

基于 ZigBee 的农田无线传感器网络节能路由算法^①

赵春江^②*** 吴华瑞^③*** 朱 丽***

(* 国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100097)

(** 农业部农业信息技术重点开放实验室 北京 100097)

(*** 北京农业信息技术研究中心 北京 100097)

摘 要 研究了无线传感器网络用于农田小气候环境及土壤墒情监测的高效节能路由策略,针对 ZigBee 网络采用的 Cluster-Tree + AODVjr 路由算法在节能方面的不足,结合 ZigBee 网络拓扑特点,通过建立基于模糊决策的最优节点分析模型,提出了一种适用于大规模农田渐变环境的无线传感器网络节能路由算法,该算法基于模糊决策理论来分析节点传输能耗与路由节点选取策略的定量关系,通过路由发现机制和创建最优目标组的方法来降低路由过程中数据的跳步数。仿真实验结果表明,所提出的算法较之 ZigBee 路由算法相比,显著减少了路由过程中的能量消耗。

关键词 无线传感器网络,路由算法,目标组,节能

0 引 言

基于 ZigBee 的无线传感器网络具有支持拓扑变化^[1]、节点移动等特点,适合应用于精准农业生产智能监测过程中。ZigBee 网络的农业应用场景具有特殊性,如监控环境随作物生长期的不同而变化,在不同生长期中作物对各类农田环境因子的需求在动态变化,农田高低不平的地势环境以及农作物种植密度、高度和枝叶的茂密程度等影响着节点的传输特性,增加了整个无线监控网络能量消耗,在这样一种特殊的环境渐变的情况下,降低网络能耗是首要考虑的问题之一,而路由算法是实现节能目标的重要手段之一。路由算法^[2]可以根据网络拓扑结构的不同分为适用于星形和树形结构的静态路由协议 Cluster-Tree 和适用于网状结构的动态路由协议 AODV、AODVjr。其中,Cluster-Tree 算法尤其适用于那些存储空间有限的终端设备^[3],因为其路由方式并不需要路由表的帮助。采用该算法,一旦获知目标节点的地址并做出判断之后,只需把数据机械地转发给其子节点、父节点或者中继节点,即便目标节点所处的位置比邻接节点近。用 Cluster-Tree 算法

时数据只会沿着树状结构进行传递,因为其只考虑子节点和父节点的连接关系,导致过多的数据传递,所以这种路由方式效率较低且耗电较多^[4]。AODV 算法需要节点维护一个路由表,耗费一定的存储资源,易引起 RREQ^[5](路由发现请求消息)广播风暴并增加功耗。ZigBee 网络通常采用 Cluster-Tree + AODVjr 路由算法,虽然该算法汇聚了两种算法的优点,但是针对精准农业生产中应用场景的特殊需要,仍无法完全适应要求,特别是大规模农田应用时。本文提出了一种适用于大规模农田渐变环境无线传感器网络节能路由算法,该算法能够降低当前 ZigBee 算法的跳步数,减少网络中节点能量消耗,有效利用有限能量传输数据,尽可能延长农田监测系统的生存期,使之更好地适应精准作业对农业监测系统长时间稳定运行的要求。

1 问题描述

Cluster-Tree 路由进行路径规划时^[6],能够在源节点的邻接表里面发现目标节点,它会选择子节点发送数据,反之选择父节点进行发送。这是由算法在规划路由线路时只会考虑父子节点之间的链接关

