



面向智慧园区的 WSN 路由优化算法

丁伟¹, 李树泉², 李思维³, 唐良瑞¹, 孙丹丹³

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国家电网公司客户服务中心, 天津 300012;

3. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

摘要:为解决智慧园区中无线传感器网络(WSN)的能耗不均衡问题,构建了路由代价函数,并提出了一种新的能耗均衡路由算法。该算法结合智慧园区中无线传感器网络的特点,综合考虑节点地理位置和剩余能量来构建路由代价函数。传感器节点通过选择其邻居节点中路由代价最小的节点进行数据转发。仿真结果表明,该算法可以有效节约网络能耗,同时延长了网络的生命周期。

关键词:智慧园区;无线传感器网络;路由代价;网络生命周期

中图分类号: TN 915.853

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016070

An optimized routing algorithm in WSN for smart park

DING Wei¹, LI Shuquan², LI Siwei³, TANG Liangrui¹, SUN Dandan³

1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2.State Grid Customer Services Center, Tianjin 300012, China

3.Beijing GuoDianTong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China

Abstract: To solve the energy problem in wireless sensor networks used for smart park, an optimized routing algorithm based on routing cost in WSN was proposed. According to the characteristics of smart park, the algorithm took a comprehensive consideration of the remaining energy and geographical location of nodes and exploited a new routing cost function. The sensor nodes selected the node with the minimum routing cost to forward the packets. Simulation results show that the algorithm significantly reduces the energy consumption of the network and extends the network lifetime effectively.

Key words: smart park, wireless sensor network, routing cost, network lifetime

1 引言

随着国家电网公司提出将国家电网公司客户服务中心(以下简称国网客服中心)南北园区建设为“国家电网能源技术与服务创新园区”的目标,实现对园区各种信息的

实时监测,广泛集成能量、环境等信息变得刻不容缓。在这种情况下,以低功耗、低成本为优势的无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)作为其他组网方式的有效补充,逐渐获得了广泛应用。无线传感器网络是由多个采集节点和汇聚(sink)节点构成的自组织网络,进而通过多



跳转发的方式将采集到的数据发送到 sink 节点, 由 sink 节点实现向上传送和数据存储^[1-2]。而路由算法是 WSN 网络层的核心, 它直接决定数据分组从源节点到目的节点的路径, 从而直接影响网络的功耗。因此, 对智慧园区中无线传感器网络的路由问题进行研究是十分必要的。

由于传感器节点主要依靠电池供电, 节点能量受限, 因此需要充分实现节点能耗的有效性。最小能耗 (minimum energy consumption, MEC) 路由^[3]单纯追求节点传输能耗的有效性, 但常常导致处于最小能耗路径上的节点转发任务重, 能量消耗过快而过早死亡, 最终引起网络瘫痪。为了实现能耗的均衡性, 在进行路由选择时必须充分考虑节点的剩余能量因素。但是, 过多选择剩余能量较多的节点作为下一跳会导致数据分组的传输路径过长, 不能充分实现节点能耗的有效性。因此, 在进行路由算法设计时, 兼顾网络能耗的有效性和均衡性, 是目前主要的研究方向。ECBR 算法^[4]综合考虑下两跳节点的信息, 构建了一种新的能量代价函数, 较好地实现了节点能耗的有效性和均衡性; ELACO^[5]路由算法综合考虑了节点的能量和地理位置信息, 进而智能地搜索从 source 节点到 sink 节点的最优路径, 因而有效地延长了网络的生命周期, 实现了网络能量的均衡消耗; UCPC 算法^[6]采取如下策略: 将网络分成不均匀的虚拟块, 并且在簇头路由时考虑节点位置和剩余能量的影响, 构建基于节点位置和剩余能量的隶属度函数, 并将二者进行融合判决, 并根据最大隶属度原则选择父节点, 优化路由选择。EETMO^[7]算法以节点剩余能量和节点到基站的距离两个特征参量建立隶属度函数, 利用三角模融合算子进行判决。UCRA^[8]算法是一种基于权值机制的非均匀分簇路由算法, 其采用基于权值的局部竞选簇首策略, 改善了热区问题, 有效均衡了网络节点能耗, 延长了网络生存时间。MECT^[9]算法基于最小能耗树, 并在构造树的过程中考虑到节点的剩余能量, 在减少能耗的同时保证了能耗均衡。但以上算法或计算复杂度较大, 或更多关注节点能耗的均衡性, 并不适合应用于智慧园区中的 WSN。

