点可以作为备选节点集合,那满足链路质量约束的节点为  $N_4$  和  $N_5$ 。然后比较  $N_4$  和  $N_5$  哪个距离 Sink 节点更近,最终选择  $N_5$  作为下一跳节点。将分组转发至  $N_5$  后,节点  $N_5$  也按照类似的方法选择下一跳节点,直到分组到达 Sink 节点。

PRLMER 算法首先在前向节点集合中找下一跳节点,保证分组不断向目的节点方向转发,之后在前向节点集合中找满足链路质量约束的节点作为备选节点,尽量减少出错重传能耗,然后在满足链路质量约束的节点中选择距离目的最近的节点作为下一跳,保证分组一跳传输距离目的更近,从而降低端到端能耗。

PRLMER 算法要求每个节点知道与相邻节点的链路质量,有 2 种获取链路质量的办法:① 定期 Hello 机制。在无线传感器网络中,节点通常会周期性发送 Hello 消息以获取与邻居节点间的联系,可以通过该消息获得与邻居节点的链路质量状况;② 分组被一个节点接收后,向发送节点回馈正确接收信息,发送节点接收到该信息后,更新链路质量信息。这 2 种办法结合使用,每个节点可以近乎实时

的获知与邻居节点的链路质量状况。这样,在选择下一跳节点时,就可以根据获取的与邻居节点间的链路质量状况,挑选链路质量较好的节点作为下一跳节点,例如,可以根据最近  $n$  次统计得到的链路质量状况选择。

### 3 仿真分析

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。节点的能耗参数见表 1<sup>[9]</sup>。

表 1 收发信机能耗参数

Tab.1 Energy consuming parameter of receiver and transmitter

	$\alpha_1 = 135$ nJ/bit
收发信机能耗参数	$\alpha_2 = 45$ nJ/bit
	$\alpha = 0.001$ pJ/bit

图 6 是端到端能耗随着网络中节点个数的变化情况。GPSR 总选择距离目的节点最近的节点作为下一跳节点,这样,通常会选择距离发送节点比较远的节点作为下一跳,这会导致比较大的出错重传能耗,随着节点密度的增大,选择距离发送节点远的节点的可能性更大,所以随着节点密度增大,平均端到端能耗有所增加。而对于 PRLMER,随着节点密度增大,更能选择到链路质量好的节点作为下一跳,而且还可以更好的考虑节点与目的节点的距离,也就是距离目的更近的备选节点中可以选择到链路质量好的节点作为下一跳,所以,随着节点密度不断增大,端到端能耗不断降低。

图 7 是分组递交率随着节点个数的变化情况。从图中可以看出,随着网络中节点个数不断增多,PRLMER 的分组递交率不断增大,而 GPSR 在节点个数增大到一定程度时分组递交率反而下降。这是因为,节点个数越多,PRLMER 越能选择到链路质量好的节点作为下一跳,分组能够成功到达目的节点的概率越高,而对于 GPSR,节点个数越多,就总会选择距离发送节点距离远的节点作为下一跳,链路质量不能保证,导致分组递交率下降。

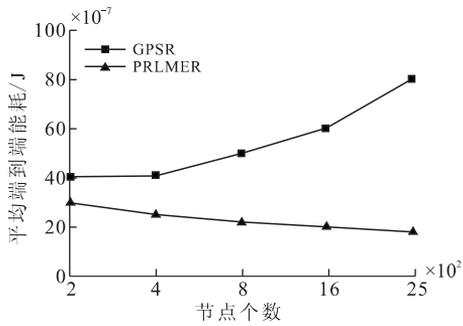


图6 平均端到端能耗与节点个数的关系曲线图

Fig.6 Relationship of node number with average end-to-end energy consuming

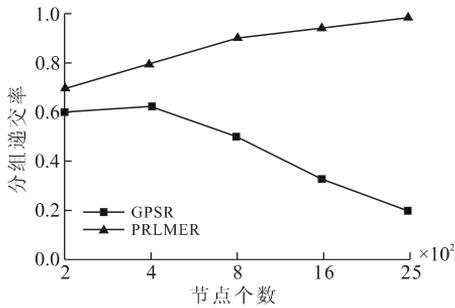


图7 分组递交率与节点个数的关系曲线图

Fig.7 Relationship of node number with packet delivery ratio

## 4 结语

考虑实际链路状况的能量有效路由具有更大的实用价值,本文研究了理想情况时的最小能量路由,并给出了考虑概率可通链路的最小能量路由算法,该算法在保证分组递交率的同时具有比较低的端到端能耗。但是最小能量路由通常总会选择相同的路径把分组递交到目的节点,这会导致网络中的关键节点能量快速耗尽,引起网络分割,缩短网络寿命。因此,在下一步工作中,我们要研究考虑概率可通链路的能量均衡路由以及寿命最大化路由。另外,本文的算法假设所有节点的地理位置信息已知,在实际实现时,给每个节点配置定位系统会提高无线传感器节点的成本,可以通过给部分节点配置定位装置,然后通过定位算法获取其它节点的地理位置信息等手段来实现。

### 参考文献(References):

- [1] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links [C]//First IEEE international conference on sensor and ad-hoc communications and networks (SECON '04). Santa Clara, CA: IEEE press, 2004: 517-526.
- [2] De Couto D S J, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [J]. *Wireless networks*, 2005, 11(4): 419-434.

- [3] Li Chihping, Hsu Weijen, Krishnamachari Bhaskar, et al. A local metric for geographic routing with power control in wireless networks [C]//IEEE Conference on sensor and ad hoc communications and Networks (SECON). Santa Clara, California: IEEE communications society, 2005: 229-239.
- [4] Seada Karim, Zuniga Marco, Helmy Marco, et al. Energy-efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked sensor systems. Baltimore Maryland: ACM press, 2004: 108-121.
- [5] Marco Zuniga Zamalloa, Karim Seada, Bhaskar Krishnamachari, et al. Efficient geographic routing over lossy links in wireless sensor networks [J]. *ACM journal*, 2008, 4(3): 111-143.
- [6] 张霞, 于宏毅, 杨白薇, 基于贝叶斯估计的无线传感器网络链路选择算法 [J]. *华中科技大学学报*, 2009, 37(2): 40-44.  
ZHANG Xia, YU Hongyi, YANG Baiwei, Algorithm for probabilistic link selection in wireless sensor networks using Bayesian estimation [J]. *Journal of huazhong university of science and technology*, 2009, 37(2): 40-44. (in Chinese)
- [7] 郝晓辰, 窦晶晶, 刘浩然, 等. 基于链路质量的 WSN 代价均衡路由选择算法 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1212-1218.  
HAO Xiaochen, DOU Jingjing, LIU Haoran, et al. Cost balanced routing algorithms based on link quality in WSN [J]. *Journal of electronics & information technology*, 2010, 32(5): 1212-1218. (in Chinese)
- [8] Deng J, Han Y S, Chen P N, et al. Optimum transmission range for wireless ad hoc networks [C]//Proc of IEEE wireless communications and networking conference (WCNC '04). Atlanta, GA: IEEE press, 2004: 1024-1029.
- [9] Bhardwaj M, Garnett T, Chandrakasan A P. Upper bounds on the lifetime of sensor networks [C]//Proc of IEEE international conference on communications (ICC '01). Helsinki, Finland: IEEE press, 2001: 785-790.
- [10] 樊昌信, 张甫翊. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
FAN Changxin, ZHANG Fuyi. *Communication theory* [M]. Beijing: National defence industry press, 2001. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)