① 国家自然科学基金(61271257),国家科技支撑计划(2011BAD21B02, 2013BAJ04B04)和北京自然科学基金(4122034)资助项目。

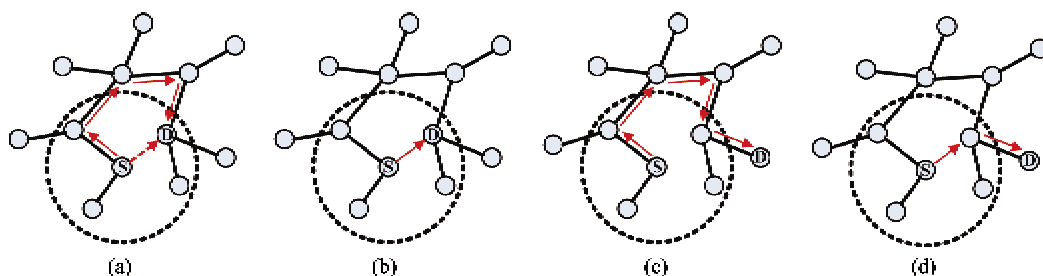
② 男,1964 年生,博士,研究员;研究方向:农业智能信息处理与控制技术;E-mail: joliel.zhl@hotmail.com

③ 通讯作者,E-mail: wuhr@nrcita.org.cn

(收稿日期:2012-03-07)

系的特性决定的^[7]。如图 1(a)所示,因为源节点和目标节点之间不存在链接关系,即源节点的邻接表里面找不到目标节点的信息,尽管数据经过一次跳步即可传递到目标节点,但是数据的传输却只能按照节点的链接关系进行。最终,从源节点发出的数

据包传递到了根节点,然后再发送到目标节点。因此,本身只需要经过一次传递即可完成的工作,却经过了多次传递才完成。图 1 中虚线包含的范围表示节点一跳步的最大传输范围。



(a) Cluster-Tree 路由算法的缺陷, (b) ZigBee 路由算法, (c) ZigBee 路由算法的缺陷, (d) DRG-ANS 算法

图 1 不同无线传感器网线路由算法性能的比较分析

针对上述存在的问题,ZigBee 路由算法^[8,9]会通过一定范围内的节点设置一个中继节点,由此对其管辖的节点发起的路由活动提供帮助。在中继节点中保存一张邻接表,该表里面包含了其管辖范围内各个节点最大传输范围内所有的节点信息。源节点在发起路由活动时,会先访问中继节点中的邻接表,查找目标节点的信息,如果能找到目标节点的信息则选择目标节点作为下一条路由路径;如果在最大传输范围内没有目标的信息,则判断目标节点是否属于派生节点,如果是则在选择子节点作为下一条路由路径,反之,选择父节点。父节点或子节点也会访问其对应的中继节点,按上述方式继续查找目标节点的信息,直到找到为止。如图 1(b)所示,ZigBee 路由算法解决了 Cluster-Tree 路由算法存在的问题。但是 ZigBee 路由算法同样存在一个问题,如图 1(c),当目标节点不在源节点的最大传输范围内时,源节点选择了其父节点作为路由的下一个节点,然后按照 ZigBee 路由算法最后找到目标节点。很显然当出现这种情况时,ZigBee 路由算法的性能就等同于 Cluster-Tree 路由算法。理想的状况如如图 1(d),本文改进后的基于近似数值解的目标路由组(destination routing group based on approximate numerical solution, DRG-ANS)算法可以有效地消除这些传统路由算法的不足。

2 DRG-ANS 路由算法

本文在 ZigBee 路由算法的基础上,通过建立数学模型来描述节点传输能耗与路由节点选取策略的

定量关系,在最优化问题约束条件下,通过求近似数值解模型,剔除冗余节点,建立最优节点目标组,基于目标组成员进行路由规划,利用路由发现机制,实现网内节点数据传送。

2.1 基于模糊决策的最优节点分析模型

假设无线传感器网络由 N 个随机分布的节点组成,可用无向图 $G(V, E)$ 表示。根据已有文献[10],在无线传感器网络中若存在多个均匀随机分布的传感器节点,节点间通过多跳传输数据信息时产生的能耗与节点间的欧式距离近似成正比。当目标节点 d 存在于平面任意位置,源节点到目标节点 d 传输数据流过程中的总能耗与源节点 s 的其他相邻节点 a_i 之间的关系可以近似用下式表示:

$$Q(q) = \delta \cdot E_{d \rightarrow q} \cdot d(d, q) + \sum_{i=1}^n \delta \cdot E_{a_i \rightarrow q} \cdot d(a_i, q) + \delta \cdot E_{q \rightarrow d} \cdot d(q, d) \quad (1)$$

