

下一代全IP无线传感器网络路由方案*

王晓喃¹, 钱焕延²

(1. 常熟理工学院, 江苏 常熟 215500; 2. 南京理工大学, 南京 210094)

摘要: 提出了无线传感器网络与IPv6网络全IP通信互联的路由方案。介绍了传感器节点的IPv6地址格式以及IPv6地址自动配置方案, 基于所提出的IPv6地址格式, 提出基于链路层的全IP传感器网络路由实现方案, 同时采用侦听相邻节点下一次信道采样时间的方法提高路由效率以节省传感器网络功耗, 并对实现路由方案的精简IPv6协议栈进行了详细的分析和讨论。分析了此方案的能量消耗以及数据延迟等性能参数, 验证了此方案的有效性和正确性。

关键词: 传感器网络; IPv6网络; 路由; 协议

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)06-2310-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.082

Routing scheme for next-generation full-IP wireless sensor networks

WANG Xiao-nan¹, QIAN Huan-yan²

(1. Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China; 2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper proposed a routing scheme on implementing a seamless communication between a wireless sensor network and an IPv6 network. It created an IPv6 address format of a sensor node and an automatic IPv6-address configuration algorithm in a sensor network. Based on the IPv6 address format, the paper brought forward a routing scheme in a link layer for a full-IP sensor network which adopted the method of storing the next channel-sampling time of the adjacent nodes to increase the routing efficiency and to decrease the networks' power. And the paper discussed and analyzed the reduced IPv6 protocol stack to perform the routing scheme. It analyzed the scheme's performance parameters, including consumed-energy and delay-time, and proved the validity and correctness of the scheme.

Key words: sensor network; IPv6 network; routing; protocol

0 引言

随着无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)的广泛应用及下一代互联网络的发展, WSN与下一代互联网实现全IP通信互联已成为未来发展的必然趋势^[1]。

实现WSN与下一代互联网络的全IP通信互联需要解决如下关键技术^[2,3]:

a) 地址自动配置。它是IPv6的一个重要技术特色, 可以在无人干预的情况下为每个接口配置相应的IPv6地址。这一点与WSN自组织、自配置的设计目标非常吻合。但与此同时, 现有的IPv6地址自动配置方式在WSN中还存在一些问题, 如有状态地址配置会带来大量的控制消息开销、根据MAC地址生成IPv6地址的无状态地址配置对传感器节点间的路由寻址未带来任何方便等。

b) 路由方案。WSN与IPv6网络不同, 在IPv6网络中, 路由器与普通节点之间由数据链路层连接, 通过一跳到达彼此, 而无线传感器节点具有路由器与普通节点双重身份, 节点之间没有数据链路层连接, 因此在传感器网络中需要建立一种新的路由方式来实现IPv6节点与传感器节点之间的通信。

c) IPv6协议栈优化。由于WSN资源受限, 而IPv6最初并

没有考虑嵌入式应用, 因此要在储存器和处理器极其有限的传感器节点上实现IPv6协议, 必须对其进行合理精简。

本文借鉴参考文献[4]的思想, 提出了采用链路层实现全IP无线传感器网络的路由方案, 下面将对全IP无线传感器网络的网络结构、IPv6地址自动配置方案及路由方案进行详细讨论和分析。

1 簇树结构

本路由方案在链路层实现, 链路层协议采用IEEE 802.15.4标准^[5], 该标准将无线传感器节点分为全功能节点(full-function device, FFD)和部分功能节点(reduced-function device, RFD)。本方案将一个下一代全IP无线传感器网络划分为多个PAN(personal area network)。从路由角度划分, 本方案包含三类节点: 网关节点(PAN协调者)、簇首节点(协调者)以及簇内节点(普通设备), 其中网关节点与簇首节点为全功能节点, 具有路由转发功能, 簇内节点为部分功能节点, 不具有路由转发功能。一个PAN中只有一个网关节点, 它是固定节点, 用于连接无线传感器网络与IPv6网络, 具有丰富的硬件资源。

为了使下一代全IP无线传感器网络在网络结构上与IPv6网络充分融合, 本方案将一个PAN划分为多个簇, 每个簇有一

收稿日期: 2011-10-12; 修回日期: 2011-11-22 基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009133); 苏州工业基础研究基金资助项目(SYG201035)

