

一种改进的基于跳数的无线传感器网络路由算法

陈志泊 徐孝成

(北京林业大学信息学院 北京 100083)

摘要 路由协议设计是无线传感器网络的一个重要研究领域,可靠性、低开销和易于维护是无线传感器网络路由协议的设计目标,其中基于跳数的路由协议以其简易、有效的设计思路,一直以来得到广泛关注。在详细分析基于跳数的无线传感器路由协议发展现状的前提下,对最小跳数路由算法的组网和数据传播阶段加以改进。通过在OMNeT++仿真环境中与原始最小跳数协议、定向扩散协议的比较,验证了改进后的算法在可靠性、负载均衡、延长网络生命周期和低路由开销方面的优势。

关键词 无线传感器网络,路由算法,最小跳数,OMNeT++仿真

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Improved Minimum Hop Count Routing Protocol in Wireless Sensor Network

CHEN Zhi-bo XU Xiao-cheng

(School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Routing protocol design is an important research area in wireless sensor networks, and reliability, low-cost and easy to maintain are goals of WSN routing protocol design. Hop based routing protocol has been receiving extensive attention for its simple and effective design ideas. This paper analyzed hop based routing protocol in detail analysis, and then proposed an improved routing policy. Compared with MHC and DD in OMNeT++ simulation tool, the improved policy proves its strength in reliability, load balancing, extending network lifetime and low routing overhead.

Keywords Wireless sensor network, Routing protocol, Minimum hop count, OMNeT++ simulation

1 引言

随着传感器技术和无线通信技术的不断发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的相关研究备受人们的关注^[1]。无线传感器网络具有十分广阔的应用前景,在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、远程控制等许多领域都有重要的理论价值和巨大的实用价值。

能源严格受限以及网络结构的动态拓扑性是无线传感器网络的两个特点。基于以上因素设计的路由协议,一方面要求在网络能耗和数据可靠传输之间达到最佳平衡;另一方面要求节点在付出最小代价的前提下拥有动态组网能力,使其进一步服务于数据的有效传输^[2]。无线传感器网络路由协议可以分为泛洪式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议、基于位置信息的路由协议和基于 QoS 的路由协议 5 种类型^[3]。最短路径、分层和方位路由等思想都广泛应用于 WSN 路由算法的设计。其中以寻求最短路径为目标的基于最小跳数的设计思想是近年来研究的热点方向。

本文在分析原始最小跳数(Minimum Hop Count, MHC^[4])路由协议的特点和存在的问题基础上,提出了一种基于跳数的无线传感器网络路由算法。该路由算法继承最小跳数路由协议 MHC 的分阶段方法,将网络分为初始化阶段和数据传输阶段。在初始化阶段,延迟发送初始化分组,避免冗余发包,

减少组网能耗;在数据传输阶段,以父、兄弟节点表为选择集选取唯一下一跳,通过自定义的权值计算公式来维持网络负载均衡,避免特殊节点过早死亡。在动态组网方面,节点实时探测数据分组中的跳数字段,当跳数值不在合理范围时,立即重置自身跳数,触发路由更新,并有效地利用数据分组充当部分路由功能,在及时更新路由信息的同时最大程度地减小网络路由维护的开销。OMNeT++ 仿真验证了改进后的最小跳数路由协议在延长网络生命期、负载均衡、低路由开销等方面的优越性。

2 相关工作

无线传感器网络的路由算法研究是一个非常活跃的研究领域,基于跳数选择最优方案的路由思想是其中比较重要的研究方向。目前国内外提出了许多基于跳数的路由协议及其改进思想。

2.1 最小跳数路由协议

最小跳数路由协议是在定向扩散算法(Directed Diffusion, DD)和洪泛算法(Flooding)的基础上,引入跳数的概念而发展起来的,由于其新颖的构思而备受关注。该路由协议在传输数据时,以源节点到达 Sink 节点的跳数为根本依据确定传输路径,并且将路由过程理论性地分为梯度建立阶段和数据传输阶段,为后续的一些改进思想奠定了基础。