其中, δ 表示传输单位比特数所需要的能耗; $E_{d \rightarrow q}$ 表示是由 d 和 q 节点之间传输数据量,单位为 bit; $d(d, q)$ 表示节点 d 和 q 之间的欧氏距离; q 表示中转节点的位置坐标。由式(1)可得整个过程总能耗函数 $Q(q)$, 根据线性加权欧氏距离性质,可知能耗函数 $Q(q)$ 是下凸函数,存在最小值。故在欧式平面内可以得到最优节点 q^* , 使得能耗函数 $Q(q)$ 取得最小值,其中

$$q^* = \arg q \in R^2 \min Q(q) \quad (2)$$

便是节点 s 的邻接节点中最优节点的近似解。

在无约束最优化情况下,对式(2)进行求解,采用最速下降法(steepest descent algorithm, SDA),其具体求解步骤如下:

步骤 1: 给定初始点 $X^0 \in R^n$, 允许误差 $\varepsilon > 0$, 令 $k = 0$ 。

步骤 2: 计算 $\nabla Q(X^k)$ 。

步骤 3: 若满足 $\|\nabla Q(X^{k+1}) - \nabla Q(X^k)\| \leq \varepsilon$, 则停止迭代, 得 $X^* \approx X^k$, 否则进行步骤 4。

步骤 4: 令 $S^k = -\nabla Q(X^k)$, 从 X^k 出发, 沿 S^k 进行一维搜索, 即求 λ_k 使得 $\min_{\lambda \geq 0} Q(X^k + \lambda S^k) = Q(X^k + \lambda_k S^k)$ 。

步骤 5: 令 $X^{k+1} = X^k + \lambda_k S^k$, $k = k + 1$, 返回步骤 2。

收敛性证明: 假设 Q 连续可微, $\{X^k\}$ 由最速下降法产生, 其中步长 λ_k 由精确线性搜索确定, 若存在常数 $M > 0$, 使得对所有的 $\lambda > 0$, 对任意的整数 k , $\|\nabla^2 Q(X^k + \lambda S^k)\| \leq M$, 则

$$Q(X^k) - Q(X^k + \lambda_k S^k) \geq \frac{1}{2M} \|\nabla Q(X^k)\|^2 \cos^2 \theta_k \quad (3)$$

其中 θ_k 为 $\nabla Q(X^k)$ 与 S^k 的夹角, 由式(3)可推出公式

$$Q(X^k) \leq Q(X^0) - \frac{1}{2M} \sum_{i=0}^{k-1} \|\nabla Q(X^i)\|^2 \cos^2 \theta_i \quad (4)$$

由式(4)可得 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\nabla Q(X^k)\| = 0$, 故最速下降法是线性收敛的。

因此采用最速下降法可得式(2)的近似数值解, 通过对节点最低能耗分析, 基于模糊决策建立最优节点求解模型, 利用该模型中节点能耗和节点位置坐标间的定量关系, 求得最小近似数值解, 从而确定最优节点。

2.2 创建最优目标组

定义 1: 跳步 在逻辑上和物理上, 两节点间的距离, 即目标节点的父节点和子节点与该节点本身, 是一跳步的关系, 而祖父节点和孙节点与它的关系是两跳步的关系, 这就意味着, 如果数据要发送到这两个节点在物理上数据至少要经过两跳步, 也就是两次传递。

