

基于簇树的 6LoWPAN 无线传感器网络构建方案*

王晓喃

(常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘 要: 提出了基于簇树的 6LoWPAN 无线传感器网络构建方案, 此方案提出以簇内节点数量为度量参数的簇生成算法, 在簇生成算法中, 总是簇内节点总数最多的簇首节点首先发起簇的生成过程, 因此实现了簇首节点数量最小化。此外, 本方案还提出了簇首节点及簇关联节点移动或失效时的簇及簇树的修复算法, 即基于簇内节点的权值选举新的簇首节点或簇关联节点, 以维护簇或簇树的拓扑结构, 确保 IPv6 地址配置和路由的连续性及正确性。对本方案进行了性能分析, 分析结果验证了其构建的网络结构稳定性更强, 路由功耗更低。

关键词: 6LoWPAN 无线传感器网络; 簇; 簇首节点; 簇内节点; 簇树

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1533-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.092

Constructing 6LoWPAN wireless sensor networks based on cluster tree

WANG Xiao-nan

(Faculty of Computer Science & Technology, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China)

Abstract: The paper proposed a scheme for constructing 6LoWPAN wireless sensor networks based on the cluster tree. The scheme created the cluster generation algorithm based on the number of the cluster members, and in the algorithm, it was always the cluster head with the maximum number of the cluster members that first launched the cluster generation process, so that the total number of the cluster heads could reach to be minimum. In addition, the scheme also presented the cluster repair algorithm and the cluster-tree repair algorithm when the cluster heads or the cluster associate nodes move or fail. In the repair algorithm, the cluster member with the maximum weight was selected as the new cluster head or the new cluster associate node in order to maintain the cluster tree topology and to ensure the IPv6 address correctness and the routing continuity and accuracy. The paper analyzed the performance of the proposed scheme, and the experimental data shows that the proposed cluster tree topology is more stable, and the routing cost is lower.

Key words: 6LoWPAN wireless sensor network; cluster; cluster head; cluster member; cluster tree

实现 6LoWPAN 无线传感器网络首先需要解决的关键问题就是如何构建其体系结构, 使 IPv6 地址配置功耗及路由功耗更少, 延迟更短^[1]。目前, 有关 6LoWPAN 无线传感器网络构建方案的研究还处于起步阶段, 因此, 本文提出了基于簇树的 6LoWPAN 无线传感器网络构建方案, 其具有如下创新点:

a) 提出以簇内节点数量为度量参数的簇生成算法, 在该算法中, 总是簇内节点总数最多的簇首节点首先发起簇的建立过程, 因此实现了簇首节点数量最小化。在无线传感器网络中, 数据路由所经过的簇首节点数量越小, 其路由功耗越低, 路由延迟越短^[2,3]。

b) 提出了与 IPv6 互联网网络结构充分融合的 6LoWPAN 无线传感器网络簇树构建算法。6LoWPAN 无线传感器网络簇树结构分为两个层次, 簇首节点和簇关联节点构建的簇树以及簇首节点和簇内节点构建的簇, 簇树实现路由转发功能, 构建成 6LoWPAN 无线传感器网络路由骨干网。基于簇树结构, 6LoWPAN 无线传感器网络节点能够实现层次化地址配置, 即簇首节点通过簇树实现 IPv6 地址配置, 簇内节点通过加入簇实现 IPv6 地址配置。由于不同簇的簇内节点能够同时进行地址配置且重复地址检测只在本簇内进行, 因此缩短了地址配置延迟, 降低了地址配置功耗。此外, 由于簇首节点和簇关联节

点的数量最小化, 因此通过由簇首节点和簇关联节点组成的簇树实现路由, 降低了路由功耗, 缩短了路由延迟。

c) 提出了簇首节点及簇关联节点移动或失效时的簇和簇树修复算法, 即基于簇内节点的权值选举新的簇首节点或簇关联节点, 以维护簇树的拓扑结构, 确保地址配置和路由的连续性及正确性。

1 簇树

1.1 相关定义

本方案包括五类节点:

定义 1 孤立节点。既没有标记为簇首节点(或者簇内节点)也没有标记为簇关联节点的传感器节点。

定义 2 IPv6 接入路由器(IPv6 access router)。用于连接 6LoWPAN 无线传感器网络与 IPv6 网络, 使 6LoWPAN 无线传感器网络接入到 IPv6 互联网。