基于以上分析, 针对智慧园区中 WSN 的特点, 本文提出一种基于路由代价的 WSN 路由优化算法 (optimized routing algorithm based on routing cost, RCOR)。该算法综合考虑节点的地理位置信息和剩余能量, 构建节点的路由代价函数。传感器节点通过计算其邻居节点的路由代价, 进而选取路由代价最小的邻居节点作为下一跳节点, 进行数据转发。仿真结果表明, 该算法有效节约了网络能耗, 同时

延长了网络的生命周期。

2 系统模型与定义

2.1 网络模型

无线传感器网络主要应用于南北园区内各种信息的监测采集, 将各种信息采集终端视为传感器网络的普通节点, 将就地控制中心视为 sink 节点, 网络中大量的普通节点和 sink 节点则构成了智慧园区的信息采集网。

本文所研究的无线传感器网络均假设具有以下特点:

- 某个区域内随机部署了多个完全相同的传感器节点, 每个节点都具有功率控制能力, 并调节至某一固定发送半径 R ;
- 唯一的 sink 节点部署在固定位置, 且能量不受限制;
- 所有的传感器节点初始能量有限且相同, 并且能实时获取自己的剩余能量;
- 每个传感器节点可通过接收信号的强度估算自己到相邻节点的距离。

2.2 能耗模型

本文采用如下的无线通信能量消耗模型^[7], 当传感器节点在传输 l bit 数据且传送距离为 d 时, 发送端所消耗的能量为:

$$E_{tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + lE_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + lE_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端所消耗的能量为:

$$E_{rx}(l) = l \times E_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发射机和接收机电路处理单位比特数据所消耗的能量; d_0 为功率放大损耗采用不同模型时的距离阈值, $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{mp}}$; 当传输距离小于距离阈值 d_0 时, 采用自由空间模型, E_{fs} 是自由空间模型下功率放大的能量消耗; 当传输距离大于距离阈值 d_0 时, 采用多径衰减传输模型, E_{mp} 是多径衰减模型下功率放大的能量消耗。

为了更清楚地描述路由算法, 下面给出邻居节点以及前向邻居节点的定义。

定义 1 (邻居节点) 节点 i 的邻居节点集定义为:

$$N(i) = \{j | j \in V, d(i, j) < R\} \quad (3)$$

其中, $d(i, j)$ 为节点 i 和 j 之间的距离。

定义 2 (前向邻居节点) 节点 i 的前向邻居节点集定义为:

$$FN(i) = \{j | d(j, s) < d(i, s), j \in N(i)\} \quad (4)$$

其中, $d(i, s)$ 、 $d(j, s)$ 分别表示节点 i 、 j 到 sink 节点的距离。

该节点集包含了与节点 i 直接通信的所有邻居节点, 而且排除了节点 i 后向传输的可能, 从而保证了不会有环路出现。

3 路由代价

在进行 WSN 路由算法设计时, 只关注节点能耗的有效性, 极易导致最小能耗路径上的节点产生拥塞, 进而导致网络生命周期降低。反之, 只追求节点能量的均衡消耗, 将导致数据分组转发路径过长, 降低节点能耗的有效性。因此, 为节约网络能耗并实现能耗的均衡性, 必须合理匹配节点能耗的有效性和均衡性。基于以上需求, 本文提出了前向传输节点这一概念, 并在该条件下定义了一种新的路由代价函数, 综合考虑了节点位置和剩余能量两个因素, 从而保证了能量的高效利用, 实现网络能耗的均衡。

3.1 节点靠近最短路径程度

考虑节点传输范围有限等原因, 大多数节点通常不能直接与 sink 节点进行通信, 而需要依靠其余节点采用多跳转发的方式进行数据传输。为此, 从降低节点能耗的角度出发, 建立数据分组在 WSN 中的发送路径, 保证了当前节点转发数据分组给下一跳节点时所消耗的能量较少。