定义 2: 目标组 经过目标节点向上到达树的最顶层的所有节点称为祖先节点, 向下到达树的最底层的所有节点称为子孙节点。根据不同的方式将特定的祖先节点和子孙节点组合在一起的集合称为目标组。

创建最优目标组的作用就是减少路由算法在规划路径时的计算量, 其通过特定的方式设定一组有效的节点集合, 路由算法在规划路径时只会考虑在

该集合中的节点。因此目标组创建的好与坏直接关系的路由算法最终的性能。

通过计算近似数值解模型, 在创建最优目标组时能够尽可能地减少冗余节点和路由无关节点被纳入目标组的概率, 由此减少算法的计算量。

为了更进一步说明目标组的创建过程, 本文通过模拟场景说明如何通过上述办法创建目标组。按照前面介绍的方式, 我们设定跳步数为 2, 跳步范围内非路由节点不纳入目标组。模拟场景如图 2 所示, S 节点代表源节点, 为路由的发起方; R1-R9 节点为网络中的路由节点; 其余节点为网络中的非路由节点; 图中虚线表示 S 节点的最大传递范围。采用本文的创建目标组方式, R8 节点虽然不在 S 节点的最大传递范围之内, 但是由于其属于路由节点, 数据通过 R9 节点经过 2 跳步就可到达, 因此 R8 节点会被纳入 S 节点的目标组。R1 节点虽然也属于路由节点, 但是由于 S 节点的数据要达到 R1 节点, 需要通过 R3, R2 节点经过 3 跳步才能到达, 不满足我们设定的跳步数为 2 的要求, 因此 R1 节点则不会被纳入 S 节点的目标组。

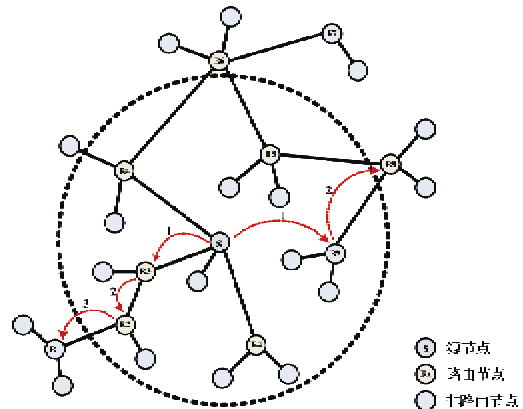


图 2 模拟创建目标组

2.3 DRG-ANS 算法流程

由于数据在节点之间传递时的能量耗费要大于路由算法规划传递路径时的能量耗费, 因此 DRG-ANS 算法通过适当增加路由算法的计算量来减少数据在节点间的徒劳的传递次数, 从而达到节省能耗的目的。

算法流程主要由以下几个步骤完成(见图 3):