定义 3 簇首节点。实现路由转发功能, 簇内节点发送的数据首先发送到本簇簇首节点, 簇首节点再通过所在簇树将数据路由转发到目的节点。

定义 4 簇内节点。不实现路由转发功能(簇关联节点除外), 负责数据采集和监测。

定义 5 簇关联节点。用于连接两个簇首节点的簇内节点,实现路由转发功能,不接收本簇簇内节点发送的信息,只接收簇树中节点转发的数据,并负责路由转发。

孤立节点、簇首节点、簇内节点及簇关联节点的状态可互相转换。本方案中,6LoWPAN 无线传感器网络通过一个 IPv6 接入路由器接入到 IPv6 网络。为了使 6LoWPAN 无线传感器网络与 IPv6 互联网网络结构充分融合,且路由骨干网(即簇树)包含的节点数量最小化,本方案将一个 6LoWPAN 无线传感器网络划分为多个簇,每个簇由一个簇首节点和多个簇内节点组成,簇首节点之间直接通信或者通过簇关联节点进行通信,簇首节点、簇关联节点及 IPv6 接入路由器构建成树状结构,此树状结构称为簇树,其中,簇树的根节点为 IPv6 接入路由器,中间节点及叶子节点为簇首节点或簇关联节点。

6LoWPAN 无线传感器网络簇树结构具有如下优点:

a) 6LoWPAN 无线传感器网络簇树与 IPv6 互联网的网络结构充分融合,一个簇相当于 IPv6 互联网的一个子网,簇首节点与簇关联节点相当于 IPv6 路由器。基于簇树结构,6LoWPAN 无线传感器网络节点能够实现层次化地址配置。即簇首节点通过簇树实现 IPv6 地址配置,簇内节点通过加入簇实现 IPv6 地址配置,由于不同簇的簇内节点能够同时进行地址配置且重复地址检测只在本簇内进行,因此缩短了地址配置延迟,降低了地址配置功耗。此外,由于簇首节点和簇关联节点的数量最小化,因此通过由簇首节点和簇关联节点组成的簇树实现路由,降低了路由功耗,缩短了路由延迟。

b) 簇内节点只与本簇簇首节点进行通信,避免了簇内泛洪。

c) 簇首节点和簇关联节点的数量远小于网络中所有传感器节点的数量,通过少量簇首节点和簇关联节点组成的簇树进行路由,路由延迟更小,路由功耗更低。

1.2 主要数据结构

加入簇控制帧(join_C):由簇首节点向一跳范围内的孤立节点发送控制帧,以邀请孤立节点加入簇首节点所标志的簇。

加入簇确认控制帧(ack_C):此帧是孤立节点对簇首节点发送的 join_C 控制帧的应答帧,以确认加入簇首节点所标志的簇,成为簇内节点。

加入簇树控制帧(join_T):由簇首节点或簇关联节点向一跳范围内的 IPv6 接入路由器或已经加入簇树的簇首节点或簇关联节点发送的控制帧,以请求加入簇树。

加入簇树确认控制帧(ack_T):此帧是 IPv6 接入路由器或已经加入簇树的簇首节点或簇关联节点对接收到的 join_T 控制帧的应答控制帧,以确认加入簇树。

本方案中,传感器节点的链路地址为其 ID 值。

1.3 簇的产生

初始状态下,6LoWPAN 无线传感器网络中的传感器节点均处于孤立状态且具有网络唯一性的 ID,同时保存一个邻居节点记录表,记录表项包括两个域:邻居节点 ID 值及邻居节点所处状态。IPv6 接入路由器及 6LoWPAN 无线传感器网络节点在其一跳范围内定期广播 beacon 帧^[4],帧负载为节点的当前状态、其邻居孤立节点的数量、邻居节点总数量以及在簇树中的深度值。其中,簇内节点在簇树中的深度值为其所在簇簇首节点在簇树中的深度值,没有加入簇树的簇首节点在簇树中的深度值为 -1。传感器节点通过接收邻居节点发送的 beacon

帧建立其邻居节点记录表。

本方案中,孤立传感器节点 X 收到邻居节点 N 发送的 beacon 帧后,如果节点 X 的邻居节点列表中不包含节点 N 的信息,它则将节点 N 加入到邻居列表中。如果节点 X 在规定时间内没有收到邻居列表中节点 N 的 beacon 帧,那么它则将节点 N 从邻居节点列表中删除。孤立传感器节点 X 建立邻居列表后,如果它的邻居节点包含簇首节点,则它选择加入 ID 值最小的簇首节点所标志的簇;否则如果节点 X 的孤立邻居节点数量大于其所有孤立邻居节点的孤立邻居节点总数(或孤立邻居节点总数相等且节点 X 的 ID 值最小),节点 X 开始建立簇。孤立传感器节点 X 建立簇的过程描述如下:

a) 孤立传感器节点 X 向邻居列表中所有处于孤立状态的传感器节点发送 join_C 命令帧。

b) 在规定时间内,如果孤立邻居传感器节点收到多个孤立传感器节点发送的 join_C 命令帧,则对比多个 join_C 命令帧的源 ID,向源 ID 最小的孤立传感器节点 X 返回一个 res_C 命令帧。

c) 在规定时间内,如果孤立传感器节点 X 收到的 res_C 命令帧的数量等于其邻居列表中处于孤立状态的传感器节点数量,则向所有孤立邻居传感器节点返回一个 ack_C 命令帧,同时将自己标志为簇首节点;否则节点 X 仍然保持孤立状态。

d) 在规定时间内,如果孤立邻居传感器节点收到了节点 X 返回的 ack_C 命令帧,它则将自己标志为簇内节点,同时记录下本簇簇首节点 X 的 ID;否则仍然保持孤立状态。

e) 簇建立过程结束。

1.4 簇树的构建过程

如果簇内节点收到已经加入簇树的邻居簇首节点或者邻居簇关联节点发送的 beacon 帧,则将邻居节点总数最大的 beacon 帧转发给本簇簇首节点。在规定时间内,如果簇首节点 H 收到多个已加入簇树的邻居簇首节点或者邻居簇关联节点发送的 beacon 帧,则它采用如下步骤加入簇树:

a) 簇首节点 H 查看收到的 beacon 帧,向邻居节点总数最大且已加入簇树的邻居簇首节点或者邻居簇关联节点 F 发送 join_T 控制帧。

b) 节点 F 收到 join_T 控制帧后,将节点 H 作为自己的子节点并记录下其 ID 值,同时向节点 H 返回一个 ack_T 控制帧。

c) 节点 H 收到 ack_T 控制帧后,将节点 F 作为自己的父节点并记录下其 ID 值。

d) 节点 H 成功加入簇树。

1.5 簇树的修复算法

本方案中,一个簇的簇首节点或簇关联节点在加入簇树或获取新的子节点后,需要向簇内节点广播新的父节点或子节点的 ID 值。簇内节点收到广播后会记录下本簇簇首节点或簇关联节点新的父节点或子节点的 ID 值。假设传感器节点电池不可更换,当传感器节点电量小于预定值时,本方案认为此节点失效。

簇首节点 H(簇关联节点 M)失效或者移动后,簇内节点根据如下算法重新选举新的簇首节点(或新的簇关联节点)以维持簇树的拓扑结构:

a) 如果簇内节点在规定时间内没有收到其所在簇簇首节点 H(簇关联节点 M)发送的 beacon 帧,则它认为簇首节点 H(簇关联节点 M)失效或者移动,同时计算自己的权重值。如果权重值不为 0,它则在簇内广播 weigh 控制帧,帧负载为其权重值以及簇首节点 H(簇关联节点 M)的 ID 值。

b) 簇内节点收到 weigh 控制帧后,如果它的权重值大于 weigh 控制

帧负载中的权重值,则它在簇内广播自己的 weigh 控制帧。

c)簇内节点 X 广播 weigh 控制帧后,如果在规定时间内没有收到其他簇内节点广播的 weigh 控制帧,则它将自己标志为簇首节点(簇关联节点)并广播 new_head 控制帧(new_associate 控制帧),帧负载为簇首节点 H 的 ID 值(簇关联节点 M 的 ID 值)。

d)簇内节点收到节点 X 的 new_head 控制帧(new_associate 控制帧)后,将本簇簇首节点的 ID 值(簇关联节点 M 的 ID)更新为节点 X 的 ID 值,原来簇首节点 H (簇关联节点 M)的父节点和子节点收到 new_head 控制帧(new_associate 控制帧)后,将相应的子节点或父节点的 ID 值更新为节点 X 的 ID 值。

e)新的簇首节点(簇关联节点)选举完成。

2 性能分析

本文选择两个具有代表性且性能较好的典型簇树构建算法 LCCLID^[5]及 RLID^[6]与本方案进行性能对比分析,性能参数包括簇树拓扑结构的稳定性、簇树中簇首节点或簇关联节点保存路由信息所占用的内存代价,以及路由更新消息的代价。在 LCCLID 及 RLID 中,簇网关节点等同于本方案中的簇关联节点。实验的仿真环境为 NS-2,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	取值
仿真区域	500 m × 500 m
节点数量	50 ~ 150
节点通信范围	120 ~ 220 m
节点移动速度	10 ~ 60 m/s
节点移动方向	360°, 采用随机移动模型 ^[7]
节点停顿时间	10 s
路由更新消息的间隔时间	5 s
仿真时间	900 s

