ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.20, No.10, October 2009, pp.2787−2798
doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03631
© by *Institute of Software, the Chinese Academy of Sciences*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

无线传感器网络中的地址分配协议*

杜治高+, 钱德沛, 刘 轶

(北京航空航天大学 计算机学院 中德联合软件研究所,北京 100191)

Addressing Protocols for Wireless Sensor Networks

DU Zhi-Gao+, QIAN De-Pei, LIU Yi

(Sino-German Joint Software Institute, School of Computer Science, BeiHang University, Beijing 100191, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhigao.du@jsi.buaa.edu.cn

Du ZG, Qian DP, Liu Y. Addressing protocols for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(10): 2787−2798. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3631.htm

Abstract: Address plays an important role in WSN (wireless sensor networks), which is used to identify sensor node and enable communication protocols. Due to the numerous sensor nodes and network dynamics in WSN, it is difficult even impossible to configure address for each node manually. With its unique characteristics, addressing protocols for TCP/IP and ad hoc networks are not suitable for WSN. So addressing auto-configuration protocol for WSN has to be devised. Firstly, the need for addressing protocol in WSN is analyzed. The research issues and challenges of designing addressing protocol are also summarized. Then, the present representative addressing protocols are classified, introduced in detail and compared in characteristics and performance. Finally, the open issues and future research directions are pointed out.

Key words: wireless sensor network; addressing; MAC address; network-layer address; cross-layer design; data attribute

摘 要: 地址用来标识节点,使能网络通信协议,在无线传感器网络中扮演重要角色.由于无线传感器网络中节点众多,再考虑其网络动态性,手动地为每个节点分配地址是一件繁琐甚至无法完成的工作,于是,地址分配协议成为必需.由于无线传感器网络自身所具有的特点,传统的DHCP协议和ad hoc网络的地址分配协议对其不再适用.分析了无线传感器网络地址分配协议的必要性,总结了地址分配协议需要解决的问题和所面临的挑战,并对已有地址分配协议进行了分类.介绍和比较了当前有代表性的地址分配协议,并指出了它们的问题,分析了地址分配协议下一步研究的重点.

关键词: 无线传感器网络;地址分配;MAC地址;网络层地址;跨层设计;数据属性

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673180 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2009AA01Z144 (国家高技术研究发展计划(863)); the Int'l Science and Technology Cooperative Program of China under Grant No.2006DFA11080 (国际合作计划项目); the Research Program of Federal Ministry of Education and Research of Germany under Grant No.01BU0680 (德国教研部资助项目)

Received 2009-02-02; Accepted 2009-04-10

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

随着微机电系统、传感与无线通信技术的迅速发展,无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)受到了研究人员的广泛关注.WSNs 由广泛分布的具有传感、数据处理和短距离无线通信功能的传感器节点组成,这些节点能够采集监测区域的相关数据,并以多跳的方式将结果发送给用户.WSNs 在军事国防、环境监测、应急响应、智能家居等众多领域具有广泛的应用前景[1,2].

地址用来标识节点,使能网络通信协议,在 WSNs 中扮演着重要角色.由于 WSNs 节点一般依赖于电池供电,能量有限且难以补充,地址长度必须尽量简短,所以,为节点预设 TCP/IP 网络中的 MAC 地址这类全球唯一地址的方法并不合适.WSNs 中节点众多,再考虑到网络动态性,为每个节点手动地分配地址是一项繁琐甚至不可能完成的任务.鉴于以上原因,近年来研究人员对 WSNs 地址分配协议进行了很多研究工作,并已经获得了一些初步成果.

为了总结现有研究进展,为进一步研究 WSNs 地址分配协议提供参考和思路,有必要对当前的地址分配协议进行分析和比较.文献[3]简单总结了地址分配协议的研究内容,介绍了几种常见的地址分配协议.但它对地址分配协议的动机以及挑战性缺乏深入分析,对当前研究成果的调研并不全面,也没有对各种协议的特点进行比较和总体分析.文献[4]对 WSN 的寻址方式进行了总结,但它较少关注地址分配协议研究,侧重于分析当前路由协议中节点的识别问题.本文首先分析了地址分配协议的必要性、挑战性,并对现有地址分配协议进行了分类.然后依照 MAC 地址分配、网络层地址分配、跨层地址分配协议的分类方式,对现有地址分配算法进行了介绍.本文也对现有算法从特点和性能上进行了比较和分析.最后,本文对地址分配协议研究思路的发展趋势进行了总结,并指出了进一步的研究过程中需要关注的问题.

1 WSN 地址分配协议概述

1.1 WSN地址分配协议的必要性

与 TCP/IP 网络一样,WSN 在 3 个层次上需要地址:MAC、路由、数据属性[5].由于 WSN 与具体应用联系紧密,这 3 个层次上地址的需求都因应用场景和通信协议的差异而不尽相同.MAC 协议可以分为基于 TDMA 和基于竞争这样两类[6].在 TRAMA[7]和 SMACS[8]这类基于 TDMA 的 MAC 协议中,通过节点间的本地协调,为传输链接分配了专用时隙,所以不需要在每个数据包中包含 MAC 地址.而在基于竞争的 MAC 协议中,MAC 地址必须包含在每个数据包中.这意味着,由于节点能量有限,基于竞争的 MAC 协议对 MAC 地址的长度更加敏感.

网络层地址用来在路由协议中标识数据包最终目的节点地址.在大部分 WSN 应用中,网络流量集中在节点向网关报告数据,节点之间的点对点通信需求不大.基于 WSN 这种特殊的汇聚型网络流量模型,很多研究人员认为网络层地址并不必要[9,10].事实上,研究人员也提出了很多无地址的路由协议.比如 SPIN[11],Directed Diffusion[12]就分别使用了元数据和属性/值对来实现数据传输,没有使用网络层地址.这种把原本应用层使用的数据属性放到网络层中代替地址的方案,是一种跨层设计思路,在 WSN 协议设计中被广泛采用.但从某种意义上来讲,元数据、属性/值对或者节点地理位置这些数据属性本身也可以看作是一种特殊的地址形式.此外,WSN 中仍有部分路由协议依赖于唯一网络层地址,比如 LEACH[13],TEEN[14].最后,WSN 中节点管理、程序上载、数据重传等活动也要求节点拥有唯一的网络层地址.