到稿日期:2012-06-29 返修日期:2012-10-18 本文受林业公益性行业科研专项项目(200904030)资助。

陈志泊(1967-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为数据库技术、计算机软件与理论、嵌入式系统开发等,E-mail:zhibo@bjfu.edu.cn;徐孝成(1987-),男,硕士生,主要研究领域为嵌入式、计算机网络。

在梯度建立阶段,首先由 Sink 节点以 flooding 方式向传感器网络发送查询分组,查询分组中包含 Sink 节点 ID 和距离 Sink 节点的最小跳数 HC(HC=0)等。相邻节点收到 Sink 节点的查询分组后,将分组中的 HC 值加 1 与自身 HC 值(初始值为无穷大)进行比较,如果新的 HC 值小于原来存储的 HC 值,则用新值替换原来存储的 HC 值,然后修改查询分组中的节点 ID 和 HC 值,并将修改后的查询分组以 flooding 方式转发出去;若新值大于自身 HC 值,则不作处理。经过上述处理过程,最终建立的最小跳数场如图 1 所示。

在数据传输阶段,节点采集到数据之后,数据以受控 flooding 方式传向 Sink 节点,只有父节点(HC 值小 1)的节点才会转发数据分组,这样数据在网络中就向着 Sink 节点的方向移动,如图 2 所示。

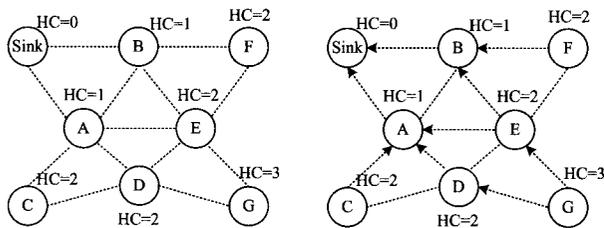


图 1 梯度建立阶段

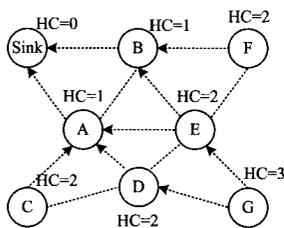


图 2 数据传输阶段

最小跳数路由协议以 Sink 节点周期性洪泛发起路由更新,网络拓扑维护的开销巨大,并且在下次更新路由前新加入的节点不能及时有效地组网。在数据传输阶段,通过全部父节点转发数据(例如图 2 中 G 点产生的数据分组会由 E、D 节点转发)会在网络中产生过多冗余分组,加速了全网能量消耗。针对最小跳数路由协议的优点和存在的问题,国内外研究者从多个角度提出了相关的改进方法。

2.2 相关改进方案

文献[5]针对 MHC 协议,在梯度建立阶段加以优化,即节点接收到初始化分组后并不立即转发分组,而是等待特定时间后广播包含自身跳数信息的初始化分组,从而减少该阶段全网的冗余分组,但在数据传输阶段和动态组网方面没有提出优化策略。文献[6]在节点中使用邻居表来记录所有邻居节点信息,节点依照父节点(跳数比自身小 1)、兄弟节点(跳数与自身相等)、子节点(跳数比自身大 1)顺序的优先级,随机挑选下一跳节点并转发数据分组。该策略虽然减少了数据传输阶段的冗余分组,增强了网络后期的数据传输质量,但采用随机挑选中继节点的机制会减弱网络的负载均衡能力,并且缺乏保证数据传输可靠性的机制。文献[7]提出在每个节点打开时,向周围节点发送 join 报文,周围节点接收到 join 报文后,将各自的跳数值返回给新加入的节点来完成梯度的建立与更新。该算法能避免通过周期性洪泛实现网络组建而造成的不必要的资源消耗并解决节点实时加入网络的问题,但同时回复 join 报文也增加了周围节点的能量消耗。文献[11]揭示了无线传感网中存在着“热点区域”以及瓶颈节点,这些节点由于承担过多转发任务而过早死亡,影响了整个网络的数据传输能力。该文献提出两次梯度重建机制,第二次梯度建立过程中,节点根据周围邻居的平均跳数来确立自身归为哪一梯度,该设计思想避免了同一层节点能耗不均的情况,但使用两次洪泛组网,耗能较大,无形中增加了数据到达 Sink 的跳数,虽然减少了瓶颈节点的负载,但数据传输中消

