

无线传感器网络IPv6地址自动配置方案

王晓喃¹, 高德民², 钱焕延²

(1. 常熟理工学院计算机科学与工程学院 江苏 常熟 215500; 2. 南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

【摘要】提出一种无线传感器网络IPv6地址自动配置方案, 该方案将无线传感器网络划分为多个簇, 针对簇首节点和簇内节点分别给出了相应的IPv6地址格式, 并采用哈希函数除余数法为簇首节点和簇内节点分配IPv6地址, 采用线性探测法解决IPv6地址冲突问题。从重复地址检测开销、地址配置总开销及地址配置总延迟时间三个方面对该方案与现有方案的性能参数进行了比较分析, 验证了此方案的有效性和高效性。

关键词 地址自动配置; 簇; 簇首节点; IPv6地址; 无线传感器网络

中图分类号 TP393.03

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.03.019

A Scheme on IPv6-Address Configuration for WSN

WANG Xiao-nan¹, GAO De-min², and QIAN Huan-yan²

(1. School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology Changshu Jiangsu 215500;

2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science & Technology Nanjing 210094)

Abstract The paper proposes an IPv6-address auto-configuration scheme for wireless sensor networks. In the scheme, one wireless sensor network is divided into a few clusters and the IPv6 address structures for a cluster head and a cluster member are proposed. By adopting Hash division method, IPv6 addresses for cluster heads and cluster members are allocated and the linear probing is used to solve address collision. The performance parameters of the proposed scheme, including duplicate address detection cost, address configuration cost, and address configuration delay time, are analyzed. The experimental results show that the proposed scheme is effective and efficient.

Key words address configuration; cluster; cluster head; IPv6 address; wireless sensor network

随着下一代网络的不断成熟和发展, 无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)与下一代网络实现全IP通信已成为未来发展的必然趋势^[1-2]。

实现WSN与下一代互联网全IP通信需要解决的关键技术之一是WSN的IPv6地址自动配置^[1,3]。IPv6地址自动配置可以在无人干预的情况下为每个接口配置具有唯一性的IPv6地址, 该特性与WSN自组织、自配置的设计目标一致。但在资源有限的WSN中实施现有的IPv6地址自动配置方式还存在一些问题, 如现有的有状态地址配置方案采用服务器/客户端的通信方式分配IPv6地址, 会带来大量的控制包开销; 在现有的基于邻居发现协议的无状态地址配置方案中, 每个被分配的IPv6地址都需要在整个WSN中进行重复地址检测以确保其唯一性, 同样导致大量的控制包开销。因此, 针对资源有限的WSN, 需

要建立一种低开销的IPv6地址自动配置方案。文献[4]提出了一种分布式的、基于地理位置信息的传感器网络地址配置方案, 该方案是建立在IPv4基础之上的。文献[5]提出利用三原色坐标实现IPv6地址自动配置, 该方案的重复地址检测开销很小, 但扩展性有限, 此外, 当传感器节点密度增加时, 重复地址检测的开销也会随之大幅度增加。文献[6]提出采用分布式地址分配表统一管理地址分配, 但集中式的管理需要消耗大量的存储资源, 不适合存储资源有限的无线传感器网络使用。文献[7]提出了针对无状态IPv6地址自动配置的重复地址检测方案, 但会产生大量的控制包开销, 并不适合网络资源有限的WSN使用。文献[8]提出了一种基于查询机制的重复地址检测方案, 采用泛洪方式进行重复地址检测, 但会导致大量的网络开销。文献[9]对文献[8]中的重

收稿日期: 2009-11-11; 修回日期: 2010-11-24

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009133)

