

# 无线传感网的一种邻居搜索方法

韩磊, 曹欲晓, 田丽鸿

(南京工程学院 计算机工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:**着眼于邻居发现方法对无线传感网能效的影响,在节点移动的情况下,提出了一种不显著增加能耗和降低性能的邻居搜索方法。依托信标帧发布邻居信息,扩展了信标帧的数据格式,借助于数据域携带节点及其邻居信息,这样不增加新帧类型,减少了空闲侦听和额外信息交换。以冗余连接保持和能效优先为基本原则,设计了邻居搜索方法的详细流程,降低了网络扫描次数,提供了动态网络支持。仿真验证表明:低占空比 MAC 层无线传感网络中,邻居搜索方法优势明显,有实用价值。

**关键词:**邻居发现;能效;信标帧;WSN

**中图分类号:**TP393.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2011)03-0060-04

## Neighbor Searching Method for Wireless Sensor Networks

HAN Lei, CAO Yu-xiao, TIAN Li-hong

(School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** A new neighbor searching method with non-adding energy consumption and lowering performance is proposed for improving energy efficiency of wireless sensor networks under nodes moving situation. Extend the data field of beacon frame by adding neighbor field to carry synchrony information. This method does not increase types of frame, while decreasing idle listening and extra information interchange. Based on two basic principles: both redundant communication links and energy efficiency first, design the method procedure which has the advantages of cutting down network scanning times and supporting nodes motion. The emulation result shows that neighbor searching method proposed in this paper is effective and useful in wireless sensor network with low duty-cycle MAC scheme.

**Key words:** neighbor discovery; energy-efficient; beacon frame; wireless sensor networks

## 0 引言

无线传感网(wireless sensor network, WSN)集信息采集、处理、无线传输等功能于一体,正在给人类生活和生产的各个领域带来深远影响,在国防军事、医疗卫生、环境监测、城市交通以及空间搜索等领域具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。

在 WSN 中,节点能量有限且难以补充,因此,能量问题是实际应用中关注的热点,而通信协议的改进又是提高能效的重要措施。在 WSN 协议栈中,MAC 层决定着信道分配与使用方法,在协议栈能耗中有举足轻重的地位。学者们从多个方面提出了 MAC 层的节能策略,目前,无线传感网的 MAC 协议节能策略有<sup>[3]</sup>:合理调度“侦听/休眠”;合理把握发送/接收数据时机;降低 MAC 协议自身开销等。

在这些研究中,多是在网络拓扑确定的基础上,实

时诸多改进策略,以降低网络能耗,然而,较少关注网络拓扑建立过程中的同步机制和能耗问题。文中针对低占空比的 MAC 协议的拓扑建立过程,提出了一种邻居发现方法,降低了网络扫描次数,提高了网络能效。下面先讨论邻居发现与同步技术,然后给出邻居发现方法的设计,最后实验验证邻居发现方法的效果。

## 1 邻居发现与同步技术

无线传感网通信协议的正常运行离不开控制信息的交换,比如邻居发现控制信息以及时间同步信息等。这些都会影响 MAC 层的能耗,尤其是无线传感网的数据包较小,控制信息交换的能耗比例就会增大。

目前的节点发现技术主要有三类<sup>[4,5]</sup>:

一、设置独立的控制信道,节点在控制信道上侦听信标帧,分析接收到的信标帧与邻居建立连接关系;

二、没有独立的控制信道,直接在各个信道上发送、接收信标帧;

三、采用前两种的混合模式。

在无线传感网这样的分布式系统中,节点之间的时间同步是保证正常通信、降低能耗的一个因素。目

收稿日期:2010-07-18;修回日期:2010-10-21

基金项目:南京工程学院科研基金(KXJ08069)

作者简介:韩磊(1982-),男,硕士,讲师,研究方向为无线传感网、嵌入式系统。

前有全局时间同步和局部时间同步两种方式<sup>[6,7]</sup>。全局时间同步是网络所有节点的步调都按照全网统一时钟,而局部时间同步只是在相邻节点之间维持时钟同步。

2 邻居搜索方法

文中提出一种在节点移动的情况下,不显著增加能耗和降低性能的邻居搜索方法(Neighbor Searching Method, NSM)。NSM 借助于信标发布邻居信息,邻居搜索坚持能效优先,有效降低了网络扫描次数,降低了网络能耗。