耗的能量在一定程度上是增加的。

综上所述,针对目前基于跳数的无线传感器路由设计思想,数据传输阶段的选路策略还可以继续优化,尽可能地选择最优一跳中继节点。在处理路由更新问题上,以往的设计思想中并无过多提及,大多使用 Sink 节点周期性洪泛或者普通节点维护路由更新,使得网络维护的开销很大。

3 改进算法设计

改进后的算法称为 R-MHC,其适用环境是区域内均匀、随机分布的一定数量的传感器节点,唯一的 Sink 节点连接终端设备的网关,全网其他普通节点以 Sink 节点为最终数据接收端。算法分为初始化阶段和数据传输阶段。

3.1 初始化阶段

算法的初始化阶段主要完成梯度场的首次建立,梯度场建立之前初始化 Sink 节点 HC=0,其他节点的 HC 值置为无穷大,并建立父、兄弟节点表。初始化阶段的流程描述如下:

(1) Sink 节点发起组网过程,广播发送一次初始化分组,分组中包含主要字段:节点 ID、节点距离 Sink 节点的最小跳数 HC 值、节点当前剩余能量 Energy、链路质量指标 LQI 和接收信号强度 RSSI。

(2) 若节点首次接收到初始化分组,则开启延时计时器。

(3) 将分组放入备选队列,分组中 HC 值加 1 后得到新值,如果新值小于自身 HC,则将新值赋予自身 HC,否则,不做处理。

(4) 计时器超时,立即广播包含自身节点的 HC 值和节点 ID 信息的初始化分组。

(5) 查看备选队列,将队列中 HC 值比自身 HC 值小 1 的节点信息存入父节点表,将队列中 HC 值与自身 HC 值相同的节点信息存入兄弟节点表,对其他情况的节点信息则自动丢弃。其中,父、兄弟节点表中属性字段包含节点 ID、HC 值、节点剩余能量、LQI 值、RSSI 值等。

3.2 数据传输阶段

在数据传输阶段引入数据报文缓存和 ACK 机制,通过数据分组标识机制来完成梯度的维护和更新。

进入数据传输阶段后,节点将周期性采集相关数据,并且转发数据分组。源节点首先以跳数衡量,即父节点优先,在跳数相同的情况下综合考虑节点剩余能量、链路状态和接收信号强度的因素,并通过权值公式 $R = \alpha * Energy + \beta * LQI + \gamma * RSSI$ ($\alpha + \beta + \gamma = 1$) 选出权值最大的父节点为最优中继节点来转发数据分组,使网络负载比较均衡。中继节点在转发数据分组后回复给源节点 ACK 分组。节点收到父节点的 ACK 后,将数据报文丢弃,更新父节点表,否则从父节点表中选择另一个父节点或者从兄弟节点中选择一个节点来转发数据。如果节点转发数据分组之后的能量低于 30%,则将该节点从邻居节点表中删除,该节点进入睡眠状态。在数据传输阶段选择唯一路径转发数据,避免了冗余分组,ACK 机制既是协议可靠性的保证,也可以协助及时更新路由表项。

由于节点能量消耗、新节点的加入等原因导致拓扑改变,节点最初维护的路由梯度表不能有效地适用于整个网络生存期。在 R-MHC 算法中针对路由梯度维护、更新方面设计了数据分组标识机制,即在数据分组中设立布尔类型字段 update,默认设置为 FALSE。在进入数据传输阶段后,当节点