步骤 1: 算法在收到路由请求之后, 首先会在邻接表里面查找目标节点信息, 如果目标节点存于邻接表里面, 则立即向其发送数据。

步骤 2: 若邻接表里不存在目标节点信息, DRG-ANS 算法会依据设定好的方式为目标节点建

立目标组,然后在邻接表里面查找目标组内节点的信息,如果能够找到目标组中任何一个节点的信息,则选择该节点作为路由的下一跳。

步骤3:若邻接表里面找不到目标组中任何一个节点的信息,则采用原始 ZigBee 路由算法计算到目标节点的跳步数,最小跳步数的线路被选做最终的路由路径。

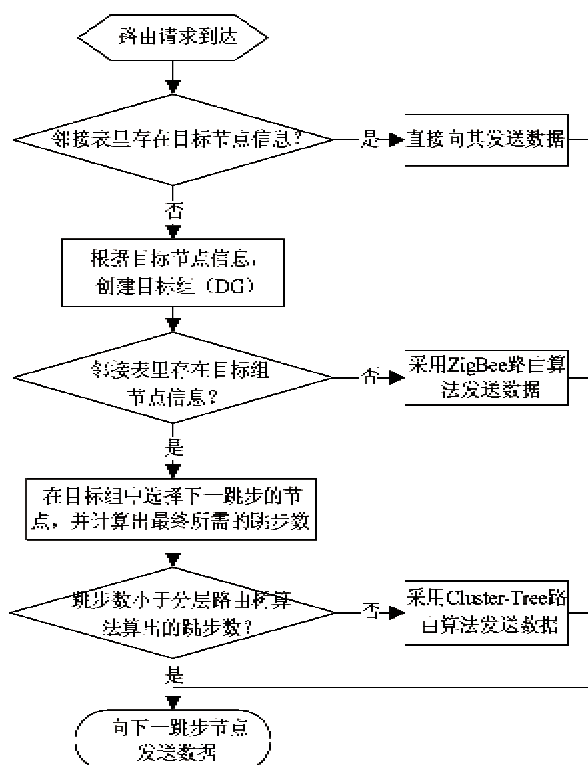


图3 DRG-ANS 算法流程图

采用 DRG-ANS 算法,最优的情况是目标节点存在于节点的邻接表中,算法可以很快地找到目标节点,但是最优的情况在农用无线传感器网络中出现的概率很低,多数的情况会出现在后面两种可能中。如果目标节点存在于节点所创建的目标组中,那么算法也会很快地找出路由路径,否则将会出现最差的情况,即重新调用 ZigBee 路由算法。因此,目标组创建得有效与否对算法的性能有着至关重要的影响。

尽管 DRG-ANS 算法增加了节点规划路由路径时的计算量,但是只要目标组创建得当,在能耗控制上较之 ZigBee 路由算法和 Cluster-Tree 路由算法会有更好的表现。

3 仿真结果

本节在 NS-2 环境下对传统 Cluster-Tree 路由算

法、ZigBee 算法以及 DRG-ANS 算法进行了仿真。设定了 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的农田区域,无线传感器节点被随机部署在一个二维的监测区域 A 内,节点初始能量均相同且最大的传输距离是 20m ,网络拓扑结构依据节点的实际位置而发生变化,搭建无线自组织网络。只有在给定的区域内 75% 以上的节点参与了该网络拓扑,最后的结果才认为有效。同时为了符合 ZigBee 网络的配置和发现过程,我们限定了参数 $C_m = 5, R_m = 5, L_m = 6$, 其中 C_m 是节点允许连接的最大子节点数,包括具有路由功能的节点和不具有路由功能的节点。 R_m 是节点允许连接的最大路由器子节点数, L_m 是最大网络深度。

当设定最大邻接节点 (MaxNeighbor, MN) 个数为 5,以及目标节点随机选取时,此 3 种算法的仿真结果如图 4 和图 5 所示。图 4 展示了此 3 种算法各自完成一次数据包传输的所产生的总跳步数,即数据包从源节点传递到目标节点所经过的节点数总和。图 5 展示了单个节点平均跳步数。从图 4 和图 5 中可以明显地看出,网络中相同数量节点工作