2.1 邻居同步信息发布

NSM 运行于同步低占空比 MAC 层中,依托现行 MAC 信标的数据域发布邻居信息。这样,可以减少空闲侦听和额外信息交换,不引入新的帧类型,且信标帧直接由 MAC 协议同步,降低了问题复杂度。

为邻居搜索方法提供支持,文中扩展了信标帧的格式。如图 1 所示,借助于信标帧的数据域发布节点及其邻居信息,节点信息包括节点的 ID 和使用的信道;而节点的邻居信息包含在邻居域中,邻居域拥有一个或多个同步数据单元(SDU),SDU 又由节点信道号和时间偏移两部分组成。SDU 中的时间偏移是节点和 SDU 发送节点之间的时间偏移,使用偏移量而不使用绝对时间,是因为偏移量可以缩小值域,减少信标帧的比特位。

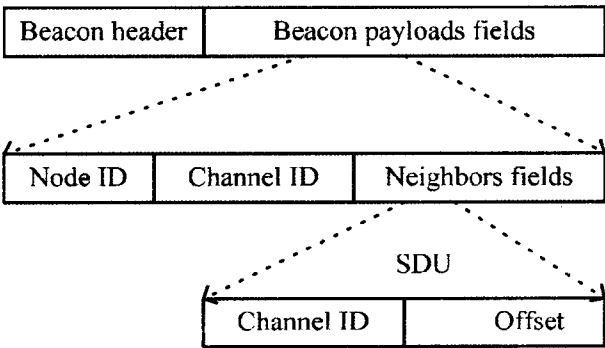


图 1 信标帧的扩展格式

通过信标帧的交换,理论上节点可以获得网络中多层次节点的同步信息,这势必要求节点有较大的缓存空间,另外,节点同步的邻居节点越多,节点的占空比就会增大,能耗也会增大。实际上,保持适当的冗余连接,与  $k$  个父亲节点保持同步,可以获得良好的节能效果,然而,也不宜缓存过多的邻居同步信息,文中采用两跳缓存策略,即缓存两跳内的邻居信息。图 2 描述了邻居信息的发布过程,节点 A 和节点 B 是节点 C 的父节点,这样节点 C 接收来自节点 A 和节点 B 的信标。同样的,节点 C 是节点 E 的父节点,节点 E 接收

来自节点 C 的信标。假定节点 E 在物理上可以接收到来自节点 F 的信标,但是一个节点最多可以和  $k$  个父节点保持同步,图 2 假定  $k$  等于 2,因此,节点 E 暂不缓存 F 节点的同步信息。

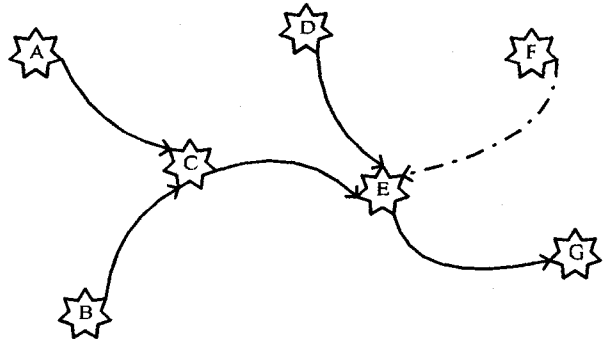


图 2 邻居信息发布过程

在邻居信息发布过程中,每个节点从父节点获取 SDU 并将其打包在信标的数据域中。在图 2 中,节点 C 发送包含节点 A 和节点 B 的信标,E 发送关于节点 D 和节点 A、B、C 的同步信息,这样,节点 G 就积累了节点 A、B、C、D、E、F 的信标,以此类推,下一个节点信标中的 SDU 数将以指数递增,增加了信标比特位数,另外,偏移时间的积累会降低协议的可靠性。因此,文中约定节点仅发送直接父节点的 SDU 信息。例如,节点 E 发送的信标仅包含节点 C 和节点 D 的 SDU,节点 E 由节点 C 发送的 SDU 决定节点 A 的信标发送时间,即  $t_A^{beacon} = t_C^{beacon} + t_{SDU}^{offset}$ ,这里,  $t_C^{beacon}$  是节点 C 已知的信标发送时间,  $t_{SDU}^{offset}$  是存储于 SDU 的偏移量。  $t_A^{beacon}$  是节点 A 的信标发送时间。