由最小能耗模型知, 如果数据分组的每一个转发节点都在源节点到 sink 节点的连线上, 则数据分组在传输过程中消耗的总能量最少。然而实际上各节点的邻居节点并不都是在该连线上, 因此节点靠近最短路径的程度可作为衡量节点能耗的重要指标。节点位置示意如图 1 所示, 源节点 i 的数据分组要想到达 sink 节点, 需要被转发至 i 的邻居节点。节点靠近最短路径程度的定义如下:

$$CD(j) = \frac{d^2(i,j) + d^2(i, \text{sink}) - d^2(j, \text{sink})}{2d(i,j)d(i, \text{sink})} \quad (5)$$

其中, $d(i,j)$ 、 $d(i, \text{sink})$ 、 $d(j, \text{sink})$ 分别表示节点 i 到节点 j 的距离、节点 i 到 sink 节点的距离以及节点 j 到 sink 节点的距离。由式(5)可知, 节点 i 通过节点 j 进行数据转发时, $CD(j)$ 越大, 表示节点 j 越靠近最小能耗路径, 即被选为下一跳节点的可能性越大, 从而节约节点能耗。

3.2 前进距离

在无线传感器网络中, 数据分组在向前传输时始终是

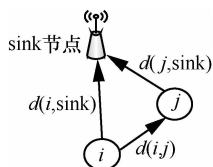


图 1 节点位置示意

向 sink 节点靠近的, 也即每一跳向 sink 节点靠近的距离越大, 越有利于节约网络能耗。由于各节点到 sink 节点距离大不相同, 因此需对其进行统一处理, 进而在进行下一跳节点的选择时, 定义数据分组的前进距离如下:

$$FD(j) = \frac{d(i, \text{sink}) - d(j, \text{sink})}{d(i, \text{sink})} \quad (6)$$

由式(6)可知, 节点数据分组单跳前进距离越大, 越有利于降低网络能耗。

3.3 节点剩余能量

在式(5)和式(6)的作用下, 数据分组总是沿着能耗近似最小的路径进行转发, 这会导致处于转发路径上的某些节点转发任务过重, 节点能量消耗过快, 甚至节点死亡。为此, 本文从能量均衡的角度出发, 基于节点剩余能量构建节点剩余能量函数, 以均衡网络的能耗, 实现网络能耗的均衡性。

$$R(j) = \frac{E_r(j)}{E_{ini}} \quad (7)$$

其中, $E_r(j)$ 是节点 j 的剩余能量, E_{ini} 是节点 j 的初始能量。

根据式(7), 节点 j 的剩余能量越多, 其被选作下一跳转发节点的可能性越大, 越有助于均衡网络的能耗, 据此可以为节点 i 进行路由选择提供依据。

3.4 路由代价函数

式(5)和式(6)从降低传输能耗的角度出发, 转发节点越靠近最短路径, 数据分组单跳前进距离越大, 到下一跳可选节点传输能耗越低, 说明其越适合承担数据的转发。式(7)从均衡网络能耗的角度出发, 考虑转发节点当前的剩余能量, 其更直接地反映了该节点进行数据转发的能力, 可以直接用来选择下一跳节点。为此, 合理地将以上 3 个因素进行融合, 可作为数据分组路由的依据。为此定义如下的路由代价函数:

$$RC(j) = CD(j) \times FD(j) \times R(j) \quad (8)$$

由式(8)可知, 路由代价不仅保证数据分组选择邻居节点中向 sink 节点最短路径方向上的节点作为下一跳, 而且保证在避免路由回传、环路的情况下绕过低能量节点进行数据转发, 既有效地节约了网络能量, 又充分实现了网络能耗的均衡性。

4 算法实现

面向智慧园区的 WSN 路由优化算法主要包括以下几个步骤。



(1)邻居发现:在网络初始阶段,所有传感器节点首先估算自身到 sink 节点的距离,然后传感器节点以最大通信半径 R 为通信半径,确定其邻居节点,进而根据式(4)确定前向邻居节点。