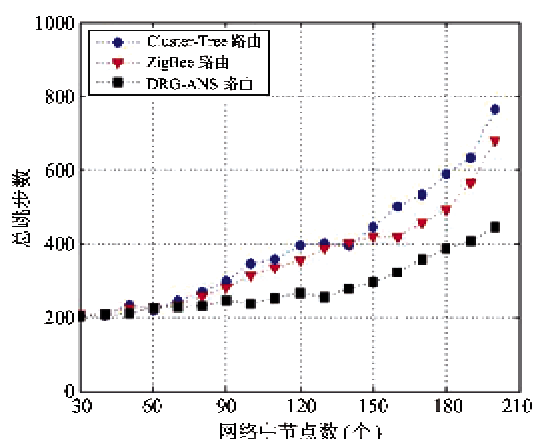


图4 节点总跳步数

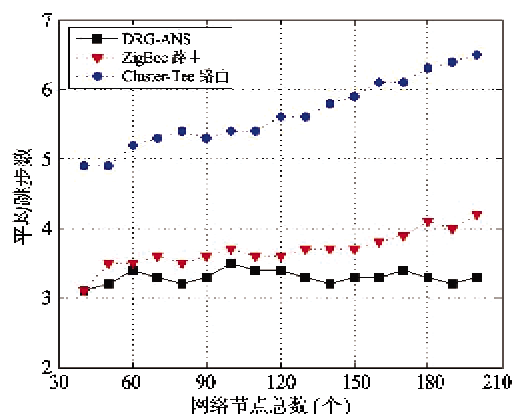


图5 节点平均跳步数

期间,DRG-ANS 算法的跳步数明显少于其它 2 种算法,并且随着工作节点数量的增加,其优越性越突出。

在图 6 里面目标节点也随机选取,如果允许更多的邻接节点(MN)数的话,我们可以看到 DRG-ANS 算法在路由过程中节省的跳步数也就越多,随着 MN 个数的不断增大,跳步数也会随之减少,即在正常情况下,跳步数随着 MN 个数的增加而呈线性减小趋势。如果设定 MN 个数为无穷大,相对于 MN 个数为 1 时可以大致减少 30% 到 50% 的跳步数,如果设置 MN 个数为 5~10 之间,大致可以减少 10% 到 20% 的跳步数,因此我们可以通过设置恰当的 MN 个数来减小外部因素对 DRG-ANS 算法的影响。在实际运用过程中,可以根据终端设备的实际情况设定 MN 个数,使之达到减小路由过程中的跳步数,从而达到节能的目的。

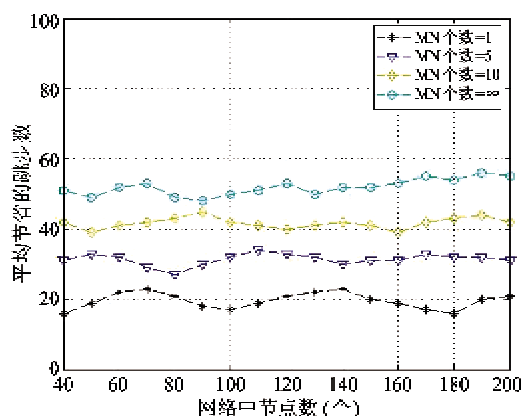


图 6 不同 MN 值情况下节省的跳步数

图 7 将网络剩余能耗比例作为衡量整个网络能耗性能的度量和反映网络能量消耗快慢的程度。网络剩余能耗比例表示当前所有节点剩余能量之和与网络初始总能量之比。由图 7 可知上述 3 种算法在不同网络运行时间段的网络剩余能耗情况。随着数据传输量的增加及网络时间的延长,此 3 种算法通过建立路由机制和确定路由过程中的跳数对数据进行传输,在此过程中网络总剩余能耗均呈现逐渐减少的趋势,但相对而言,DRG-ANS 算法在有效的网络周期中消耗的能量要小于其它 2 种算法。由此可知,DRG-ANS 算法采用的基于模糊决策的最优节点分析模型及创建最优目标组的方法在网络剩余能耗这个指标上起到了一定优化作用,较其它算法,本文采用的算法在保证数据传输的同时,通过对路由路径的选择,能够保证稳定的网络能耗特性。