接收到数据分组后,则查看 HC,如果 $HC \geq HC_{\text{自身}} + 2$ 或者 $HC \leq HC_{\text{自身}} - 2$,表明节点接收到了父节点、兄弟节点、子节点以外节点的数据,网络拓扑已经发生了改变。此时触发路由更新,从节点表中选择下一跳,设置下一待发送数据分组的 update 字段为 TRUE,广播发送该分组,清空自身父、兄弟节点表。邻居节点在接收到字段 update 设置为 TRUE 的数据分组后,均会回复 ACK 标明自己的邻居身份,而只有唯一中继节点会转发该数据分组。以上路由维护和更新机制不仅可以有效保证路由的及时更新,还可以有效处理新加入节点和节点梯度改变的动态组网问题。若有新节点加入,此时的情况是全网的初始化梯度建立阶段已经完成,全网已不存在初始化分组,但数据分组会在网络中流动,由于新加入节点的 HC 值设为无穷大,因此一定满足触发更新路由的条件,所以根据触发更新机制重新入网。

数据传输阶段的流程描述如图 3 所示。

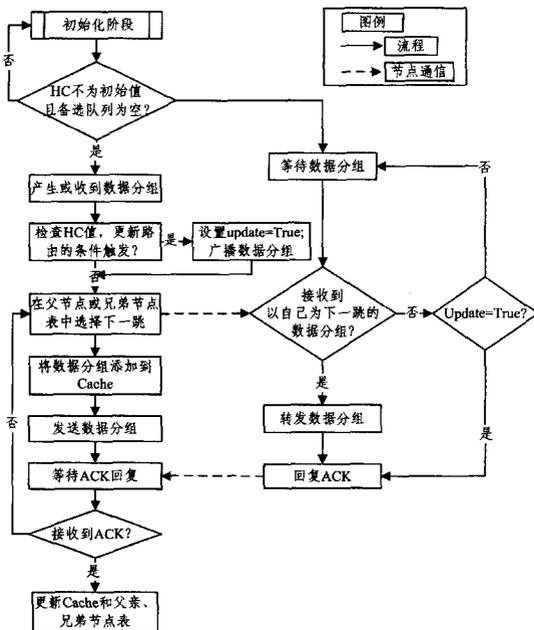


图 3 改进算法的数据传输阶段流程图

4 仿真实验结果分析

为对改进的路由算法设计进行验证,采用 OMNeT++ 4.1 仿真工具^[9]对原始最小跳数算法(MHC)、定向扩散算法(Directed Diffusion, DD)^[10]和 R-MHC 算法进行了分析比较。

仿真实验中测试区域节点数目为 35 个,其随机分布于 Sink 节点周围,节点信道延迟 100ms,数据分组长度 16 bytes,节点丢包率 5%,TTL(信息包最大路由跳数)为 8,设置节点初始化能量为 1000 个单位量,发送一个信息包消耗 1 个单位量,接收一个信息包消耗 0.5 个单位量,节点能量小于 300 个单位量则失去通信能力。

图 4 的仿真结果反映在不同的发包频率下 3 种算法的数据包平均能耗情况,即网络中数据分组到达 Sink 节点平均所消耗的能量。MHC 协议采取受控的洪泛方式,使得数据流向 Sink 节点,能耗较大;DD 协议通过网络控制消息建立梯度后选择最佳路径传递数据,能耗方面较 MHC 协议有所优化;R-MHC 协议采用了父节点、兄弟节点双向传递,在选路方面加入了新的负载均衡机制,与其他两种协议相比,在数据包平均能耗上达到最优。

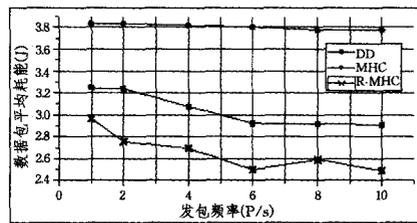


图 4 3 种算法平均能耗情况对比

图 5 的仿真结果反映在不同的发包频率下 3 种算法的数据包网络维护代价情况,即全网产生的维护性分组(如初始化分组,路由分组等)与全网产生的数据分组的比例值。MHC 协议通过周期性的洪泛方式维护网络,代价较高;DD 协议采用请求驱动式的数据传送模式,网络维护代价较 MHC 协议有所优化;R-MHC 协议在梯度建立阶段采用延时发送初始化分组避免冗余,组网后,通过侦听接收到的数据分组中的跳数信息,触发路由更新,并且以数据分组作为路由更新包的一部分,最大程度上降低了路由维护代价。