(2)能量代价计算:基于邻居节点信息表(包括节点的前进距离、节点靠近最短路径程度、节点的剩余能量),根据式(8)计算每个前向邻居节点的路由代价。

(3)路由选择:当节点进行数据转发时,若 sink 节点位于转发节点的通信半径范围外,则选择前向邻居节点中路由代价最小的节点作为下一跳;若 sink 节点位于节点的邻居节点范围内,则直接将数据发送给 sink 节点。

由本文的路由算法可知,传感器节点无需掌握整个网络的拓扑结构与状态参数,仅需要邻居节点的信息即可做出路由决策,路由算法具有较小的实现开销和更好的可扩展性^[10],适用于大规模网络。

5 仿真实验

为了验证算法的有效性,本文采用 MATLAB 对 RCOR 算法进行了实验仿真,同时将 RCOR 算法与最小能耗(MEC)路由算法和最大剩余能量(MREBR)^[11]算法进行了对比。仿真中,节点随机均匀分布在正方形区域中,所有节点一旦放置就不再移动。仿真参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

参数名称	取值
网络大小	100 m×100 m
节点数量/个	100~300
sink 节点坐标	(50,50)
节点发送半径/m	30
数据分组大小/bit	2 048
节点初始能量/J	1
仿真时间/轮	100
$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50
$E_s/(nJ \cdot (bit \cdot m^2)^{-1})$	10
$E_m/(nJ \cdot (bit \cdot m^2)^{-1})$	0.001 3

表 2 是不同节点死亡率下 3 种算法所经过轮数的对比情况。可以看出,RCOR 算法在不同节点死亡率的情况下,其运行的轮数都高于另外 2 种算法,有效地延长了网络的生命周期。这是因为 MEC 算法只考虑从源节点构建到 sink 节点的最短路径,导致某些节点转发任务重,能量消耗过快,节点过早死亡,因而经过轮数最短。MREBR 算法只是单纯考虑节点剩余能量因素进行路由选择,导致路

由路径过长,因此其经过的轮数较长。RCOR 算法综合考虑节点位置和剩余能量,有效地实现了节点能耗有效性和均衡性的结合,因此其网络生命周期最长。

表 2 网络生命周期对比

节点死亡率	MEC 算法轮数	MREBR 算法轮数	RCOR 算法轮数
1%	510	962	1 237
10%	602	1078	1 334
50%	762	1 127	1 523
100%	945	1 286	1 763

图 2 为 MEC、RCOR 和 MREBR 3 种算法节点的端到端平均能耗随网络规模的变化情况对比。不难看出,MEC 算法的端到端平均能耗在不同节点数量下始终最低。MREBR 算法因单纯考虑节点的剩余能量以均衡网络的能耗,故其路由路径较长,最终导致其端到端平均能耗最高。而本文算法实现了能耗有效性和均衡性的平衡,故端到端平均能耗介于 MEC 算法和 MREBR 算法之间。

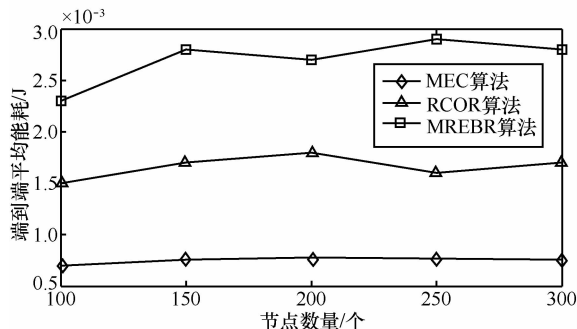


图 2 端到端平均能耗对比

图 3 对网络中最开始有节点死亡时传感器节点的平均剩余能量进行了对比。由图 3 可知,MEC 算法平均剩余能量最高,RCOR 算法次之,而 MREBR 算法最低。这是因为 MREBR 算法以节点剩余能量最多为依据来确定转发节点,以均衡网络的能量消耗,故其平均剩余能量最低。而 RCOR 算法除了考虑节点剩余能量外,还将节点位置考虑

