

文章编号:1671-251X(2015)11-0043-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.11.011

董立红,鲁翔宇.井下带状环境中无线传感器网络路由协议研究[J].工矿自动化,2015,41(11):43-47.

井下带状环境中无线传感器网络路由协议研究

董立红, 鲁翔宇

(西安科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对用于井下矿压监测系统的无线传感器网络节点呈带状静态分布的特点,以最小跳数路由协议为研究对象,对其路由创建阶段、数据传输阶段、维护更新阶段进行改进,提出了一种节点能量分级的最小跳数路由协议。该路由协议通过对节点能量分级处理的方式,减少了控制分组和数据传输路径的冗余量。仿真结果表明,该路由协议的网络生存期、数据分组平均端到端时延以及控制分组百分比比较传统的定向扩散协议及最小跳数路由协议有明显改善。

关键词:矿压监测;井下带状环境;无线传感器网络;最小跳数路由协议;节点能量分级处理

中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2015-11-02 14:54

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151102.1454.011.html>

Research of routing protocol of wireless sensor network in underground strip environment

DONG Lihong, LU Xiangyu

(School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: For static strip distribution characteristic of wireless sensor networks nodes used in underground pressure monitoring system, the minimum hop count routing protocol was taken as a research object and improved in route creation phase, data transfer phase and maintenance update phase. An improved routing protocol named the minimum hop count based on node energy classification was put forward. The improved routing protocol reduces control group and redundancy of data transmission path by grading the node energy. The simulation result show that the improved routing protocol has obvious advantages in extending life period of network, reducing average end delay of data packet and reducing percentage of control packets over the traditional directed diffusion routing protocol and the minimum hop count routing protocol.

Key words: mine pressure monitoring; underground strip environment; wireless sensor networks; the minimum hop count routing protocol; node energy classification

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)融合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理和通信技术^[1],可广泛应用于工业、军事、

交通等领域。将WSN用于井下矿压监测系统中,对提高煤矿事故预警能力、有效采集有线监控系统无法到达的盲区的压力数据以及提高煤矿生产的整体安全水平具有十分重要的意义。

井下环境复杂,自然条件恶劣,用于井下的

收稿日期:2015-09-01;修回日期:2015-10-10;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1261114);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(12JK0787);西安市科技创新支撑计划资助项目(CXY1009(4))。

作者简介:董立红(1968—),女,河北丰南人,教授,博士,研究方向为数据挖掘及数据处理技术、煤矿综合自动化,E-mail:1430315357@qq.com。通信作者:鲁翔宇(1991—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,研究方向为导航、制导与控制,E-mail:497475052@qq.com。

WSN 在应用过程中主要存在的问题:① 节点电源能量有限;② 节点通信能力有限;③ 节点计算和存储能力有限^[2]。其中节点电源能量有限是制约井下 WSN 生存能力的首要问题。考虑到井下矿压监测系统的 WSN 节点呈静态带状分布,上述问题可采用以下解决方法:① 优先考虑延长网络生存周期,通过节点轮流承担数据融合转发任务的方式来均衡能量消耗。② 通过节点间距离的不同,动态调整节点的发送功率;采用 WSN 节点多条路由的传输机制来提高节点间的通信能力。③ 利用有限的计算和存储能力来协调完成数据的采集和转发、融合和处理等功能。

目前井下 WSN 路由协议的研究重点集中在如何在节点能量有限的前提下延长整个网络的生命周期上。针对 WSN 路由协议能量均衡问题的研究,主要包括对节点能耗进行被动调节和主动调整 2 种方式^[3]。目前用于井下的 WSN 路由协议多采用被动调节方式,如低功耗自适应集簇分层型(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议^[4]和最小跳数(Minimum Hop Count, MHC)协议^[5]。

本文针对井下 WSN 特点,选择 MHC 路由协议为研究对象,在路由创建阶段、数据传输阶段和维护更新阶段对其进行改进,提出了一种节点能量分级的最小跳数(Minimum Hop Count Based on Node Energy Classification, MHC-NEC)路由协议。OPNET 仿真结果验证了该协议在网络生存期、数据分组平均端到端时延以及控制分组百分比等方面存在一定优势。