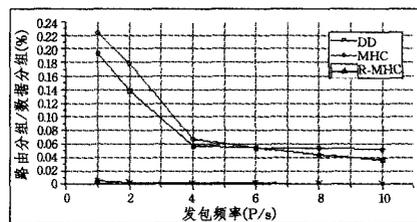


图 5 3 种算法网络维护代价情况对比

图 6 的仿真结果反映在不同的发包频率下 3 种算法的网络生存时间。综合评定各个协议性能,R-MHC 协议在增加网络生存时间上优于其他两种协议,但同时也看到,随着发包频率的增加,各个协议所维持的网络生存时间趋于相同,原因在于网络中信息包密度过大,各种保障机制的优势不再明显。

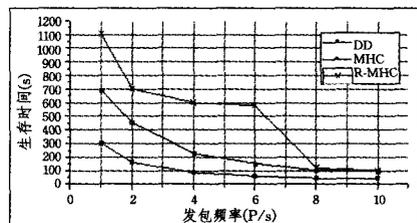


图 6 3 种算法网络生存时间对比

结束语 本文通过分析以往基于最小跳数的无线传感器路由协议的优点和不足,提出了自己的改进方案,最后通过仿真实验在协议性能上与 MHC、DD 协议进行了对比,仿真结果表明改进算法在延长网络生命期、负载均衡、低路由开销等方面具有优越性。针对大规模网络环境以及网络拓扑实时变化的动态网络环境的可靠路由协议设计,将是下一阶段的研究重点。

参考文献

- [1] 谭勋. 无线传感器网络理论与技术应用[M]. 北京:机械工业出版社,2011
- [2] 余勇昌,韦岗. 无线传感器网络路由协议研究进展及发展趋势[J]. 计算机应用研究,2008,25(6):1616-1621
- [3] 赵强利,蒋艳凰,徐明. 无线传感器网络路由协议的分析与比较[J]. 计算机科学,2009,36(2):35-41

(下转第 114 页)

算法采用主动式修复策略,以有效地提高分组投递率。图5显示了各种算法随着暂停时间变化的分组投递率,EMTCA算法的数据较平缓,原因也是该算法的能量均衡和移动预测机制。

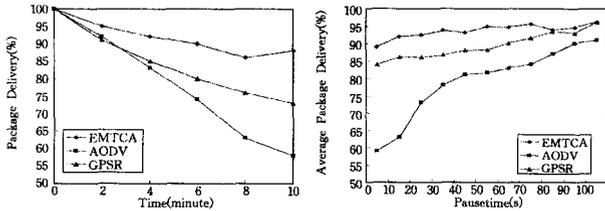


图4 随时间变化的分组投递率 图5 随暂停时间变化的平均分组投递率

图6显示了节点数量与路由控制开销之间的关系。随着节点数量增加,链路复杂性急剧增加,因此路由开销也增加,EMTCA算法需要进行移动预测和能量均衡控制,因此所需的路由开销也比其他算法多一些。EMTCA算法的总平均路由开销为1.81%,AODV算法的总平均路由开销为1.55%,虽然增加了0.26%,但是与平均传输功率、网络生命期和分组投递率等其他性能提高相比较,也是值得的。

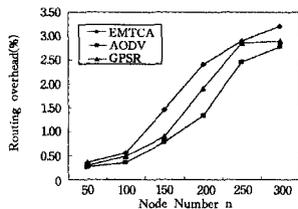


图6 不同算法的路由开销

通过仿真不同节点规模下网络的性能比较,可以发现EMTCA具备比较优秀的性能,可以较好地适应移动网络拓扑的需要,牺牲了一定的路由开销带来了网络平均生存周期和分组投递率的较大提升。