综上所述,充分利用 MAC 协议的信标帧的周期发送功能,在其数据域中携带邻居节点的 SDU 信息,为减少节点数据缓冲和信标帧的比特位数,SDU 采用偏移时间,并且仅发送直接父节点的 SDU 信息。另外,为保持较低的占空比,降低网络能耗,限定了冗余连接数,约定当前节点最多与  $k$  个父节点保持同步,物理上多于  $k$  个父节点时,当前节点暂不保存其同步信息。 $k$  的值依据网络具体情况确定。这种基于信标帧的邻居信息发布方法,提供了获取邻居同步信息的机制,为建立网络拓扑奠定了基础,但是,当前节点和哪些节点建立同步关系,在何时建立,如何维持等问题是需要解决的。

2.2 邻居搜索方法

无线传感网在某些应用领域中节点是动态移动的,即便是静态网络,也有很多动态因素,比如地面、空气、隔离物、节点自身等因素都会造成网络拓扑的变化,造成网络的动态性<sup>[8-10]</sup>。基于信标帧的邻居信息发布,为邻居搜索方法奠定了基础,而邻居搜索方法则给出建立节点同步通信关系的基本流程。

邻居搜索方法有两个基本前提:(1)保持一定的冗余通信连接;(2)能效优先选择。

在动态网络中保证连续的数据路由,保持足够的冗余通信连接是很重要的。本设计支持  $k$  个通信连接。 $k$  值取决于连接变化的频率范围、实际网络的拓扑结构以及网络的动态程度。能效优先选择,是指在多个连接中,选择较高品质的连接,加入缓存邻居列表。

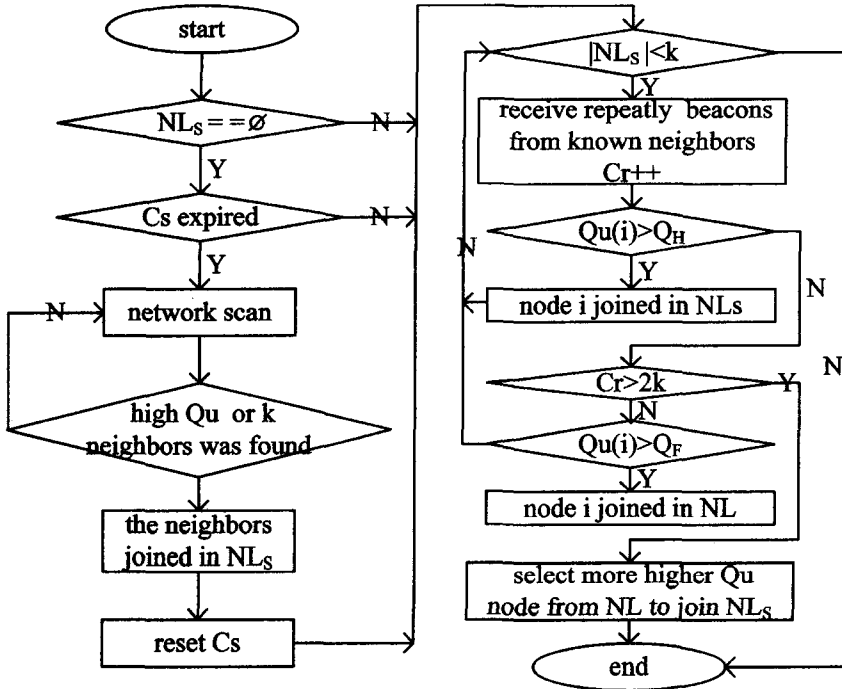


图 3 邻居搜索方法流程图

图 3 给出了邻居搜索方法的流程图,其中符号说明如表 1 所示。初始状态时,节点并没有任何邻居信息,需要执行网络扫描,当发现高质量连接或  $k$  个邻居时,终止网络扫描。发现高质量连接的邻居也会终止网络扫描,因为通过这样的邻居很可能找到其它邻居。如前文所述,基于信标的邻居信息发布策略,提供了足够的同步信息,减少了网络扫描次数。