1 MHC 协议

1.1 协议选择依据

针对井下 WSN 节点呈静态带状分布的特点,得出适用于井下环境的 WSN 路由协议应满足以下条件:

(1) 该路由协议必须以数据为中心,能够针对特定兴趣消息对数据进行有选择的监测。

(2) 随着工作面的迁移,少数节点的移动会使局部网络拓扑结构发生变化,该路由协议必须能够及时更新路由信息来适应拓扑结构的变化。

(3) 井下各节点呈带状静态分布,使得各节点能耗不均匀。该路由协议必须支持数据整合技术,改善由于数据流向单一造成的能量消耗不均衡现象。

MHC 协议是在洪泛(Flooding)协议和定向扩散(Directed Diffusion, DD)协议基础上,依据跳数最小这一梯度建立的理念演变而来的。MHC 协议属于以数据为中心的平面路由协议,协议实现复杂度较低,支持相同兴趣消息融合处理,并且能够较快地适应局部网络拓扑结构的变化。因此,MHC 协议能够适用于井下带状分布的 WSN 中。

1.2 MHC 协议原理

在路由创建阶段,Sink 节点在全网范围内洪泛广播数据查询分组,通过查询分组中的跳数信息在全网范围内建立起从 Sink 节点(A—H)到各节点的最小跳数梯度场。路由创建过程如图 1 所示,HC 表示各节点到 Sink 节点的最小跳数。

在数据传输阶段,数据分组以跳数最小为约束条件,沿已建立好的梯度方向传递回 Sink 节点,数据传输方式仍为洪泛广播形式。

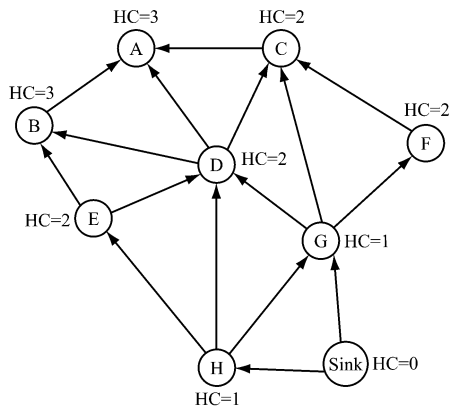


图 1 MHC 协议路由创建过程

1.3 MHC 协议研究

传统的 MHC 协议在一定程度上解决了 Flooding 协议的内爆和重叠现象,但仍然存在一些问题:传输路径仅考虑了跳数最小这一约束条件,没有考虑节点能耗,导致在整个网络中会产生一些由于能耗过快而过早死亡的节点;在网络拓扑发生变动的情况下,不能及时有效地对节点跳数值进行更新。基于以上问题,专家学者对 MHC 协议进行了相关改进。参考文献[6]对查询分组广播包采取延迟发送的方式来减少全网内的冗余数据分组,但在一定程度上牺牲了数据传输的实时性,不适用于对实时性要求较高的井下压力数据采集。参考文献[7]采用 RREP 报文侦听机制,使各节点主动洪泛广播,进而加入网络,提出了一种 Hello 包插队机制来控制关键节点能耗过快问题,并在数据传输阶段引入 ACK 报文确认机制来提高数据传输可靠性。参考文献[8]在最小跳数梯度场基础上建立剩余能

量最大梯度场,使得在数据传输阶段的能耗大大减少,但在梯度场建立阶段,整个网络要历经2次洪泛广播,导致能量消耗巨大。参考文献[9]根据普通节点到 Sink 节点的距离和节点通信半径不同,将网络划分为一簇同心圆环,并在参考文献[7]基础上对 ACK 报文确认机制进行了改进,但该协议未提出对能耗过快节点的应对方案。参考文献[10]针对矿用 WSN 路由协议,通过多方面优化成簇和簇头选举机制改善了簇头分布及热区问题,提出的局部协商策略有效解决了分簇路由中的重叠现象。