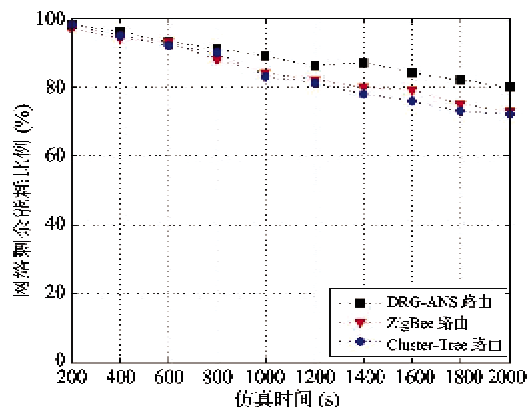


图 7 网络剩余能量

4 结论

本文分析了当前 ZigBee 路由算法存在的问题,在此基础上结合 ZigBee 网络特有的寻址方式和一些相关特性,提出了基于模糊决策的最优节点分析模型,通过增加路由过程中创建目标组的方式,对现有路由算法进行了一定改进。最后,通过仿真实验论证了在路由计算的耗费上,特别是当目标节点是协同节点的情况下,DRG-ANS 路由算法相对于原始路由算法有着明显降低,如果目标节点是一个随机节点,本文算法相对于传统路由算法也有着较大的优势。其仿真结果同时也依赖于网络中节点的分布等这些外部因素,但无论如何,DRG-ANS 算法受外部因素的干扰对性能的影响要小于传统的路由算法。在现实应用过程中若要减少外部因素的影响,在条件允许的情况下可以将节点最大邻接节点数尽可能设置得大一些,以此来降低这些因素对路由算法的影响。该算法适用于对网络生存期有着严格要求的应用场景,尤其是可以满足精准农业中对农田环境长时间无人值守监控的需求。

参考文献

- [1] 张庆波,禹继国,王光辉. 基于均匀分簇的 2-控制划分近似算法. 软件学报, 2011, 22(1): 165-174
- [2] Park K J, Kim L Y, Hou J C. Adaptive physical carrier sense in topology-controlled wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(1): 87-97
- [3] 张小波,程良伦, Zhu Q M. 一种基于分簇的无线传感器网络路由控制算法. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 2013-2016
- [4] Yang J, Zhang D Y, Zhang Y Y, et al. Cluster-Based data aggregation and transmission protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010, 21(5):

- 1127-1137
- [5] Cao X H, Chen J M, Zhang Y, et al. Development of an integrated wireless sensor network micro-environmental monitoring system. *ISA Transactions*, 2008, 47(3):247-255
 - [6] Sheng Z, Leung K, Ding Z. Cooperative wireless networks: from radio to network protocol designs. *IEEE Communication Magazine*, 2011, 49(5): 64-69
 - [7] Han J, Lee H, Park K R. Remote-controllable and Energy-Saving Room Architecture based on Zigbee Communication. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55:264-268
 - [8] Liu Y H, Zhang Q, Ni L M. Opportunity-based topology control in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(3): 405-416
 - [9] Zhang H, Shen H. Energy-efficient beaconless geographic routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(6): 881-896
 - [10] Yen L H, Tsai W T. Flexible Address Configurations for Tree-Based ZigBee/IEEE 802. 15. 4 Wireless Networks. In: Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Japan, 2008, 14:395-402

A ZigBee-based energy saving routing algorithm for farmland wireless sensor networks

Zhao Chunjiang * ** ***, Wu Huarui * ** ***, Zhu Li * **

(* National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

(** Key Laboratories for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

(*** Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

Abstract

The study aimed to find an effective energy-saving routing strategy for the application of wireless sensor networks to the monitoring of farmland micro climate and soil moisture. Aiming at the disadvantages of the layered tree routing algorithm and ZigBee routing algorithms in energy saving, an optimal node analysis model based on fuzzy decision was established according to ZigBee networks' topology characteristics, and then a new energy-saving routing algorithm suitable for a large-scale, gradual changing farmland environment was put forward. This new algorithm finds out the quantitative relation between the energy consumption and the routing node selecting strategy, and greatly decreases the route hop number by the routing discovery mechanism and the creation of an optimum goal group. The simulation results show that compared with the layered tree and ZigBee routing algorithms, the new routing algorithms can significantly reduce the energy consumption in the routing process.

Key words: wireless sensor networks, routing algorithm, goal group, energy-economical