当同步邻居列表节点数目不足  $k$  时,如图 3 的右半部分所示,邻居搜索方法重复使用已知的邻居,尝试从没有同步的邻居接收信标。如果接收到某节点信标的连接质量大于高质量连接门限值  $Q_H$ ,就将该节点加入到邻居同步列表  $NL_S$  中,并与该节点保持同步。如果信号强度足以维持通信,但未达到高质量连接门限值  $Q_H$ ,则在已知邻居列表  $NL$  中暂存该邻居信息,并继续搜索高质量连接。

如果重复接收邻居信标已达  $2k$  次,但是检测到的高质量连接不足,将从暂存的邻居列表  $NL$  中选择连接质量最高的节点加入同步邻居列表  $NL_S$  中。

综上,文中的邻居搜索方法是基于信标进行的,同

步尝试也是在信标周期内进行。这样,节点在发现邻居后可以睡眠或与其它邻居通信。由于所有节点执行邻居发现算法类似,所以所有节点可以移动。

### 3 实验与仿真结果

文中使用 NS-2<sup>[11]</sup> 对纯 S-MAC 协议的能量消耗<sup>[12]</sup> 和使用了 NSM 的 S-MAC 协议的能量消耗进行仿真实验,用 Otcl 语言编写脚本程序,用 NAM 工具跟

踪实验结果,设定节点的移动速度,模拟网络的动态性。为了验证邻居搜索方法对 S-MAC 协议能量有效性的提高,仿真实验采用的节点的移动速度是 0.15m/s,发射平台在交替时间间隔内发射持续的信息流。

纯 S-MAC 协议和使用 NSM 的 S-MAC 协议的网络功率-信标发送频率曲线如图 4 所示。当网络信标发送频率较低,即网络运行在低占空比情况下时,使用 NSM 的 S-MAC 协议的网络功率较纯 S-MAC 协议的网络功率有明显优势,但当信标发送率提高时,网络占空比增大,使用

NSM 的 S-MAC 的网络功率失去明显优势。这是因为低占空比时,邻居搜索方法(NSM)能够以较低的能耗建立邻居节点同步关系,而占空比提高时,节点活动频繁,为 S-MAC 的传统邻居发现方法准备了足够的时间,所以此时两种协议的网络功率相差不大。

表 1 邻居搜索方法符号说明

符号名称	意义
NL	已知邻居节点列表
NL <sub>s</sub>	同步邻居节点列表
C <sub>s</sub>	网络扫描定时计数器
Qu(i)	到节点 i 的连接质量
Q <sub>H</sub>	高质量连接门限值
Q <sub>F</sub>	能够维持通信的连接质量最低门限值
Cr	接收信标计数器

### 4 结束语

无线传感网的能效问题备受关注,而无线通信的能耗在整个网络能耗中占有相当比重,文中简单分析了协议栈对网络能效的影响,指出了 MAC 层协议的举

足轻重地位,最后着眼于 MAC 层的邻居发现方法。邻居发现方法的不同,影响网络扫描次数,进而影响网络能耗。文中提出了一种邻居搜索方法(NSM),首先,借助于信标帧发布邻居信息,在信标帧中扩展邻居域,在邻居域携带 SDU,为保证邻居搜索的高效,邻居域仅包含直接父节点的 SDU,而且 SDU 中采用偏移时间记录同步信息。在此基础上,设计了邻居搜索方法的详细流程,坚持冗余连接保持和能效优先的基本原则,降低了网络扫描次数。基于 NS-2 仿真平台,对纯 S-MAC 协议和使用 NSM 方法的 S-MAC 协议在不同的信标发送频率下进行了仿真实验,实验结果表明:当信标发送频率较低时,使用了 NSM 方法的 S-MAC 协议的网络功率低于纯 S-MAC 协议的网络功率,当信标发送频率较高时,两者的网络功率趋于一致。可见,文中提出的邻居搜索方法能够降低低占空比网络的能耗,在低占空比无线传感网应用领域有实用价值。