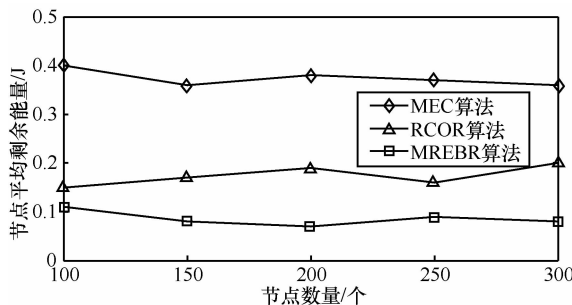


图 3 节点平均剩余能量对比

在内,实现了网络能耗有效性和均衡性的结合,故性能次优。MEC算法只考虑建立最短路径,使得最短路径上的节点过早死亡,因此其平均剩余能量指标最高。

6 结束语

结合智慧园区中WSN的特点,针对现有路由算法的不足,提出了一种新的基于路由代价的无线传感器网络路由算法。该算法以降低和均衡网络能耗为目标,综合考虑节点地理位置和剩余能量,并构建了路由代价函数。传感器节点依据路由代价最小原则,从前向邻居节点中选择下一跳节点进行数据转发。仿真结果表明,该路由算法能够有效节约网络的能耗,延长网络的生存时间。

参考文献:

- [1] REN F, ZHANG J, HE T, et al. EBRP: energy-balanced routing protocol for data gathering in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(12): 2108-2125.
- [2] CHIANG S S, HUANG C H, CHANG K C. A minimum hop routing protocol for home security systems using wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1483-1489.
- [3] SINGS S, WOO M, RAGHAVENDRA C S. Power-aware routing in mobile Ad Hoc networks [J]. The Proc of Mobicom, 1998, 23(3): 181-190.
- [4] 江海峰, 钱建生, 孙彦景, 等. WSN中基于能量代价的能量优化路由算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 73-76.
JIANG H F, QIAN J S, SUN Y J, et al. Energy cost based energy optimized routing algorithm in WSN [J]. Computer Science, 2012, 39(1): 73-76.
- [5] 王小明, 安小明. 具有能量和位置意识基于ACO的WSN路由算法[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1763-1769.
WANG X M, AN X M. An energy and location aware ACO based routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1763-1769.
- [6] 孙毅, 卢可, 唐良瑞. 面向用电信息采集的WSN非均匀分簇多跳路由算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 56-61.
SUN Y, LU K, TANG L R. An uneven clustering multi-hop routing algorithm for power information collection [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 56-61.
- [7] 唐良瑞, 冯森. WSN中基于三角模融合算子的路由算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(12): 60-63.
TANG L R, FENG S. Routing algorithm based on triangle module fusion operator in WSN [J]. Computer Engineering, 2012, 38(12): 60-63.
- [8] 乔学工, 王哲, 王华倩, 等. 基于权值的分均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(1): 107-112.
QIAO X G, WANG Z, WANG H Q, et al. An uneven cluster routing algorithm based weight [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(1): 107-112.
- [9] 彭煜, 张华忠, 魏晓镇. WSN中一种基于最小能耗树的路由协议[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(6): 109-112.
PENG Y, ZHANG H Z, WEI X Z. Routing protocol based on minimum energy consumption tree for wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(6): 109-112.
- [10] 张德干, 赵晨鹏, 李光, 等. 一种基于前向感知因子的WSN能量均衡路由方法[J]. 电子学报, 2014, 42(1): 113-118.
ZHANG D G, ZHAO C P, LI G, et al. A kind of routing protocol based on forward-aware factor for energy balance [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(1): 113-118.
- [11] HAN K H, KO Y B, K J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks [C]// IEEE 60th Vehicular Technology Conference, September 26-29, 2004, Washington, USA. New Jersey: IEEE Press, 2004: 2979-2983.

【作者简介】



丁伟(1991-),男,华北电力大学硕士生,主要研究方向为无线传感器网络路由和电力系统通信。



李树泉(1964-),男,国家电网公司客户服务中心高级工程师,主要从事电力工程、能源互联、低碳节能等方面的研究工作。

李思维(1988-),男,北京国电通网络技术有限公司工程师,主要从事智能微电网、用电及需求侧等相关工作。

唐良瑞(1968-),男,华北电力大学教授、博士生导师,主要研究方向为电力系统通信、无线通信以及光纤通信。

孙丹丹(1991-),女,现就职于北京国电通网络技术有限公司,主要研究方向为电力信息通信、信息安全。