在 WSN 中,节点能量是稀缺资源,所有 WSN 协议设计都围绕着节能展开.研究表明,WSN 节点每传输 1bit 到 100m 距离外消耗的能量等于执行 3 000 条指令的耗能[15],所以,WSN 节点耗能主要集中在数据传输上.而 WSN 中每个包携带的数据量很小,一般只有 8bit~16bit[8],如果地址长度过大,可能导致其传输耗能比负载更多,这是不可接受的.因此在出厂时,给节点设置全球唯一地址这种方案在 WSN 中是不合适的,节点的地址应该尽量短小,其表示形式应依据网络部署情况动态决定.由于 WSN 中节点众多,部署时手动地给每个节点分配地址是一件及其繁琐的任务.再考虑到网络的动态性,比如节点失效和补充,手动分配地址甚至可以说是一项不可完成的任务.因此,为 WSN 设计动态地址分配协议是必须的.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1.2 WSN地址分配协议的研究内容和所面临的挑战

无论设计哪一个层次的地址分配协议,都需要解决以下这些基本问题:

(1) 地址分配.为每个节点分配合法地址是协议的核心任务.地址分配面临众多挑战.首先,为了节省能量,地址分配过程中需要尽量减少节点间控制消息的交换.其次,考虑到 WSN 普遍规模较大,地址分配方式必须具有良好的伸缩性.最后,补充新节点在 WSN 中很常见,此时,网络应能迅速地为新节点分配有效地址,而无须为所有节点重新分配地址.

(2) 地址回收.如前文所述,为了节能,WSN 中节点地址必须尽量短小.地址回收是节省地址空间的有效手段,因此,它也是地址分配协议中一个重要组成部分.节点失效是 WSN 中的常见现象,此时,其地址需要回收.WSN 的另外一个特殊之处在于,众多冗余部署的节点通过轮流休眠和工作,延长了网络整体寿命.地址分配协议也需要适应这种特性,在节点休眠时可以考虑回收其地址.

(3) 地址表示形式.如前文所述,WSN 的地址表示形式应根据网络部署情况而定.由于 WSN 中节点失效和补充频繁,甚至可能因此引发网络分割和重新联通,使得网络规模发生较大变化,所以,决定 WSN 的地址形式,尤其是地址长度是一个难题.若地址太长,则会过于耗能.若太短,则地址空间可能会由于新加入节点而不够用.

(4) 地址碰撞检测和解决.可能造成 WSN 中地址碰撞的原因很多,比如某些节点失效可能造成网络分割,之后两个孤立网络可能为各自的节点分配相同的地址.当补充新节点之后,网络可能又恢复联通,这时就会出现地址碰撞现象.另外,有些协议中地址分配基于节点随机选择地址,这也可能造成地址碰撞.如何检测地址碰撞并解决这个问题也是地址分配协议需要考虑的.

(5) 跨层地址绑定.在 TCP/IP 网络中,ARP 协议的作用就是映射 MAC 地址和 IP 地址.在 WSN 中,也需要考虑同样的问题.

1.3 WSN地址分配协议的分类

WSN 与应用高度相关,研究人员从不同角度提出了多种地址分配协议.为了对这些协议有一个整体的认识,有必要对它们进行分类.由于目前还没有统一的分类方式,我们尝试着从协议层次、地址唯一性、地址分配方式等方面对已有协议进行了分类.

(1) 根据地址的唯一性可以分为全球唯一性地址、网络唯一性地址和本地唯一性地址[16].全球唯一性地址,比如 MAC 地址,在全球不重复.网络唯一性是指地址在部署的网络中唯一,在两个不联通的网络中地址可以重复使用.本地唯一性是指地址在网络局部范围内唯一,地址在邻居节点中不重复.

(2) 根据地址分配的网络层次可以分为 MAC 地址分配协议、网络层地址分配协议和跨层地址分配协议.MAC 地址用来指明数据包的下一跳节点,因此,MAC 地址只要求本地唯一,即只需保证每个节点的所有直接邻居节点拥有不同 MAC 地址即可.而网络层地址用来指定数据包的最终接收节点,通常情况下需要保证网络唯一性.但是,由于 WSN 特殊的流量模型,有些协议中网络层地址也是由多个节点共享.另外有一些跨层地址分配协议综合考虑了 MAC 协议和路由协议的地址需求,为节点分配的地址具有灵活的表示形式,既可以用作 MAC 地址,也可以用作网络层地址.

(3) 根据地址分配的方式可以分为集中式、分布式和混合式.集中式协议一般由基站节点为其他节点分配地址,其缺点是伸缩性差.分布式协议中节点通过本地协商来分配地址,其缺点是地址碰撞严重.在混合式协议中则是部分节点为其他节点分配地址,比如簇头节点为簇成员节点分配地址,父亲节点为子节点分配地址.

(4) 根据地址分配的时机可以分为前摄式分配和按需分配.前摄式协议在网络启动时为所有节点分配地址.按需分配协议在节点需要传输数据时即时分配地址.比较而言,按需分配协议更加节省地址空间,但是会增加网络传输延迟,对从基站节点到单个节点的通信模式支持也不够.

(5) 按照地址表示形式可以分为定长地址、变长地址和基于数据属性的地址.定长地址使用更加简单,变长地址则能够调整地址空间,更加灵活.另外也有一些传输协议使用了基于数据属性的地址,比如节点位

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

置、元数据、属性/值对等.

2 WSN 地址分配协议分析

DHCP[17]是 TCP/IP 网络中广泛应用的地址分配协议,它假设地址服务器和客户端之间能够直接通信,因此无法直接应用于 WSN 这种多跳网络.过去几年,研究人员针对移动 ad hoc 网络(mobile ad hoc networks,简称 MANET)提出了很多地址分配协议[18].但是这些协议主要关注节点的移动性和网络分割合并对地址分配带来的影响,对 WSN 中至为重要的节能问题关注得不够.

近年来,学术界提出了很多 WSN 专用的地址分配协议,我们选取其中比较重要和具有代表性的算法,对它们的核心机制和特点进行介绍,对它们的优、缺点加以分析.为了方便比较,我们采用上文第 2 种方式对这些算法进行分类介绍.