实验数据表明,本方案的性能优于 LCCLID 及 RLID,其主要原因分析如下:

a)LCCLID 中,两个簇之间的公共节点都被标志为簇网关节点加入到簇树,因此增加了簇树的节点数量;RLID 及本方案中,两个簇之间的公共节点只有一个被标志为簇网关节点(或簇关联节点),减少了簇树的节点数量,因此簇树的拓扑结构更稳定,路由代价更小。

b)LCCLID 的簇树构建算法中,两个簇首节点之间的最小距离为 1 跳^[5];RLID 及本方案的簇树构建算法中,两个簇首节点之间的最小距离为 1.4 跳,因此簇树拓扑结构更稳定,路由代价更小。

c)LCCLID 及 RLID 的簇及簇树构建算法没有考虑簇内节点最大化的问题,即没有实现簇首节点的最小化;本方案提出了以簇内节点数量为度量参数的簇生成算法,在簇生成算法中,总是簇内节点总数最多的簇首节点首先发起簇的建立过程,实现了簇首节点数量最小化,从而减少了簇树节点的数量,因此,构建的簇树拓扑结构更稳定,路由代价更小。

3 结束语

本文提出了基于簇树的 6LoWPAN 无线传感器网络构建方案,基于提出的簇生成算法,提出了与 IPv6 互联网网络结构充分融合的簇树构建算法及簇树修复算法。本文对该方案的性能进行了对比分析,分析结果验证了本方案构建的簇树结构稳定性更强,路由代价更小。

参考文献:

- [1] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. RFC 4919, 6LoWPAN: overview, assumptions, problem statement, and goals[S]. [S. l.]: IETF, 2007.
- [2] GAN C, JANTTI R. Link-state clustering based on IEEE 802. 15. 4 MAC for wireless Ad hoc/sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2006:499-504.
- [3] ALZOUBI K, LI X Y, WANG Y, et al. Geometric spanners for wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2003, 14(4):408-421.
- [4] IEEE Computer Society. IEEE Standard 802. 15. 4, Part 15. 4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs) [S]. 2007.
- [5] CHIANG C C, WU H K, LIU W, et al. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel[C]//Proc of IEEE Singapore International Conference on Networks. 1997:197-211.
- [6] LI Long-sheng, LEE G C, WANG Wei-zan. A root-based strategy for constructing a clustered MANET in all-IP networks[J]. Computer Standards & Interfaces, 2009, 31(4):699-706.
- [7] CAMP T, BOLENG J, DAVIES V. A survey of mobility models for Ad hoc network research[J]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2002, 2(5):483-502.
- [8] CUOMO A F, LUNAA S D, CIPOLONE E, et al. Topology formation in IEEE 802. 15. 4: cluster-tree characterization[C]//Proc of the 6th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. 2008:276-281. 2009.
- [9] YU C W, CHANG C C, CHOU J H. Minimizing the number of clusters in IEEE 802. 15. 4 wireless sensor networks[C]//Proc of the 1st International Workshop on Wireless & Mobile Networks. 2009.
- [10] GUPTA A, De CLAUZADE De MAZIEUX A D, BECKER M. Effect of topology on the performance of mobile heterogeneous sensor networks [C]//Proc of the 6th Annual Mediterranean Ad hoc Networking Workshop. 2007:100-105.
- [11] MA J, GAO M, ZHANG Q, et al. Localized low-power topology control algorithms in IEEE 802. 15. 4-based sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 2005:27-36.
- [12] CHEN Y S, LIN T H. A QoS routing protocol using cluster-mesh-tree for IEEE 802. 15. 4 low-rate WPANs[C]//Proc of WASN. 2005.
- [13] HONG X, XU K, GERLA M. Scalable routing protocols for mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Network, 2002, 16(4):11-21.
- [14] IWATA A, CHIANG C C, PEI G, et al. Scalable routing strategies for Ad hoc wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8):1369-1379.
- [15] HOU T C, TSAI T J. Adaptive clustering in a hierarchical Ad hoc network[C]//Proc of the Workshop on Computer Networks, Internet, and Multimedia. 1998:171-176.
- [16] ROYER E M, TOH C K. A review of current routing protocols for Ad hoc mobile wireless networks [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(2):46-55.
- [17] PERKINS C E, BHAGWAT P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers[C]//ACM SIGCOMM Computer Communication Review. New York: ACM Press, 1994:234-244.