由以上研究可知,MHC 协议的各阶段仍有一定的改进空间。由于井下 WSN 节点呈带状静态分布,在数据传输过程中节点的能耗不均衡特点尤为突出,靠近 Sink 节点各节点由于承担了过多数据转发任务而过早死亡,导致能量空洞^[11]问题,使得整个网络的大部分能量被浪费。

2 MHC-NEC 路由协议

2.1 路由创建阶段

路由创建阶段主要完成最小跳数梯度场的初始化构建,在 Sink 节点发送初始化分组前设置其 HC 为 0,其他节点 HC 为任一最大跳数不可达到的常量,建立父节点、同级节点以及能量等级列表。构建的主要步骤如下:

(1) Sink 节点向全网范围内首次洪泛广播初始化分组,主要包括节点 ID、节点与 Sink 节点的最小跳数 HC、分组类型、位置信息、节点能量等级(根据节点剩余能量值划分为 3 个阶段:60%以上为正常阶段,30%~60%为低能阶段,30%以下为死亡阶段)。

(2) 节点首次收到初始化分组后,将自身 HC 初始值与分组中 HC 加 1 后的更新值对比,若更新值小于节点本身的 HC 初始值,则立即更新节点自身 HC 为分组中 HC 更新值,否则不对广播分组的内容做任何处理。节点完成 HC 更新后继续广播初始化分组。

(3) 其他节点接收到广播分组后,重复步骤(2)的操作,若节点不是首次接收到广播分组,则将自身 HC 与分组中 HC 相同的节点加入到同级节点列表,将自身 HC 比分组中 HC 大 1 的节点加入到父节点列表。

2.2 数据传输阶段

在数据传输阶段,数据分组沿组网阶段建立好的梯度方向反向传递。为了确保数据传输的准确

性,采用参考文献[7]中 ACK 确认机制的改进方法,其数据传输流程如图 2 所示。父节点主动向子节点回复 ACK 报文表示已收到数据包,若等待设定好的一段时间后父节点未回复,子节点主动向父节点列表中的其他节点发送 RERR 报文,父节点在收到 RERR 报文后,回复携带能量等级信息的 RREP 报文,子节点选择剩余能量在 60%以上的父节点向其发送数据。在下次传输数据时,子节点直接向上一次选定的父节点传输数据,直至父节点的能量等级处于低能阶段,该父节点主动发送 RREQ 报文,子节点在收到报文后,回复 RREP 报文,并选择能量等级为正常阶段的父节点进行数据传输。当所有父节点均处于低能等级时,重复以上选择方法,直至节点能量低于 30%。采取该种传输方式使得子节点不用在每次传输数据时重新选取下一跳父节点,大大降低了数据传输时延。

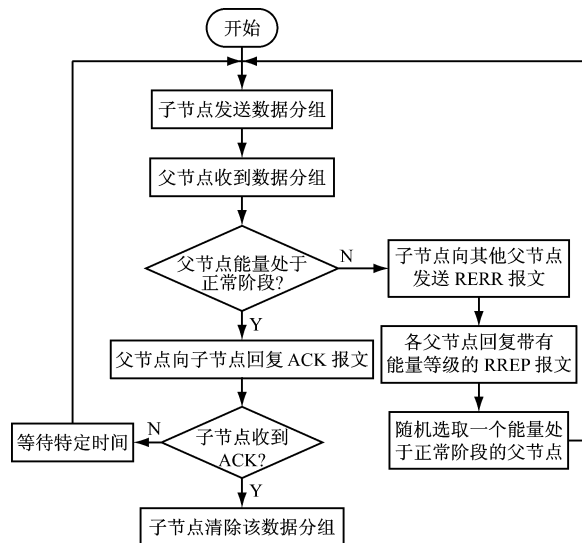


图2 MHC-NEC 路由协议的数据传输流程

2.3 网络维护更新阶段

当节点能量低于初始能量的 30%时,该节点主动向邻居节点发送 RERR 报文,报文信息包括节点 ID、剩余能量、节点与 Sink 节点的最小跳数 HC 等信息。邻居节点接收到报文后,从自己的同级节点列表或父节点列表中删除该节点并回复 RREP 报文,收到 RREP 报文的节点将进入休眠;当网络中有新节点加入时,新节点的初始 HC 值设为无穷大,并主动向邻居节点发送 RREQ 报文,使其更新自身的节点列表,从而快速加入到整个网络中。