作者简介: 王晓喃, 女, 副教授, 博士(后), 主要研究方向为下一代网络体系结构与协议(wxn_2001@163.com); 钱焕延, 男, 教授, 博导。

个簇首节点,簇首节点与 6LoWPAN 网关节点构建成树状结构,形成路由系统,此树状结构称做簇树,簇树的根节点为网关节点,中间节点及叶子节点为簇首节点。

2 下一代全IP传感器网络路由方案

本方案的创新之处在于:a)为了与 IPv6 网络结构相融合,本方案提出 WSN 采用簇树结构;b)本方案提出了 IPv6 地址结构及其自动配置算法;c)本方案提出在链路层实现路由;d)本方案利用通信节点的下一信道侦听时间来延长传感器节点的休眠时间,从而降低网络功耗。

本方案的使用环境特征为:下一代全IP无线传感器网络包括多个网关节点、少量全功能节点和大量部分功能节点,传感器节点不具备移动性,所有的传感器节点具有相同的初始能量。其中,网关节点之间通过 IPv6 网络进行多播通信。

2.1 IPv6 地址结构

在本方案中,传感器节点的 IPv6 地址分为两个部分:a)全局路由前缀,一个传感器网络中所有传感器节点的 IPv6 地址的全局路由前缀都相同;b)传感器节点 ID,它又分为网关节点 ID、簇首节点 ID、簇内节点 ID 三个组成部分。网关节点 ID 唯一地标志一个 PAN 网络,一个 PAN 网络包含一个且只有一个网关节点,一个 PAN 网络中所有簇首节点的网关节点 ID 都相同,其值等于相同 PAN 网络中网关节点的网关节点 ID,即为网关节点出厂时设置的初始 ID 号,它在一个下一代全IP无线传感器网络中具有唯一性;簇首节点 ID 唯一地标志一个 PAN 网络中的一个簇,一个簇中所有簇内节点的簇首节点 ID 都相同,其值等于簇首节点的簇首节点 ID,即为簇首节点出厂时设置的初始 ID 号,它在一个下一代全IP无线传感器网络中具有唯一性;簇内节点 ID 唯一地标志一个簇的簇内节点,其值为簇内节点出厂时设置的初始 ID 号,它在一个下一代全IP无线传感器网络中具有唯一性。在本方案中,网关节点的 IPv6 地址的深度值、簇首节点 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。

下一代全IP无线传感器网络的路由实现是基于 IPv6 地址的,但是由于传感器节点资源受限,因此本路由方案在链路层实现。链路层地址(采用 16 位短地址)为传感器节点 ID,即网关节点的链路地址为网关节点 ID,簇首节点的链路地址为簇首节点 ID,簇内节点的链路地址为簇内节点 ID。

2.2 簇树

本方案是建立在簇树基础之上的。簇树具有如下定义:簇树的根节点是网关节点,中间节点与叶子节点为簇首节点,一个簇树组成了一个 PAN,簇树内的所有簇首节点与簇内节点的网关节点 ID 都相同,簇内节点将采集到的数据直接发送到簇首节点,簇首节点通过簇树将数据路由到目的节点。本方案中的全功能传感器节点通过加入簇树成为簇首节点并获取传感器节点 ID,部分功能节点通过加入簇成为簇内节点并获取传感器节点 ID,网关节点为全功能传感器节点,由人工设置。簇首节点需要记录它在当前所属簇树中的深度参数值,网关节点的深度参数值为 0。

全功能传感器节点 X 通过加入簇树成为簇首节点并获取传感器节点 ID,具体过程描述如下:

a) X 广播请求信标帧(Beacon request,类型为 0x07),负载内容为空。

b)在信标帧覆盖范围内的邻居 FFD 节点 A 收到此帧后,如果 A 是簇首节点,则向 X 返回一个响应信标帧,信标帧的负载内容为 A 在簇树中的深度参数值、 A 下一次信道采样时间以及 A 所在簇树的网关节点 ID,如果 A 没有加入簇树(即不是簇首节点),则丢弃此帧。

c) X 在规定时间内可能接收到多个簇首节点返回的响应信标帧, X 选择信标帧负载中深度参数值最小的簇首节点 F 作为父节点并记录下 F 的簇首节点 ID(即信标帧的源地址)、 F 下一次信道采样时间及自身在簇树中的深度(自身的深度值等于父节点 F 的深度值加 1),同时从信标帧负载中获取网关节点 ID,与自身的初始 ID 相结合,形成传感器节点 ID,然后向簇树的网关节点进行注册操作。