作者简介: 王晓喃(1973-), 女, 博士后, 副教授, 主要从事下一代网络协议与体系结构方面的研究。

复地址检测方案进行改进, 降低了重复地址检测的开销, 但延迟时间有所增加, 可靠性有所降低。文献[10]提出了一种分布式动态地址配置协议, 在该协议中, 每个节点保留一个未分配的IP地址集, 新加入网络的节点从该地址集中分配IP地址, 节点离开网络时需将自己拥有的地址空间重新归还给未分配的IPv6地址集, 周期性地维护地址池以及采用泛洪方式进行地址空间泄露检测, 导致大量的网络开销。文献[11]提出了由汇聚节点为距离自己较近的传感器节点分配地址的方案, 无需进行重复地址检测, 但存在地址过长的缺点, 会增加WSN功耗。

基于上述研究成果, 本文提出一种无线传感器网络IPv6地址自动配置方案, 该方案将WSN划分为多个簇, 用哈希函数除留余数法为簇首节点和簇内节点分配IPv6地址, 采用线性探测法解决IPv6地址的冲突问题。

1 IPv6地址自动配置方案

1.1 相关定义

本文方案包括6类节点。

全功能节点(full-function device): 具有路由转发功能及分配IPv6地址功能的传感器节点; 部分功能节点(reduced-function device): 不具有路由转发功能及分配IPv6地址功能的传感器节点; 孤立节点(isolated node): 既没有标记为簇首节点或簇内节点, 也没有标记为IPv6接入网关的全功能节点或部分功能节点; IPv6接入网关节点(IPv6 ingress gateway): 用于连接WSN与IPv6网络的全功能节点, 其IPv6地址预先设定, 为簇首节点分配IPv6地址; 簇首节点(Cluster head node): 为本簇簇内节点分配IPv6地址的全功能节点; 簇内节点(Cluster member): 从本簇簇首节点获取IPv6地址, 不具有分配IPv6功能的部分功能节点。其中, 孤立的全功能节点与簇首节点之间及孤立的部分功能节点与簇内节点之间的状态可互相转换。

本文方案中, 一个WSN被IPv6接入网关划分为多个PAN(personal area network), 一个PAN包含一个IPv6接入网关及多个簇首节点, 它们共同构建成一个树状结构, 该树状结构称作簇树, 其根节点为IPv6接入网关, 中间节点及叶子节点为簇首节点。为了使WSN在网络结构上与IPv6网络充分融合, 一个PAN划分为多个簇, 每个簇包含一个簇首节点与多个簇内节点。孤立的全功能节点通过加入一个簇树转换为簇首节点并获取IPv6地址, 孤立的部分功能节点通过加入簇转换为簇内节点并获取IPv6地址。

簇树结构具有如下优点: 1) 簇树与IPv6 Internet的网络结构充分融合。一个簇相当于IPv6 Internet的一个子网, 簇首节点相当于网络路由器, 增强了WSN的可扩展性和鲁棒性; 2) 簇内节点只与本簇簇首节点进行通信, 避免了簇内泛洪; 3) 簇首节点的重复地址检测只在本簇树进行, 即位于不同簇树的簇首节点的IPv6地址配置过程可同时进行, 缩短了IPv6地址配置时间, 降低了WSN网络开销; 4) 簇内节点的重复地址检测只在本簇内进行, 即位于不同簇的簇内节点的IPv6地址配置过程可同时进行, 缩短了IPv6地址配置时间, 降低了WSN网络开销。

1.2 IPv6地址结构

根据IPv6地址分层结构及WSN特点, IPv6接入网关/簇首节点/簇内节点采用如下地址格式, 如表1所示。

表1 IPv6地址结构

64 bit	i bit	n bit	$(64-n-i)$ bit
全局路由前缀	PAN ID	簇ID	簇内节点ID

IPv6地址由4部分组成, 第一部分为全局路由前缀, 一个WSN中所有传感器节点的IPv6地址的全局路由前缀都相同; 第二部分为PAN ID, 它唯一地标识一个PAN, 一个PAN网络中所有簇首节点的PAN ID都相同, 其值等于PAN中IPv6接入网关的PAN ID; 第三部分为簇ID, 簇ID唯一地标识一个PAN网络中的一个簇, 一个簇中所有簇内节点的簇ID都相同, 其值等于所在簇簇首节点的簇ID; 第四部分为簇内节点ID唯一地标识一个簇的簇内节点。本文方案中, IPv6接入网关的IPv6地址的簇ID与簇内节点ID为0, 簇首节点的IPv6地址的簇内节点ID为0。