2.4 数据传输路径

传统的 MHC 协议与 MHC-NEC 协议数据传输阶段的对比如图 3、图 4 所示, E 为 Sink 节点的剩余能量, $E_i(i=A, B, \dots, H)$ 表示第 i 个节点的剩余

能量。可看出 MHC 协议中 A 节点到 Sink 节点的传输路径为 $A \rightarrow C \rightarrow G \rightarrow \text{Sink}$, $A \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow \text{Sink}$, $A \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow \text{Sink}$, B 节点到 Sink 节点的传输路径为 $B \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow \text{Sink}$, $B \rightarrow D \rightarrow H \rightarrow \text{Sink}$, $B \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow \text{Sink}$ 。在综合考虑跳数和节点剩余能量后,由于 MHC-NEC 协议采用了剩余能量分级处理机制,数据从 A, B 节点向 Sink 节点的传输路径均由原来的 3 条减少到了 1 条。

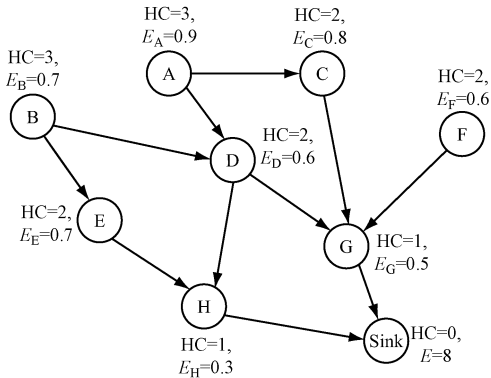


图 3 MHC 协议数据传输路径

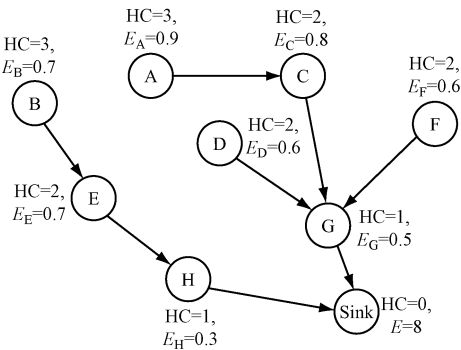


图 4 MHC-NEC 协议数据传输路径

3 协议仿真与分析

采用 OPNET 仿真软件,从网络生存期、数据分组平均端到端时延、控制分组百分比 3 个方面对 MHC-NEC 协议进行仿真。WSN 节点模拟井下带状分布的特点随机分布在 $500 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 范围内, Sink 节点位于该范围的正中间位置,初始能量设为无限大,其他各节点能量均设为 1 J 。各节点的通信半径为 30 m ,数据包长度为 $4\,096 \text{ bit}$,控制包长度为 256 bit 。仿真场景内的节点个数由 40, 80, 120, 160, 200 逐渐增加。采用参考文献[12]中的无线传输方式。

在距离为 d 的两端传输信息消耗的总能量为

$$E_{\text{Tx}}(k, d) = kE_{\text{elec}} + kd^2 E_{\text{amp}} \quad (1)$$

式中: E_{elec} 为接收电路和发送电路的能耗系数; k 为

传输的信息量; E_{amp} 为功率放大电路的能耗系数。

接收信息消耗总能量为

$$E_{\text{Rx}}(k) = kE_{\text{elec}} \quad (2)$$

DD 协议、MHC 协议以及 MHC-NEC 协议的网络生存期如图 5 所示。可看出在节点数目不同时, MHC-NEC 协议的网络生存期优于传统的 MHC 协议和 DD 协议,原因是 MHC-NEC 协议采用了改进的 ACK 确认机制而非传统的洪泛广播方式,使得各节点的能耗更加均衡,从而延长了整个网络的生存期。