2.1 MAC地址分配协议

(1) RETRI[19]为事务(transaction)分配本地唯一 ID.事务定义为节点参与的任何需要维护状态的活动.节点监听邻居节点通信,记录已经占用的 ID,在需要进行事务时随机地为其选择空闲 ID.Zhong 等人[20]提出了与 RETRI 类似的地址分配方案.节点维护其所有两跳邻居已经占用的地址列表,随机地从空闲地址中为自己选择地址.

这是两个最早提出的WSN专用的地址分配协议.它们都依赖于节点被动监听邻居节点的通信,记录被占用的 ID.由于 WSN 中数据量往往不大,所以不能保证节点发现所有邻居节点的地址,也就无法保证完全避免地址碰撞.另外,持续监听邻居节点通信也会带来能耗问题.最后,被动监听模式无法发现邻居节点失效,地址回收也就无法实现.

(2) Schrugers 等人[9,21]提出了一种基于本地信息交换的分布式 MAC 地址分配协议.作者首先指出,MAC 地址用来指明数据包的下一跳节点,因此不需要是网络范围唯一地址,只需保证单个节点的所有邻居节点拥有不同的 MAC 地址即可,即 MAC 地址在两跳范围内唯一.网络启动之后,节点间交换 INFO 控制信息,其中包括自己和直接邻居的地址列表.一段时间后,节点获得了所有两跳邻居节点的地址列表,然后从空闲地址中为自己选择一个地址.在网络运行阶段,节点间仍然周期性地交换 INFO 控制信息,根据收集到的两跳邻居地址列表,查看自己的地址是否本地唯一.如果存在地址冲突,则重新选择一个空闲地址.该协议的另外一个创新是对地址使用 Huffman 编码.节点在从空闲地址中为自己选取地址时优先使用较小的地址,这意味着较小的地址在网络中使用频度更高.作者提出,对地址进行 Huffman 编码,在数据传输中使用 Huffman 码代替 MAC 地址.

该协议的优点在于,通过节点间的控制信息交换,能够检测和消除地址碰撞,也可以有效地解决地址回收问题.使用 Huffman 编码之后,能够有效缩短地址长度,从而节省能量.这个协议的缺点是持续的控制信息交换可能会带来能耗问题.另外,Huffman 编码中的地址使用频度只能依靠实验获取经验值,而且这种频度在不同网络部署条件下是不一致的,如何在每个节点中预设准确的 Huffman 编码是一个难题.

(3) Kulkarni 和 Schrugers 等人[10]还提出了一种将本地唯一地址分配给链接的方法.文献[10]首先讨论了链接地址的唯一性要求,对于任意节点,需要保证它参与的所有链接与其邻居节点参与的所有链接拥有不同的地址.在一个数据链接中,数据传输方称为主动节点,数据接收方称为被动节点.当需要进行数据传输时,主动节点先通过控制信息应答了解其邻居节点参与的链接占用了哪些地址.然后通过被动节点了解其邻居节点占用了哪些地址.之后主动节点挑选空闲的最小地址作为该链接的地址.与文献[9]一样,地址经过 Huffman 编码后使用.该协议只在数据传输时才进行地址分配,进一步减小了地址空间.但是实时的地址分配也会带来额外的计算开销和传输时延.

(4) VGSR[22]是一个基于地理位置的 MAC 地址分配协议.协议首先将传感区域划分为虚拟格(virtual grid),虚拟格的边长取值为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$d=\sqrt{\frac{S_{field}}{N}},$$

其中,S_{field} 表示传感区域面积,N 表示节点总数.d 的取值保证了每个格中平均有一个节点.定义 d_r 为

$$d_r=\left(\left\lfloor\frac{2\times R}{d}\right\rfloor+1\right)\times d,$$

其中,R 为节点通信半径.根据 MAC 地址在两跳之外可以复用的原则,距离大于 d_r 的虚拟格可以使用相同地址.图 1 是虚拟格地址重用示意图.每个节点根据自己的坐标来计算属于哪个虚拟格.

$$\begin{cases}x_1=\lceil x/d\rceil \bmod a\\ y_1=\lceil y/d\rceil \bmod a\end{cases},$$

其中 x,y 表示节点的横纵座标.a 表示 d_r/d.x_1, y_1 表示虚拟格的横纵序号.然后据此计算该虚拟格的地址:

$$A_{addr}=\begin{cases}2x_1+y_1^2, x_1<y_1\\ x_1^2+2y_2+1, x_1>y_1\end{cases}.$$

由于一个虚拟格中有可能存在多个节点,为了避免发生地址碰撞,节点在使用地址之前首先广播声明,如果发现碰撞,则选择地址空间中未被分配给虚拟格的保留地址.如果保留地址也全部被占用,则说明该区域活动节点过多,该节点休眠.

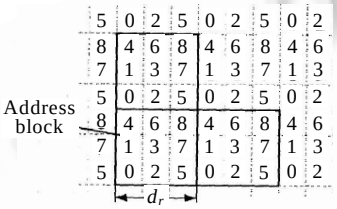

Fig.1 MAC addresses in VGSR

图 1 VGSR 地址示意图

VGSR 中节点可以直接根据自己的坐标计算自己的 MAC 地址,避免了地址分配控制信息的交换,节省了能量.但是协议依赖于精确定位,对节点要求较高.另外,在节点不均匀分布的场景下,可能出现有些虚拟格中不存在节点,有些虚拟格中节点众多的现象.这可能引发地址空间不够用和地址碰撞严重的问题.

(5) Chin 等人[23]提出,在传输过程中不携带 MAC 地址,以减小地址传输开销.网络启动时,节点之间交换 MAC 地址,任意两个邻居节点 A 和 B 利用其 MAC 地址哈希生成一个它们专用的密钥(key).在数据传输时,发送方首先计算负载的 CRC,然后用密钥与负载的前 L 位进行 XOR 运算.接收方收到数据包后,依次用自己持有的密钥对该数据包前 L 位进行 XOR 运算,如果找到能够通过 CRC 的那个密钥,也就找到了数据来源.作者也提出了一种改进方法,即直接用 key 作种子进行 CRC 计算.该协议由于不需要在数据包中携带 MAC 地址,有效地节省了传输能耗.但是密钥的使用也降低了 CRC 的纠错能力.在节点密度较大时,依次使用同各个邻居节点的密钥进行计算也会带来较大时延.