PAN ID由 l 个比特组成, 簇ID由 n 个比特组成, 簇内节点ID由 $(64-i-n)$ 个比特组成, i 和 n 的值根据实际应用中传感器节点分布密度及WSN规模大小确定, 本文方案考虑一般情况, i 取4, n 取28。一个WSN中最多可包含 2^4-1 (0不分配)个IPv6接入网关, 一个IPv6接入网关可供簇首节点分配的IPv6地址空间为 $2^{28}-1$ (0不分配), 一个簇首节点可供本簇簇内节点分配的IPv6地址空间为 $2^{32}-1$ 。

1.3 主要数据结构

IPv6接入网关广播包(Adv): IPv6接入网关在本簇树内定期广播的控制包, 以示自己的存在。

簇首节点广播包(Adv_C): 簇首节点在本簇内定期广播的控制包, 以示自己的存在。

加入簇树控制包(Join_T): 由全功能节点向一个簇树树根节点发出的控制包, 请求加入该树并获取

IPv6地址。

加入簇树应答控制包(Res_T): 是簇树树根节点对接收到的Join_T控制包的应答控制包, 包的负载为分配的IPv6地址。

簇内节点请求地址控制包(Req_A): 是簇内节点向本簇簇首节点发送的请求IPv6地址的控制包。

地址请求应答控制包(Res_A): 是簇首节点对接收到的Req_A控制包的应答包, 包的负载为分配的IPv6地址。

1.4 全功能节点加入簇树获取IPv6地址

本文方案中, 一个IPv6接入网节点保存一个变量key, 作为分配簇ID的哈希函数的自变量, 其初始值为1, 每分配一个簇ID, 其值递增1。

IPv6接入网关在本簇树内定期广播Adv控制包, 以示自己的存在, 控制包的负载内容为一个距离参数, 其值为转发该控制包的簇首节点距离广播该包的IPv6接入网关的跳数。

孤立的全功能节点X加入簇树成为簇首节点并获取IPv6地址的过程为: 1) 节点X在规定时间内可能收到多个簇首节点转发的Adv包, 根据Adv包中的

距离参数值, 节点X选择距离参数值最小的簇首节点F作为父节点, 并向父节点发送一个请求IPv6地址的Join_T控制包, 该包的地址为节点F所在簇树树根节点G, 同时记录下父节点的IPv6地址及自身的距离参数值; 2) 父节点F将此Join_T控制包继续转发给其父节点, 最终该控制包到达节点F所在树树根节点G; 3) 节点G采用哈希函数除留余数法为全功能节点X分配一个簇ID, 并在本簇树内广播该簇ID, 如果在规定时间内节点G收到簇树内具有相同簇ID的簇首节点返回的响应包, 节点G采用线性探测法再产生一个簇ID, 并在本簇树内广播该簇ID, 如果在广播了预定次数之后, 节点G仍然没有收到具有相同簇ID的簇首节点返回的响应包, 那么此时节点G获取了在本簇树内具有唯一性的簇ID, 然后将簇ID与自身的PAN ID及全局路由前缀相结合形成IPv6地址, 将IPv6地址封装成一个Res_T控制包; 4) 节点X收到Res_T控制包后, 将自己标记为簇首节点, 同时将Res_T包中的IPv6地址作为自己的IPv6地址。至此, 全功能节点X成功加入簇树转换成簇首节点并获取自己的IPv6地址, 如图1所示。