DD 协议、MHC 协议以及 MHC-NEC 协议的数据分组平均端到端时延如图 6 所示。可看出随着节点数量的不断增加, 3 种协议的数据分组平均端到端时延都呈现大幅上升趋势,但 MHC-NEC 协议相对于其他 2 种协议仍具有一定优势,原因是 MHC-NEC 协议采用了节点剩余能量分级处理策略,大大减少了因考虑下一跳节点的剩余能量问题而需要对父节点列表中的节点进行逐一查询的工作总量,从而降低了数据分组平均端到端时延。

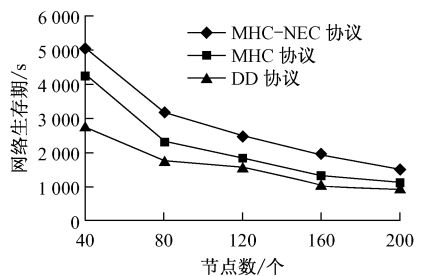


图 5 3 种路由协议的网络生存期

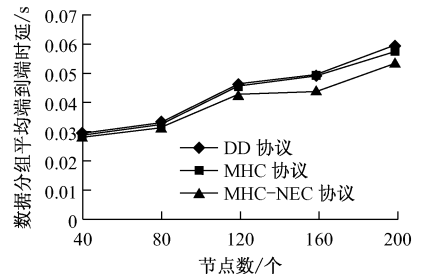


图 6 3 种路由协议的数据分组平均端到端时延

DD 协议、MHC 协议以及 MHC-NEC 协议的控制分组百分比如图 7 所示。可看出 MHC-NEC 路由协议相对于其他 2 种协议,因采用了 RREQ 和改进的 ACK 确认机制,降低了控制分组传播次数的冗余,从而降低了控制分组百分比。

4 结语

井下 WSN 节点呈带状静态分布,传统的 WSN 路由协议不能很好地适用于井下。提出的 MHC-

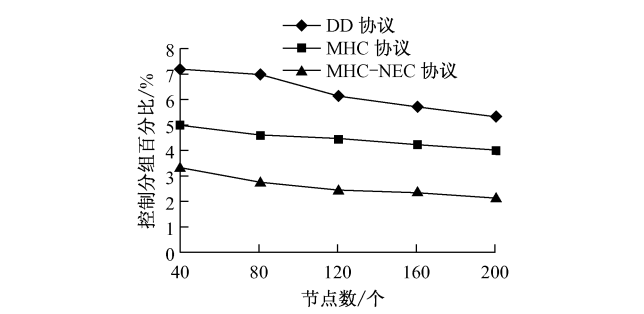


图 7 3 种路由协议的控制分组百分比

NEC 协议采用节点能量分级思想,在节点的能量等级不发生改变的情况下,节点的下一跳父节点始终保持不变,使得整个网络的冗余控制分组大大减少,均衡了网络能耗,缩短了数据分组端到端时延。

参考文献:

[1] PATWARI N, ASH J N, KYPEROUNTAS S, *et al.* Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 54-69.

[2] 汪丹丹. 矿用无线传感器网络的研究与设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

[3] 夏旭, 黎望怀, 李登, 等. 煤矿采空区无线传感器网络路由协议研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(4): 32-37.

[4] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

[5] YEDAVALLI K, KRISHNAMACHARI B, RAVULA S, *et al.* Ecolocation: a sequence based technique for RF localization in wireless sensor networks[C]//Proceedings of Information Processing in Sensor Networks, Los Angeles, 2005: 285-292.

[6] 陈志泊, 徐孝成. 一种改进的基于跳数的无线传感器网络路由算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 83-85.

[7] 王坤赤, 郑月节, 徐晨, 等. 一种改进的无线传感器网络最小跳数路由协议[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(8): 52-56.

[8] 于磊磊, 柴乔林, 王春雷. 基于最小跳数的无线传感器网络能量自适应路由算法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(11): 236-238.

[9] 段文芳, 齐建东, 赵燕东, 等. 无线传感器网络最小跳数路由算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(22): 88-90.

[10] 吕振, 孙延飞, 李亚杰, 等. 一种综合优化的矿用无线传感器网络路由协议[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(4): 74-77.

[11] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 253-261.

[12] HEINZELMAN W B. Application-specific protocol architectures for wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 1(4): 660-670.