2.2 网络层地址分配协议

(1) Doss 等人[24,25]提出了一个类似于 DHCP 的网络层地址分配协议,基站节点为传感器节点分配网络唯一地址.网络启动之后基站节点广播自己的地理位置,每个节点计算自己到基站节点的距离.然后节点向基站节点发送地址请求包,该请求包中包含根据节点 MAC 地址生成的唯一标识.收到这个地址请求包的中间节点,如果距离基站节点更近才转发这个地址请求包,否则直接丢弃.基站节点收到地址请求后,选择空闲的地址回应这个请求.同理,只有距离该节点更近的中间节点转发这个应答包.为了使得地址可以重复使用,该协议的地址分配是基于租约(lease)的.在节点退出网络时,可以向基站节点发送控制包,释放自己的地址.

该协议中因为基站节点充当地址服务器,可以有效地对地址空间进行管理,避免了地址碰撞的发生,回收地

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

址.但是由于地址请求和应答都以多跳广播方式进行,在大规模网络中会带来能耗和可靠性问题.

(2) LEADS[26]中定义了 4 种节点角色:ADA(address agents),ADR(address root),ADP(address proxy),普通节点.其中,ADA 之间采取分布式协商方式分割整个地址空间,它负责给普通节点分配地址.ADR 是特殊的 ADA,它能生成一个新的网络划分(partition).ADP 用来联通 ADA,使得它们能够互相通信.LEADS 针对节点加入网络、退出网络、网络的分割和合并等情况进行了具体分析.

由于 ADA 的存在,LEADS 的伸缩性得到了保证,能够适应大规模的 WSN.实验结果表明,LEADS 的控制消息开销很小.但是 ADA 之间的地址空间划分是一件困难的工作,LEADS 对此并没有进行充分的研究.比如由于新节点的加入,某个 ADA 可能地址不够.某些区域节点稀疏部署,该 ADA 可能持有大量空闲地址.另外,ADA 和 ADR 显然比普通节点更加耗能,如何选择这些节点,并保证它们不会过快耗尽能量也值得考虑.

(3) 部分研究人员将网络层地址分配和路由协议结合起来考虑,得到了一些研究成果.这类协议通常构造以基站节点为根的树结构,在此结构中,父节点为子节点分配地址,地址的形式往往也体现了路由关系.

TreeCast[27]也是一个基于树结构的地址分配协议.算法首先确定 b,使得 $2^b>>N$,N 为网络中一个节点可能的最多直接邻居节点数目.网络中的节点根据距离 sink 的跳数 k 分层,第 k 层节点的地址形式为$(0|1)^{bk}$.TreeCast 中第 n 层节点为第 n+1 层节点分配地址.地址分配开始后,第 m+1 层节点 A 监听第 m 层节点的地址 confirm 消息,随机地从第 m 层节点中选择一个作为父亲节点.然后节点 A 随机地产生一个 b 位的地址,加在父亲节点地址之后,作为自己的候选地址.节点 A 发送 probe 包等待父亲节点验证该地址.如果父亲节点检测到其他子节点已经占用这个地址,则节点 A 重新选择地址.如果该地址空闲,父亲节点广播 confirm 包确认节点 A 的地址.节点 A 获得地址后,作为父亲节点监听第 m+2 层节点的 probe 包,验证子节点的候选地址.地址分配过程依此递归进行.基站的查询数据包和节点的消息报告数据包根据树结构和地址结构路由.由于子节点的地址总是比父亲节点长 b 位,在大规模 WSN 中,TreeCast 会产生过长的地址.而且由于 b 的选择方式,地址空间也会有很大的浪费.

在文献[28]中,基站节点广播控制包启动地址分配.节点视第 1 个转发该控制包给自己的节点为父亲节点,并向其申请地址.父亲节点将自己的地址扩展 1 位,分配地址给子节点.该过程中子节点以时间戳或者 MAC 地址等唯一标识自己.这个地址分配过程递归地进行,至所有节点都拥有唯一地址为止.在数据传输过程中,节点将数据包源地址的最后一部分去掉就得到其下一跳节点地址.为了避免大规模网络中产生过长的地址,作者提出地址分层(tier),地址在层间重用.比如每 4 级(level)为 1 层,树结构上一条链路节点地址可能依次为 1-12-122-1224-1-12-122-1224-1-122.再考虑到多个基站节点情况,地址最终形式分为基站地址、层地址、节点地址 3 部分.这样对于两层间的边界节点来说,路由存在问题.本文提出,让上一层的最后一级(level)节点和下一层的第 1 级节点地址重合.这个协议通过地址在层间的复用,一定程度地避免了 TreeCast 地址过长的问题.但它的问题在于如何确定级地址的长度,这取决于子节点的个数,也取决于网络的具体部署情况.

在文献[29]中,首先根据树结构为节点分配临时地址,然后统计网络中节点总数,分配最终地址.基站首先广播 initialization 控制包发起临时地址分配过程.收到该控制包的节点随机选择一个 4 字节的 ID 标识自己,向基站请求地址,基站分配一个 8 位的临时地址给子节点.之后,该节点发送 initialization 包,充当父亲节点,为自己的子节点分配地址.依此递归,构造树结构,并分配临时地址.临时地址分配结束之后,叶节点向父亲节点发送子树大小通知包,发起网络节点总数统计过程.子树大小消息递归地向根节点传递,直至基站.基站根据网络中的节点总数确定地址长度,并根据自己的子树个数和大小,为各子节点分配最终地址.子节点收到地址分配包之后,确定从自己的地址开始,长度为自己子树大小的这段连续地址是保留给自己这个子树的,进而为自己的各子节点分配地址.如此递归,直到网络中所有节点得到唯一地址.与 TreeCast 和文献[28]比较,文献[29]通过两次地址分配过程,有效地压缩了地址空间,这有利于节省能量.但却因为限定了地址空间,也使得该协议难以有效适应网络动态性.