结束语 节省节点的能量,延长网络工作时间为无线 Ad hoc 网络设计的主要问题,EMTCA 算法通过评价链路的稳定性,在路由选择过程中选取稳定性更高的链路和主动式路由修复,有效地避免了由于节点移动导致的链路断裂对数据传输的影响,同时使用能量均衡机制避免了部分节点过度的能量消耗。通过仿真实验也表明,与其他算法相比,该算法在更好地适应 Ad hoc 网络节点移动变化和节点的能量有效使用的同时,减少了链路失效,提高了分组投递率,延长了网络的生命周期。

参考文献

[1] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-con-

strained Ad Hoc wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(4): 8-27

[2] Candes E J, Romberg J, Robust T T. Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Trans Inf Theory, 2006, 52(2): 489-509

[3] Li N, Hou J, Sha L. Design and analysis of an MST-based topology control algorithm[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 3(4): 1195-1206

[4] Singh S, Woo M, Raghavendra C. Power-aware routing in mobile ad hoc networks [C]//Proceeding of Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking, Mobicom 98. IEEE, 1998: 181-190

[5] Dongkyunk, Garcia, Acevesj, et al. Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(2): 161-173

[4] Li L, Halpern J Y, Bahl P, et al. A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2002, 1(13): 147-159

[5] Blough D, Leoncini M, Resta G, et al. The k-neighbors protocol for symmetric topology control in ad hoc networks[C]//Proc. of ACM MobiHoc. Annapolis, USA, June 2003: 141-152

[6] 沈中,常义林.无线 Ad hoc 网络中保留最小能量路径的拓扑控制算法[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2006,33(3): 342-349

[7] Tian Ye, Sheng Min, Li Jian-dong, et al. Energy-aware dynamic topology control algorithm for wireless ad hoc networks[C]//Proc. of IEEE Global Communications Conference (IEEE Globecom). New Orleans, Dec. 2008: 1-5

[8] 王文艳,王东.拓扑控制对 Ad hoc 网络能耗及生存期的影响分析[J].计算机工程与应用,2010,46(18): 83-85

[9] 王炫,李建东.拓扑控制对 Ad Hoc 网络性能的影响[J].计算机工程与应用,2006,6(33): 44-48

[10] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice(2nd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004

[11] Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless networks[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000

[12] 刘少伟,罗丹彦.能量均衡的无线传感器网络拓扑控制算法[J].电子科技大学学报,2010(39): 89-94

[13] 陈辉,巨永锋.基于能量均衡的 Ad hoc 网络拓扑控制技术[J].计算机与数字工程,2012(40): 1-5

[14] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless Networks[C]//Proceeding of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM press, 2000: 243-254

[15] 彭海英,蔚承英,唐红.无线自组网分级结构的性能与可扩展性研究[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2007,19(2): 172-176

(上接第 85 页)

[4] Han K H, Ko Y B, Kim J H. A novel gradient approach for efficient data dissemination in wireless sensor networks[J]. Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall, 2004, 60(4): 2979-2983

[5] Verbist F, Festjens N, Steenhaut K, et al. Hop count discovery protocol for gradient based routing in wireless sensor networks [C]// Communications and Electronics, 2006: 102-105

[6] Chang S-S, Huang C-H, Chang K-C. A Minimum Hop Routing Protocol for Home Security Systems Using Wireless Sensor

Networks[J]. Consumer Electronics, 2007, 53(4): 1483-1489

[7] 段文芳,齐建东.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

[8] Sun Li-min, Zhu Hong-song, Duan Bin. Analysis of Forwarding Mechanisms on Fine-Grain Gradient Sinking Model in WSN[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2007, 51(2): 145-159

[9] OMNeT++[EB/OL]. <http://www.omnetpp.org/>

[10] 李应娣,单志龙.无线传感器网络定向扩散路由协议研究[J].计算机技术与发展,2010,20(9): 40-43