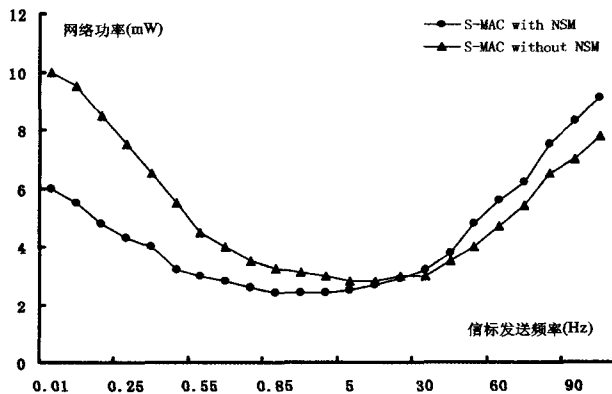


图4 网络功率-信标发送频率关系曲线

#### 参考文献:

- [1] Callaway E H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols[M]. San Diego: CRC Press, 2003.
- [2] Roundy S, Wright P K, Rabaey J. A study of low-level vibrations as a power source for wireless sensor networks[J]. Comput. Commun., 2003, 26(11): 1131-1144.
- [3] 蹇强,龚正虎,朱培栋,等.无线传感器网络 MAC 协议研究进展[J].软件学报,2008,19(2):389-403.
- [4] Ruzzelli A G. Protocol assessment issues in low duty cycle sensor networks: The switching energy[C]//In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Sensor Networks. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2006:136-143.
- [5] 苏俊,胡访宇.无线传感器网络 SMAC 协议的节能改进[J].计算机工程,2009,35(5):106-107.
- [6] Chatterjea S, van Hoesel L F W, Havinga P. An application-tailored MAC protocol for wireless sensor networks[C]//In: Proc. of the Int'l Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWWAN 2005). London:[s. n.], 2005.
- [7] 司宏林,王晓蔚.无线传感器网络多信道的 MAC 层协议[J].计算机技术与发展,2006,16(3):232-234.
- [8] 石为人,冯会伟,唐云建.一种无线传感器网络 MAC 层协议设计与实现[J].计算机科学,2009,36(7):60-63.
- [9] Staub T, Bernoulli T, Anwender M, et al. Experimental lifetime evaluation for Mac Protocols on real sensor hardware[C]//In:Proc. of the ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN 2006). Uppsala: ACM press, 2006:25-29.
- [10] 刘兰军,张晓彤,王沁,等.一种基于分簇结构的无线传感器网络混合调度 MAC 协议[J].计算机科学,2008,35(9):65-71.
- [11] 徐雷鸣,庞博,赵耀.NS 与网络模拟[M].北京:人民邮电出版社,2003:32-58.
- [12] 杨风,李强,朱灵波.一种无线传感器网络跨层能量模型及能耗计算[J].计算机工程与应用,2008,44(2):172-176.
- [1] Callaway E H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols[M]. San Diego: CRC Press, 2003.
- [2] Chakrabarti S, van den Berg M, Dom B. Focused crawling: a new approach to topic-specific Web resource discovery[J]. Computer Networks, 1999, 31(11-16): 1623-1640.
- [3] 杜亚军. 搜索引擎智能行为的研究及实现[D]. 成都:西南交通大学,2005.
- [4] 白坤,耿国华.基于 Lucene/Heritrix 的垂直搜索引擎的研究与应用[J].计算机应用与软件,2009,26(1):212-215.
- [5] De Bra P M E, Post R D J. Information retrieval in the World - Wide web: making client - based searching feasible[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1995, 27(2):183-192.
- [6] 贺晟,程家兴,蔡欣宝.基于模拟退火算法的主题爬虫[J].计算机技术与发展,2009,19(12):55-58.
- [7] 刘汉兴,刘财兴.主题爬虫的搜索策略研究[J].计算机工程与设计,2008,29(12):3160-3162.
- [8] 袁浩,黄烟波.网页标题分析对主题爬虫的改进[J].计算机技术与发展,2009,19(6):22-24.
- [9] 陶晓俊,朱敏.基于规则引擎的企业服务开发模式[J].计算机技术与发展,2008,18(2):115-118.
- [10] 刘伟.Java 规则引擎——Drools 的介绍及应用[J].微计算机应用,2005,26(6):717-721.
- [11] Phalp K T, Henderson P, Walters R J, et al. RolEnact: role-based enactable models of business processes[J]. Information and Software Technology, 1998, 40(3):123-133.
- [12] 希顿,李纯,童兆丰,等.网络机器人 Java 编程指南[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [13] 王李军,陶明亮,张曙,等.面向业务规则引擎研究[J].计算机工程,2007,33(24):52-56.

(上接第 59 页)

2006, 18(2): 34-36.