SIDA[30]使用了变长地址,并将较短地址分配给距离基站较远的节点,以减小地址传输的开销.SIDA 中的地址分为 LI 和 PID 两部分,其中 LI 指示了地址长度,PID 为节点的实际地址.地址分配算法分为 3 个阶段:初始 ID 分配,确定 LI 长度,PID 交换.初始 ID 分配开始后,基站将自己的地址设置为 0,然后随机选择 3 个邻居节点,为它

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

们分配地址 1,00,01.随后这 3 个节点都选取两个邻居节点,在自己的地址后添加 1 位作为邻居节点的地址.依此递归,构造基站为根的树,并为每个节点分配初始 ID.初始 ID 分配结束后,如果节点在邻居节点中拥有最长的地址,则将地址长度发送给基站.基站统计网络中初始 ID 最大长度后,确定 LI 的长度.在以上两个阶段之后,较短地址分配给了离基站更近的节点,这与算法目的不符,所以需要进行 PID 交换.PID 交换由节点本地计算完成,节点首先计算自身 ID 在地址空间中的顺序 k,然后把自己的地址设置为第 $N-k$ 个地址,其中 N 为地址总数.SIDA 由于采用了变长地址,有效地缩短了地址长度.通过将较短地址分配给远离基站的节点,有效地降低了地址的传输耗能.但与文献[29]一样,SIDA 对于节点失效后的地址回收以及新加入节点的地址分配仍然考虑不足.

2.3 跨层地址分配协议

(1) Ali 等人[31]提出了一个针对多层分簇网络的地址分配方案,地址具有灵活的表示形式,既可以用作 MAC 地址,也可以用作网络层地址.该方案假设簇最多 3 层,每个簇的簇成员最多 16 个.从顶层向下,簇头给簇成员分配簇内地址,遵循约束条件:同一个簇其各节点地址不同,两跳内地址不重用.另外,每层簇结构具有层地址.节点层地址加上簇内地址可用作 MAC 地址.簇头地址加上簇内地址可以作为全网唯一地址.簇内节点通信,使用簇内地址作为网络层地址.同层节点通信,使用层地址加上簇内地址作为网络层地址.跨层节点通信,使用全网唯一地址.实验结果表明,该协议有效地降低了地址传输开销.

(2) Zhou 等人[32]针对 directed diffusion 路由协议进行地址分配,其特点是属性和本地唯一地址配合使用,实现路由.网络启动后节点随机挑选一个 ID.基站在需要查询数据时广播 interest 控制信息.节点查看转发 interest 给自己的每个邻居节点的 ID,如果该 ID 和自己的相同,则随机选择另外一个地址,并广播 change 控制信息.随机时延后,节点转发 interest 控制信息.如果一个节点收到多次同一个 ID 转发的一个 interest 消息,则认为其两个邻居节点存在地址碰撞,广播 resolve 消息,通知它们中出现了地址碰撞.收到 resolve 消息后,发现自己出现地址碰撞的节点随机选择其他 ID,并发送 change 控制消息.在转发 interest 控制信息的过程中,每个节点记录第 1 个转发该消息给自己的邻居节点 ID,作为转发节点应答消息的下一跳.当符合查询条件的节点收到 interest 消息后,返回 reply 消息.reply 消息沿 interest 传播路径回传至网关.Zhou 等人为节点分配的 MAC 地址用来构造节点到基站的回传路径,保证了数据的顺利传输.将 MAC 地址的分配和路由协议结合起来,是跨层设计思路的典型应用.

(3) OAA[33]针对 AODV[34]提出了一个地址分配方案,为节点分配本地唯一的 MAC 地址,按需为节点分配网络层地址.在 MAC 地址分配过程中,节点 A 随机选择一个地址,然后广播邻居发现包进行 DAD(duplicated address detection).节点 A 的邻居节点 B 收到该控制信息后,回应邻居广播包,其中包括节点 B 的地址和节点 B 的邻居节点的地址.如果节点 A 发现没有地址碰撞,则分配地址成功,否则重新选择一个地址进行 DAD.

AODV 是一个按需路由协议,其特点是在节点需要传输数据时实时地进行路由发现.OAA 的网络层地址按需分配,与 AODV 的路由发现过程融合在一起.节点随机地为自己选择一个网络层地址,随机地为基站选择一个地址,以这个地址对作为节点与基站通信的标识.图 2 为 AODV 和 OAA 路由发现控制包各域的对应关系.在路由发现包的转发过程中,中转节点对节点和基站的地址对进行 DAD,一旦发现重复就丢弃路由发现包.如果没有发现碰撞,则转发该控制信息,并建立反向路由.

OAA 地址分配过程与 AODV 路由协议的路由发现融合在一起,减少了地址分配的控制信息交换,有效地节省了能量.网络层地址是临时分配给节点的,节省了地址空间.但是,由于地址不是永久性的,无法用作节点标识,在节点管理、更新节点程序时无法使用.

(4) AIMRP[5]基于 IEEE 802.11 协议,为事件驱动型 WSN 设计了 MAC 协议和路由协议.作者首先指出,在事件驱动型 WSN 中,节点监测到事件时向基站报告,基站无须主动与某个具体节点通信,节点之间也没有相互通信需求,因此节点不需要网络唯一地址.AIMRP 基于以基站为中心的层次结构设计,如图 3 所示.网络启动之后,每个节点首先确定自己的层 ID(tier ID).然后网络进入活动阶段,当某个节点 A 监测到事件,监听到信道空闲之后,广播 RTR(request to relay),其中包括自己的层 ID 和随机选择的一个 ID.邻居节点 B 收到 RTR 之后,如果自己的层 ID 比 A 的要小,则等待一个随机时延,期间如果没有发现 A 的其他邻居节点应答,则节点 B 发送 CTR(clear

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

to relay)应答,其中包括 B 的层 ID 和一个随机选择的 ID.然后,节点 A 将数据发送给节点 B,之后节点 B 成为新的源节点,递归地将数据传递到基站.

AIMRP 充分利用了事件驱动型网络特殊的数据流模型,基于 IEEE 802.11 协议,通过构造网络的层次结构,集成设计了 MAC 协议和路由协议.在传输过程中,除了随机选择的 MAC 地址以外,基本避免了地址的使用.实验结果表明,AIMRP 有效地节省了能量.