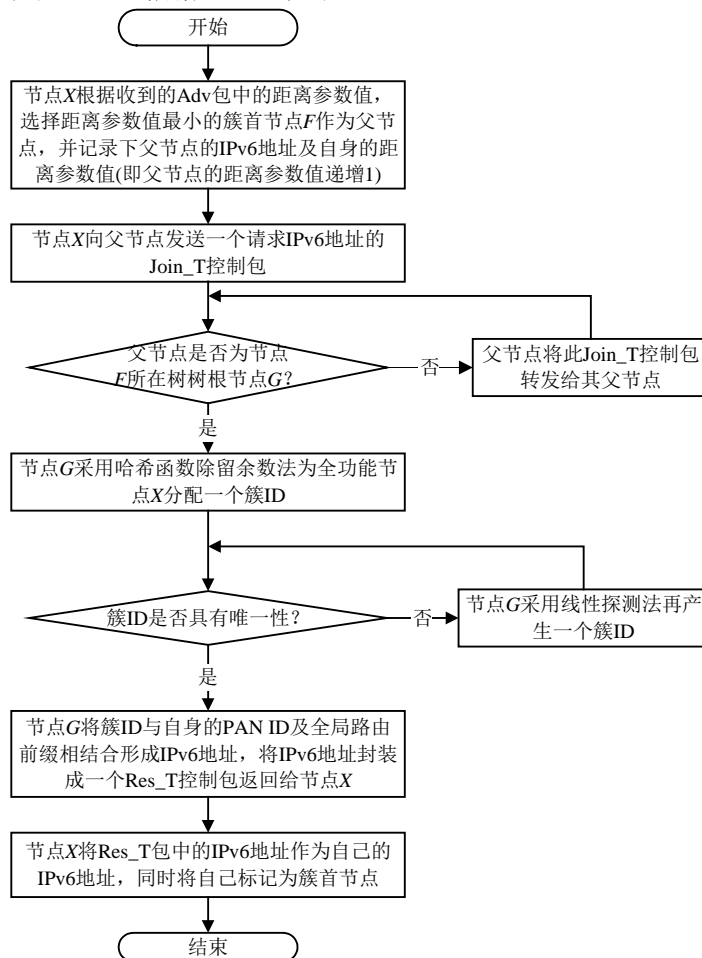


图1 簇首节点获取IPv6地址流程

1.5 簇内节点获取IPv6地址

本文方案中, 一个簇首节点保存一个变量key, 作为分配簇内节点ID的哈希函数的自变量, 其初始值为1, 每分配一个簇内节点ID, 其值递增1。

簇首节点在本簇内定期广播Adv_C控制包, 以示自己的存在, 控制包的负载内容为key变量值。

孤立的部分功能节点X加入簇转换为簇内节点并获取IPv6地址的过程为: 1) 节点X在规定时间内可能收到多个簇首节点广播的Adv_C控制包, 根据Adv_C包中的key变量值, 节点X选择加入变量值最小的簇首节点H所在的簇, 并向簇首节点H发送一个请求IPv6地址的Join_A控制包, 同时记录下节点H的IPv6地址; 2) 节点H收到Join_A包后, 采用哈希函数除余数法为节点X分配一个簇内节点ID, 并在本

簇内广播此簇内节点ID。如果在规定时间内节点H收到本簇内具有相同簇内节点ID的簇内节点返回的响应包, 节点H采用线性探测法再产生一个簇内节点ID, 并在本簇内广播该簇内节点ID; 如果在广播了预定次数之后, 节点H仍然没有收到本簇内具有相同簇内节点ID的簇内节点返回的响应包, 节点H即获取了在本簇内具有唯一性的簇内节点ID, 然后节点H将该簇内节点ID与自己的簇ID、PAN ID及全局路由前缀相结合形成IPv6地址, 将IPv6地址封装成一个Res_A控制包; 3) 节点X收到Res_A控制包后, 将自己标记为簇内节点, 同时将Res_A包中的IPv6地址作为自己的IPv6地址。至此, 部分功能节点X成功加入簇转换成簇内节点并获取了自己的IPv6地址, 如图2所示。