d)至此,全功能传感器节点 X 成功加入簇树成为簇首节点,并获取传感器节点 ID,如图 1 所示。

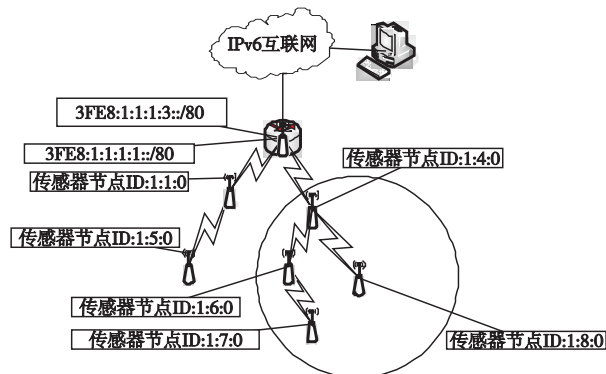


图1 加入簇树获取传感器节点ID

图 1 中,初始 ID 号为 8 的全功能传感器节点广播请求信标帧,在帧覆盖区域内初始 ID 号为 4、6、7 的簇首节点收到此帧后返回一个响应信标帧,负载内容为其在簇树中的深度参数值、下一次信道采样时间以及其所在簇树的网关节点 ID。全功能传感器节点根据深度参数值选择最优的初始 ID 号为 4 的簇首节点作为父节点,同时获取了传感器节点 ID。

在本方案中,全功能传感器节点 X 可能在规定时间内没有接收到任何信标帧。由于 WSN 中的全功能节点密度足够大,随着新的簇首节点不断加入簇树, X 会定期重复上述步骤 a)的操作直至加入到簇树为止。

2.3 路由过程

在本方案中,网关节点之间通过 IPv6 网络进行多播通信。IPv6 网络节点 N 使用簇内节点 X 的 IPv6 地址 Addr 与其进行通信。具体通信过程描述如下:

a) N 发送一个获取传感器节点采集数据的服务请求数据包,此消息的目的地址为 Addr。

b)此数据包在 IPv6 网络中路由,最后到达 X 所在 WSN 的网关节点,它通过检查 Addr 的网关节点 ID 判断 X 是否在本簇树内,如果不在,则进行多播,最后此请求数据包到达 X 所在簇树的网关节点 G 。

c) G 查看路由表是否存在到达 X 所在簇的路由表项。如果有,转到步骤 f);否则从簇首节点记录表中查找目的簇簇首节点所对应的表项,以获取目的簇所在簇树的深度值,利用此深度值构建到达 X 所在簇的路由查询帧,并在簇树上广播

此帧。

d) 在路由查询帧覆盖范围内的簇首节点 A 收到此帧后, A 通过查看路由查询帧的源地址判断此帧是否来自于其父节点, 如果不是, 则丢弃此帧, 否则 A 继续判断自己深度参数值是否等于帧中的深度参数值。如果大于, 则丢弃此帧; 如果小于, 则将帧的源地址域修改为自己的簇首节点 ID, 然后继续广播此帧, 重复步骤 d); 如果等于, A 则继续判断其簇首节点 ID 是否与帧中目的簇首节点的簇首节点 ID 相同, 如果不相同, 则丢弃此帧, 如果相同, A 则构建一个路由响应帧。

e) F 收到此帧后, 首先查看临时路由表中是否已经存在到达 X 所在簇的路由表项。如果存在, 则将此路由表项的生存时间设置为初始值; 如果不存在, 则建立一个临时路由表项, 在 F' 下一次信道监听时间将此帧发送出去, F' 接收到此帧后, 重复上述操作, 最终路由响应帧到达 G 。

f) G 将服务请求数据包进行精简与分片操作, 在临时路由表中查找到到达目的簇的路由表项, 然后用适配层头部、Mesh Delivery 头部及 IEEE 802.15.4 头部对数据分片进行封装, 然后根据路由表项中下一跳簇首节点将数据帧发送到下一跳簇首节点 N' 。 N' 收到此数据帧后, 重复上述过程。这样, 此数据帧最后会到达最后一跳簇首节点 L , L 将此数据帧发送到 X 。

g) X 重组服务请求数据包分片, 处理服务请求包, 将服务数据封装成服务响应数据包, 并对响应数据包进行精简分片, 然后将此数据帧发送出去, H 接收到数据帧后, 再在其父节点 F 下一次信道监听时间将此帧发送给 F 。以此类推, 最后数据帧到达 G 。

h) G 重组接收到的响应数据包分片, 还原精简的响应数据包, 最后将完整的响应数据包发送到 IPv6 网络上。

3 性能分析

仿真平台采用 NS-2, 传感器节点通信范围为 40 m, 链路层协议采用 IEEE 802.15.4, 仿真区域大小为 100 m × 100 m, 传感器节点数量为 50。通过仿真环境, 对本方案以及文献[4]提出的方案(以下简称现有方案)在能量消耗与延迟时间两个性能方面作了比较, 如图 2 和 3 所示。

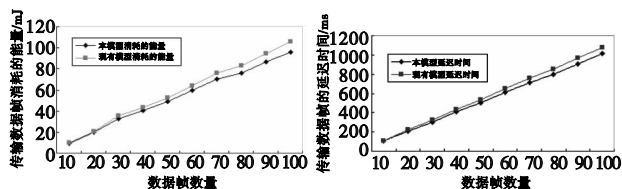


图2 能量消耗对比

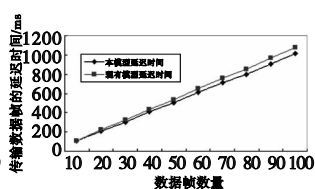


图3 延迟时间对比

产生上述结果的原因如下: a) 本方案采用链路层路由, 而现有方案采用网络层路由; b) 现有方案采用边界路由器存储所有传感器节点的路由信息, 从而导致了瓶颈增加的延迟; c) 现有方案在网络层增加扩展头部, 从而增加了传输功耗。

4 结束语

本文提出了下一代全 IP 无线传感器网络的路由方案, 并从消耗的能量与延迟时间两个方面对此方案进行了分析, 分析结果验证了本方案的有效性和高效性。目前, 无线传感器网络与 IPv6 网络互联是一个很活跃的研究方向, 但是由于有关研究还处于初级阶段, 因此, 还有很多问题有待进一步研究和讨论。

参考文献:

- [1] 吴建平, 吴茜, 徐恪. 下一代互联网体系结构基础研究及探索[J]. 计算机学报, 2008, 31(9): 1536-1548.
- [2] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. *Ad hoc Networks*, 2005, 3(3): 325-349.
- [3] DAI S, JING X, LI L. Research and analysis on routing protocols for wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Communications, Circuits and Systems. New York: IEEE Press, 2005: 27-30.
- [4] HUI J W, CULLER D E. IP is dead, long live IP for wireless sensor networks [C]//Proc of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM Press, 2008: 15-28.
- [5] IEEE Computer Society. IEEE 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.
- [6] BAG G, RAZA M T, MUKHTAR H, et al. Energy-aware and bandwidth efficient mobility architecture for 6LoWPAN [C]//Proc of IEEE Military Communications Conference. 2008: 1-7.
- [7] BAG G, SHAMS S M S, AKBAR A H, et al. Network assisted mobility support for 6LoWPAN [C]//Proc of the 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. 2009: 1-5.
- [8] BAG G, SHAMS S M S, MUKHTAR H. Inter PAN mobility support for 6LoWPAN [C]//Proc of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. 2008: 787-792.
- [9] SHIN M K, KIM H J. L3 mobility support in large-scale IP-based sensor networks (6LoWPAN) [C]//Proc of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology. New York: IEEE Press, 2009: 941-945.
- [10] KIM H, HONG C. A routing scheme for supporting network mobility of sensor network based on 6LoWPAN [C]//Proc of Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium. Berlin: Springer, 2007: 155-164.
- [11] KIM H, HONG C, SHON T. A lightweight NEMO protocol to support 6LoWPAN [J]. *ETRI Journal*, 2008, 30(5): 685-695.
- [12] DEVARAPALLI V, WAKIKAWA R, PETRESCU A, et al. RFC 3963, Network mobility (NEMO) basic support protocol [S]. [S. l.]: IETF, 2005.
- [13] DUNKELS A, ALONSO J, VOIGT T. Making TCP/IP viable for wireless sensor networks [C]//Proc of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks. Sweden: Swedish Institute of Computer Science, 2004.
- [14] KUSHALNAGAR N, MONTENEGRO G, SCHUMACHER C. RFC 4919, 6LoWPAN: overview, assumptions, problem statement, and goals [S]. [S. l.]: IETF, 2007.
- [15] MONTENEGRO G, KUSHALNAGAR N, HUI J. RFC 4944, Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks [S]. [S. l.]: IETF, 2007.
- [16] KYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [17] ZHANG Rong-biao, ZHANG Li-li, FENG You-bing. Very low energy consumption wireless sensor localization for danger environments with single mobile anchor node [J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 47(4): 497-521.
- [18] ROYER E M, TON C K. A review of current routing protocols for Ad hoc mobile wireless networks [J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(2): 46-55.