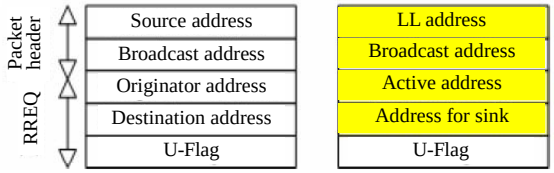

Fig.2 Comparison of route discovery control message in AODV and OAA

图 2 AODV 和 OAA 路由发现包对比

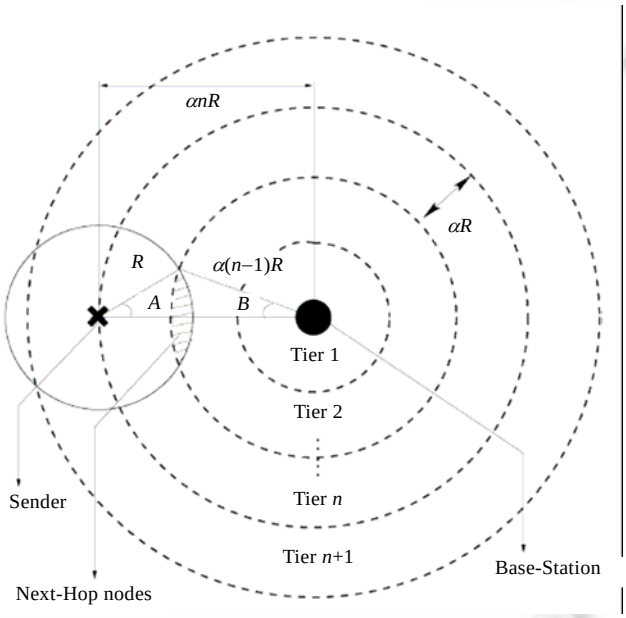

Fig.3 Illustration of routing in AIMRP

图 3 AIMRP 路由示意图

(5) LCA[35]综合考虑了网络层地址和 MAC 地址分配,以及 MAC 地址和网络层地址的映射.LCA 中网络层地址分配是集中式的.节点启动后先发送控制信息查找地址服务器,如果指定时间内没有收到应答,则该节点自己成为地址服务器.普通节点随机选择临时地址标识自己,向地址服务器请求地址.地址服务器选择最小空闲地址回应请求.为了轮流承担地址服务器的能耗,地址服务器在经过 n 次地址分配后,指定最后一个客户端为新的地址服务器.由于在网络启动时地址服务器不知道节点总数,也就无法确定地址长度,以上分配过程中使用足够长的地址.在地址分配结束之后,地址服务器计算节点数目,决定地址长度,并通知全网节点转换为指定长度地址.

网络层地址分配结束后,网络进行 MAC 地址分配.节点间交换网络层地址,进行邻居发现.之后,每个节点为其邻居节点分配 MAC 地址,每个节点都会获得多个 MAC 地址.每个节点保存两个映射表,一个记录自己为邻居节点分配的 MAC 地址和网络层地址映射,另一个记录自己从邻居节点处获得的 MAC 地址和相应的邻居节点网络层地址映射.在通信过程中,节点发包时,用自己分配的 MAC 地址标识对方,收到数据时,通过对方分配的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

MAC 地址识别数据是否是自己的.

LCA 提出了一个完整的地址解决方案,为节点分配了 MAC 地址和网络层地址,并解决了两层地址映射问题.LCA 网络层地址分配中地址服务器是自发选举的,由于节点部署启动时间相近,所以网络中可能出现多个地址服务器.由于采用集中式方式,协议也不适用于大规模 WSN.而在 MAC 地址分配过程中,由于邻居节点间控制信息交换较多,在节点密集地带,可能引发较多传输碰撞,给地址分配带来了负面影响.

2.4 其他地址分配协议及相关研究工作

近年来,研究人员提出了一些基于数据的路由协议.在这类协议中,数据属性替代了地址,它们也可以看作地址的一种特殊形式.为了避免数据盲目传输,SPIN 协议中节点产生或者收到数据之后,先通过 ADV 消息广播该数据的元数据.对这份数据感兴趣的邻居节点通过 REQ 消息请求数据.在 Directed Diffusion 中,基站广播 interest 消息描述自己需要的数据特征,interest 在网络中广播,符合条件的节点向基站报告数据.在 GPSR[36]和 TBF[37]中,地理位置代替了地址.在 GPSR 中,节点利用贪心算法,使得数据包在网络中尽量按照直线传播.TBF 协议在数据包头中指定了传输轨道,中转节点利用贪心算法沿路选择距离传输轨道最近的节点转发数据包.ACQUIRE[38]和 TinyDB[39]将 WSN 视作一个数据库,也是基于数据属性的路由协议.

ZigBee[40]协议规范提出了动态地址分配协议 Cskip.网络中节点被分为 coordinator,router,device 这 3 种角色.Coordinator 管理网络,启动地址分配.每个 router 持有部分地址,为 device 分配地址.文献[41]针对 WSN 中节点分布不均匀导致 Cskip 协议出现这样的问题——某些 router 的地址已经用尽,而其他 router 还有空闲地址的情况进行了优化.文献[42,43]也在 WSN 应用背景下对 ZigBee 地址分配协议进行了优化.

Tu[44]等人将博弈论引入 WSN 地址分配中.他们提出,将 WSN 中的节点视作博弈论的局中人(player),每个节点都试图为自己选择本地唯一的、最简短的地址.GREENWIS[45]首先建立基站到网络边界节点的关键路径,节点以其到关键路径的跳数等五元组标识自己.每个五元组被一组节点共用,利用这个五元组可以方便地解决节点到基站、基站到节点的路由.

3 WSN 地址分配协议比较

上文总结了当前有代表性的地址分配算法,它们的应用场景和研究目标都不尽相同,很难说哪一个更加优越.为了对这些算法有一个整体的把握,我们采取列表的方式,从算法的目标、特点、性能等方面对它们进行比较.在表 1 中,A 代表 MAC 地址分配还是网络层地址分配;B 代表地址分配是集中式,分布式,或者混合式;C 代表地址分配是前摄的还是按需的;D 代表地址唯一性;E 代表地址是定长还是变长;F 代表地址长度;G 代表对网络动态性的适应能力;H 代表协议的时间复杂度;I 代表地址分配协议的控制信息复杂度.