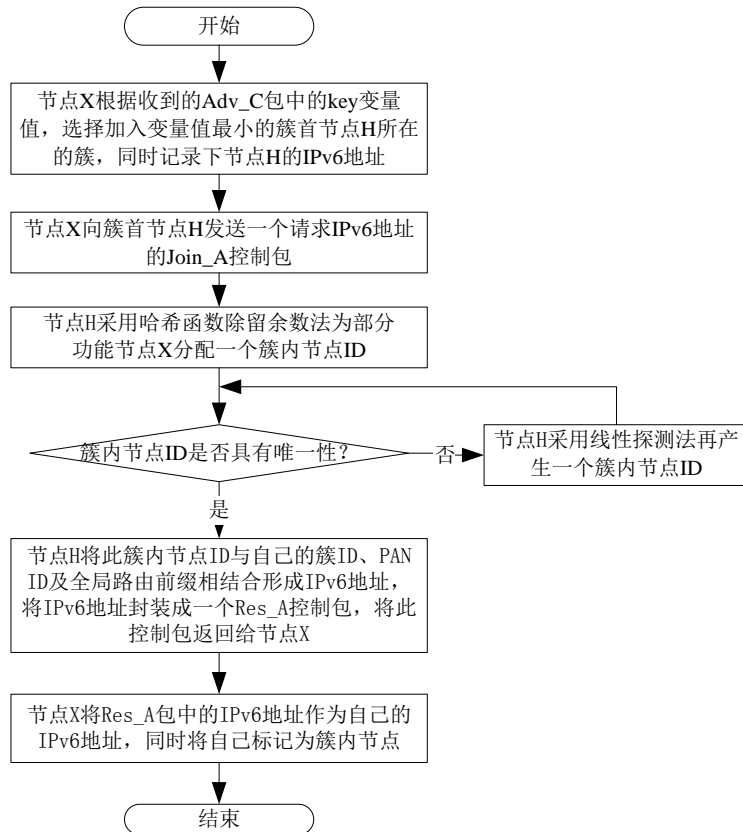


图2 簇内节点获取IPv6地址流程

本文方案通过key变量有效地控制了簇的大小, 使每个簇的簇内节点总数趋于均衡, 从而降低了地址冲突概率, 缩短了IPv6地址的配置延迟时间。

2 性能分析

为了评估本文方案的性能, 在OPNETModeler仿真平台上对本文方案、Strong DAD^[7]及MANETConf^[6]进行仿真, 并比较地址配置总开销及地址配置总延迟时间等性能参数, 地址配置总开销

是指WSN中所有节点均具有唯一性地址所需要发送的控制包总数; 地址配置总延迟时间是指从网络初始化到所有节点均具有唯一性地址的时间间隔。

在OPNETModeler仿真平台上, MAC层协议为IEEE802.15.4。初始状态时, 网络设置3个IPv6接入网关, 全功能节点总数与网络节点总数的比例为1/10, 传感器节点随机分布在100 m×100 m的活动区域内, 以一定时间间隔逐个开始工作。Strong DAD及本文方案中取 $m=2$, MANETConf及本文方案中取

$n=5$, 地址配置总开销及地址配置总延迟时间的分别性能分析如图3及图4所示。

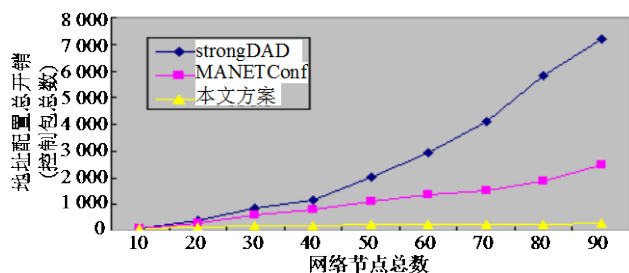


图3 地址配置总开销分析图

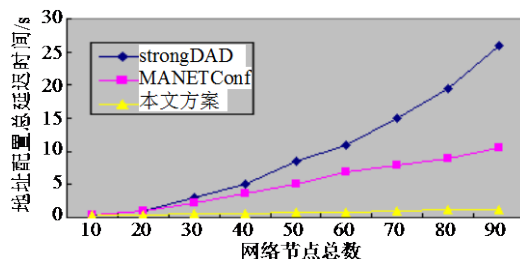


图4 地址配置总延迟时间分析图

Strong DAD中, 当网络节点数量增加时, 节点随机选取的地址发生冲突的概率也随之成正比增加, 地址配置总开销及总延迟时间也随之成幂次增长; MANETConf中, 当网络节点数增加时, 发起者掌握的地址分配信息也随之增加, 因此发起者分配的地址发生冲突的概率并不随网络节点增加, 地址配置总开销及总延迟时间随网络节点总数成正比增长; 本文方案的簇首节点总数与网络节点总数的比例趋于稳定, 它随着网络节点总数成正比增长, 簇内节点总数与网络节点密度及网络中簇的总数有关, 与网络节点总数无关, 因此, 簇首节点的地址配置总开销随网络节点总数成幂次增长, 而簇内节点的地址配置总开销随网络节点总数成正比增长。

3 结束语

本文提出一种无线传感器网络IPv6地址自动配置方案, 并从重复地址检测开销、地址配置总开销及地址配置总延迟时间3个方面将该方案与Strong DAD及MANETConf的性能参数进行了比较分析, 分析结果验证了该方案可以大幅度地降低重复地址检测开销及地址配置开销, 减少地址配置延迟时间。

参考文献

- [1] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. 6LoWPAN: overview, assumptions, problem statement, and goals[S/OL]. [2009-11-10]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4919>.
- [2] MONTENEGRO G, KUSHALNAGAR N, HUI J. Transmission of IPv6 packets over IEEE802.15.4 networks[S/OL]. [2009-11-10]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>.
- [3] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. *Ad hoc Networks*, 2005, 3(3): 325-349.
- [4] DUNKELS A, ALONSO J, VOIGT T. Making TCP/IP viable for wireless sensor networks[C]//First European Workshop on Wireless Sensor Networks. Sweden: Swedish Institute of Computer Science, 2004.
- [5] SHIN H, TLIPOV E, HOJUNG C. IPv6 lightweight stateless address autoconfiguration for 6LoWPAN using color coordinators[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington: IEEE Computer Society, 2009.
- [6] NESARGI S, PRAKASH R. MANETconf: configuration of hosts in a mobile Ad hoc network[C]//Proc IEEE INFOCOM 2002. [S.l.]: IEEE, 2002: 1059-1068.
- [7] GÜNES M, REIBEL J. An IP address configuration algorithm for zeroconf mobile multihop Ad hoc networks[C]//Proc Int'l Wksp Broadband Wireless Ad hoc Networks and Services. Sophia Antipolis, France: [s.n.], 2002.
- [8] PERKINS C, MALINEN J T, WAKIKAWA R, et al. IP address autoconfiguration for Ad hoc networks[S/OL]. [2009-11-10]. <http://tools.ietf.org/html/draft-perkins-manet-autoconf-01>.
- [9] WENIGER K. PACMAN: passive autoconfiguration for mobile Ad hoc networks[J]. *Wireless Ad hoc Networks*, 2005, 23: 507-19.
- [10] MANSI R T, RAVI P. A distributed protocol for dynamic address assignment in mobile Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(1): 4-19.
- [11] JOBIN J, KRISHNAMURTHY S V, TRIPATHI S K. A scheme for the assignment of unique addresses to support self-organization in wireless sensor networks[C]//Vehicular Technology Conference. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [12] KIM S, CHUNG J. Message complexity analysis of mobile Ad hoc network address auto-configuration protocols[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(3): 356-371.

编辑 税红