Table 1 Comparison of addressing protocols

表 1 地址分配协议比较

Protocols	A	B	C	D	E	F	G	H	I
RETRI[19]	MAC	Distributed	On-Demand	Locally unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
Ref.[20]	MAC	Distributed	Proactive	Locally unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
Refs.[9,21]	MAC	Distributed	Proactive	Locally unique	Varialbe-Length	Short	Moderate	Low	Low
Ref.[10]	MAC	Distributed	On-Demand	Locally unique	Variable-Length	Short	Moderate	Low	Low
VGSR[22]	MAC	Distributed	Proactive	Locally unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
Ref.[23]	MAC	Distributed	Proactive	Locally unique	Fixed-Length	Short	Good	Low	Low
Refs.[24,25]	Network-Layer	Centralized	Proactive	Networkwide unique	Fixed-Length	Moderate	Good	Moderate	Moderate
LEADS[26]	Network-Layer	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Fixed-Length	Moderate	Good	Moderate	Moderate
TreeCast[27]	Network-Layer	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Variable-Length	Long	Low	High	Moderate
Ref.[28]	Network-Layer	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Variable-Length	Moderate	Low	High	Moderate
Ref.[29]	Network-Layer	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Fixed-Length	Short	Low	High	High
SIDA[30]	Network-Layer	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Variable-Length	Short	Low	High	High
Ref.[31]	Both	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Fixed-Length	Moderate	Moderate	Low	Moderate
Ref.[32]	MAC	Distributed	On-Demand	Locally unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
OAA[33]	Both	Distributed	On-Demand	Networkwide unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
AIMRP[5]	Both	Distributed	On-Demand	Locally unique	Fixed-Length	Short	Moderate	Low	Low
LCA[35]	Both	Hybrid	Proactive	Networkwide unique	Fixed-Length	Moderate	Good	Low	Moderate

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4 总结和展望

近年来,研究人员针对 WSN 地址分配进行了大量的研究,提出了很多新的算法和协议.纵观国内外研究成果可以看出,当前地址分配研究思路呈现以下趋势:根据 WSN 高应用相关性的特点,分析具体应用和通信协议对地址的要求,设计有针对性的地址分配协议,以获得更好的算法效果;地址分配过程与通信协议融合,从而节省地址分配的开销,更有效地支持数据传输;采取跨层设计方法,设计灵活的地址形式,同时满足 MAC 层和网络层的地址需求,进一步考虑两层地址映射,提出完整的地址分配方案;在节能方面,除了地址长度外也考虑地址传输频度,采取不等长地址,使得距离基站更远的节点分配更短的地址,从而平衡地址传输耗能.

总体而言,尽管研究人员对于地址分配研究进行了大量工作,也取得了相当成果,但这些研究成果大多存在理论和实践上的缺陷和不足.可以说,WSN 地址分配协议研究还处于起步阶段,要形成成熟的应用技术,在以下几个方面还需要进一步加以提高:

(1) 设计更加适应网络动态性的地址分配协议.在 WSN 中节点失效和补充新节点是常见的现象,这种网络动态性会带来地址回收、即时地址分配等问题.WSN 中冗余节点的轮流休眠和工作也可看作是网络动态性的一种特殊形式.为了适应这种网络动态性,地址空间应该具备伸缩性.而出于节能考虑,地址需要尽量简短.为了满足这两个看似矛盾的要求,需要设计灵活的地址形式.

(2) 适应节点移动.节点移动是当前 WSN 研究的趋势,地址分配协议也需要适应这一趋势.为了节能,MAC 地址一般是本地唯一的,节点移动之后可能会发生地址碰撞,因此需要研究灵敏而有效的地址碰撞检测和消除机制.而对于基于簇结构、树形结构的网络层地址分配协议而言,节点移动后,则地址需要重新分配.

(3) 提高对组播和广播的支持.组播和广播在 WSN 中很常见,比如很多应用中常见的需求是基站需要查询某一部分节点的传感数据.以 WSN 节点的地理信息和网络的逻辑结构为基础,从地址层面上提高对组播和广播的支持是必要的.

(4) 提高地址分配协议的实用性.现有很多协议中,地址分配基于广播形式的节点本地通信进行,在复杂环境、稠密网络中,这种通信的可靠性、完整性难以保证.这会对地址分配的唯一性、成功率带来负面影响.

(5) 提高地址分配协议研究的说服力.当前协议验证方式大多采用建模分析和仿真实验.数学建模一般过于简单,难以反映实际应用情况.仿真实验则往往规模较小.这些都影响了地址分配协议的说服力.

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8): 102−114.

[2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,14(7):1282−1290 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[3] Uddin MYS, Akbar MM. Addressing techniques in wireless sensor networks: A short survey. In: Proc. of the ICECE. Dhaka: IEEE Press, 2006. 581−584.

[4] Hou HF, Liu XW, Yu HY, Hu HY. Survey on addressing methods of wireless sensor networks. Telecommunications Science, 2007,(2):67−77 (in Chinese with English abstract).

[5] Kulkarni S, Iyer A, Rosenberg C. An address-light, integrated MAC and routing protocol for wireless sensor networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006,14(4):793−806.

[6] Jian Q, Gong ZH, Zhu PD, Gui CMY. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. Journal of Software, 2008,19(2): 389−403 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/389.htm

[7] Rajendran V, Obraczka K, Garcia-LunaAceves JJ. Energy-Efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. In: Ian A, ed. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003. 181−192.

[8] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor networks. IEEE Personal Communication, 2000,7(5):16−27.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[9] Schurgers C, Kulkarni G, Srivastava MB. Distributed on-demand address assignment in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed System, 2002,13(10):1056−1065.

[10] Kulkarni G, Schurgers C, Srivastava M. Dynamic link labels for energy efficient MAC headers in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Sensors. Orlando: IEEE Press, 2002. 1520−1525.

[11] Kulik J, Heinzelman WR, Balakrishnan H. Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. Wireless Networks, 2002,8(2-3):169−185.

[12] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J. Directed diffusion for wireless sensor networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2−16.

[13] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660−670.

[14] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Int'l Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009−2015.

[15] Pottie GJ, Kaiser WJ. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 2000,43(5):51−58.

[16] Karl H, Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2005. 184−185.

[17] Droms R. Dynamic host configuration protocol. 1997. http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2131.txt

[18] Weniger K, Zitterbart M. Address autoconfiguration in mobile ad hoc networks: Current approaches and future directions. IEEE Network Magzine, 2004,18(4):6−11.

[19] Elson J, Estrin D. Random, ephemeral transaction identifiers in dynamic sensor networks. In: Forouzan G, ed. Proc. of the ICDCS-21. Phoenix AZ: IEEE Press, 2001. 459−468.

[20] Zhong LC, Rabaey J, Guo C, Shah R. Data link layer design for wireless sensor networks. In: Edmonds A, ed. Proc. of the MilCom. Washington: IEEE Press, 2001. 352−356.

[21] Schurgers C, Kulkarni G, Srivastava MB. Distributed assignment of encoded MAC address in sensor networks. In: Vaidya NH, ed. Proc. of the 2nd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York: ACM Press, 2001. 295−298.

[22] Tian Y, Sheng M, Li J. Virtual grid spatial reusing algorithm for MAC address assignment in wireless sensor network. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2008,4(2):142−154.

[23] Chin KW, Lowe D, Sanchez RG. A new technique for reducing MAC address overheads in sensor networks. Communications Letters, 2006,10(5):338−340.

[24] Doss RC, Chandra D, Pan L, Zhou W, Chowdhury M. Lease based addressing for event-driven wireless sensor networks. In: Antonio C, ed. Proc. of the ISCC. Pula-Cagliari: IEEE Press, 2006. 251−256.

[25] Doss RC, Chandra D, Pan L, Zhou W, Chowdhruy M. Address reuse in wireless sensor networks. In: Tucker R, ed. Proc. of the Australian Telecommunication Networks & Applications Conf. Melbourne: ATNAC, 2006. 329−333.

[26] Lu JL, Valois F, Barthel D, Dohler M. Low-Energy address allocation scheme for wireless sensor networks. In: Proc. of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium. Athens: IEEE Press, 2007. 1−5.

[27] Audhuri SP, Du S, Saha AK, Johnson DB. TreeCast: A stateless addressing and routing architecture for sensor networks. In: Proc. of the 18th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp. Santa Fe: IEEE Press, 2004. 221−228.

[28] Jobin J, Krishnamurthy SV, Tripathi SK. A scheme for the assignment of unique addresses to support self-organization in wireless sensor networks. In: Sumner SM, ed. Proc. of IEEE the 60th Vehicular Technology Conf. Milan: IEEE Press, 2004. 4578−4582.

[29] Ould-Ahmed-Vall E, Blough DM, Heck BS, Riley GF. Distributed unique global ID assignment for sensor networks. In: Kaveh P, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). Washington: IEEE Press, 2005. 573−580.

[30] Lin JL, Liu YH, Lionel M. Ni. SIDA: Self-Organized ID assignment in wireless sensor networks. In: Macro C, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Pisa: IEEE Press, 2007. 1−8.

[31] Ali M, Uzmi ZA. An energy-efficient node address naming scheme for wireless sensor networks. In: Proc. of the Int'l Networking and Communcations Conf. (INCC). Pakistan: IEEE Press, 2004. 25−30.

[32] Zhou H, Mutka MW, Ni LM. Reactive ID assignment for sensor networks. In: Kaveh P, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Washington: IEEE Press, 2005. 567−572.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[33] Motegi S, Yoshihara K, Horiuchi H. Implementation and evaluation of on-demand address allocation for event-driven sensor network. In: Proc. of the Symp. on Applications and the Internet (SAINT). Trento: IEEE Press, 2005. 352−260.

[34] Perkins CE, Royer EM. Ad hoc on-demand distance vector routing. In: Sumi H, ed. Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications. New Orleans: IEEE Press, 1999. 90−100.

[35] Teng R, Morikawa H, Aoyama T, Zhang B. Network-Layer and MAC-layer address autoconfiguration in self-organized sensor networks. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on ITS Telecommunications. Chengdu: IEEE Press, 2006. 1005−1010.

[36] Karp B, Kung H. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM Press, 2000. 243−254.

[37] Niculescu D, Nath B. Trajectory based forwarding and its applications. In: Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003. 260−272.

[38] Sadagopan N, Krishnamachari B, Helmy A. The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks. In: Erdal C, ed. Proc. of the 1st Int'l Workshop on Sensor Network Protocol and Applications. Alaska: IEEE Press, 2003. 1005−1010.

[39] Madden S, Franklin M, Hellerstein J, Hong W. TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks. ACM Trans. on Database Systems, 2005,30(1):122−173.

[40] ZigBee specification version 2004, ZigBee document 053474r06, 2004.

[41] Fang M, Wan J, Xu X. A preemptive distributed address assignment mechanism for wireless sensor networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian: IEEE Press, 2008. 1−5.

[42] Pan MS, Fang HW, Liu YC, Tseng YC. Address assignment and routing schemes for ZigBee-based long-thin wireless sensor networks. In: Kin ML, ed. Proc. of the Vehicular Technology Conf. Singapore: IEEE Press, 2008. 173−177.

[43] Wong YC, Wang JT, Chang NH, Liu HH, Tseng CC. Hybrid address configuration for tree-based wireless sensor networks. IEEE Communications Letters, 2008,12(6):414−416.

[44] Tu K, Bi K. Mac address assignment in wireless sensor networks: A mixed strategy game approach. In: Proc. of the Int'l Conf. on Systems and Networks Communications (ICSNC). Tahiti: IEEE Press, 2006. 41−45.

[45] Liu Y, Ni LM. Location-Aware ID assignment in wireless sensor networks. In: Charles EP, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS). Vancouver: IEEE Press, 2006. 525−529.

附中文参考文献:

[2] 任丰原,黄海宁,林闯.容错系统的描述和验证.软件学报,2003,14(1):28−35.http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/28.htm

[4] 侯惠峰,刘湘雯,于宏毅,胡捍英.对无线传感器网络寻址方式的研究.电信科学,2007,(2):67−77.

[6] 蹇强,龚正虎,朱培栋,桂春梅.无线传感器网络 MAC 协议研究进展.软件学报,2008,19(2):389−403. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/389.htm

杜治高(1981－),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络.

刘轶(1968－),男,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络,嵌入式系统,体系结构.

钱德沛(1952－),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为体系结构,网格计算,计算机网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn