

Mesh 网络中两跳邻居地址借用策略

孙 聪¹ 朱艺华¹ 池凯凯¹ 袁利永²

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)¹

(浙江师范大学数理与信息工程学院 金华 321004)²

摘 要 IEEE 802.15.5 标准提供了 mesh 联网功能,它为节点绑定逻辑地址,因而具有不需要路由表进行路由的优点。在一个动态性很强的 mesh 网络中,节点加入或离开网络会造成孤儿节点问题,即新来节点因其父节点无剩余地址可分配导致其无法加入网络。提出了适用于 mesh 网络的两跳邻居节点地址借用策略以克服孤儿节点问题,提高节点加入成功率和地址利用率。理论分析和仿真表明,所提出的地址借用策略在节点加入成功率、地址利用率和能耗方面均优于已有地址分配方案。

关键词 无线传感器网络, mesh 网络, 孤儿节点, IEEE 802.15.5 标准, 地址借用

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.3.022

Borrowing Address within Two-hop Neighbors in Mesh Network

SUN Cong¹ ZHU Yi-hua¹ CHI Kai-kai¹ YUAN Li-yong²

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)²

Abstract IEEE 802.15.5 standard introduces mesh networking, which has the strength that routing is conducted without routing table by assigning logical addresses to nodes. In a dynamic mesh network, orphan node problem (ONP) exists, i. e., a newly coming node is unable to join the network as its parent node does not have an unused address for the new node. To overcome the ONP, an address borrowing scheme that allows a node to borrow an address from its two-hop neighbors, which is suitable for the mesh network, was presented in this paper so that the probability of successful joining (PSJ) the network and the ratio of the number of the used addresses to the total addresses are improved while the energy expended by borrowing address is reduced. Theoretical analysis and simulation results show the proposed scheme outperforms the existing address assigning schemes in terms of the PSJ, the ratio, and the energy consumption.

Keywords WSN, Mesh network, Orphan node, IEEE 802.15.5 standard, Borrowing address

1 前言

由具有低功耗、弱计算能力、短通信距离、低存储能力的节点构成的无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 已经得到广泛应用^[1-3]。当代 WSN 的 MAC 和物理层大多采用 IEEE 802.15.4 标准^[4], 如 ZigBee 协议。在 WSN 中, 节点间采用低功耗通信, 通信链路的可靠性低, 使得通信链路的丢包率较高。我们欣喜地注意到, IEEE 802.15.5 标准^[5]提供了 WSN 节点的 mesh 联网能力。在 mesh 网络中, 节点之间的通信链路往往不止一条^[6], 使得在一条路径失效时可以选择其他路径传输数据包, 因此能够在一定程度上提高传输数据包的可靠性。IEEE 802.15.5 标准为无线个域网网络设备提供了支持互操作的、稳定的、可扩展的无线 mesh 网络拓扑^[7], 支持建立在 IEEE 802.15.4 标准之上的低速率

mesh 组网和建立在 IEEE 802.15.3 标准之上的高速率 mesh 组网。本文仅对低速率 mesh 网络^[8,9]进行研究。

IEEE 802.15.4 标准支持多达 65535 个节点的无线传感器节点, IEEE 802.15.5 标准为节点提供了地址分配策略以支持无线传感器节点频繁地加入和离开网络。但是, 该地址分配策略存在着导致“孤儿节点”(Orphan Node)^[10]问题的缺陷。所谓“孤儿节点”问题, 是指新来的节点因其父节点预留地址数不足而导致其无法加入到网络的现象。因此, 为 mesh 网络设计一个有效合理的地址借用策略来缓解孤儿节点问题变得十分重要, 这是本文的研究动机所在。

本文的主要贡献和创新之处在于: 1) 提出适用于 mesh 网络的允许两跳邻居之间借用地址的地址借用策略(以下简称“本文策略”)以缓解孤儿节点问题; 2) 提出了基于“本文策略”的路由算法; 3) 分析了“本文策略”中节点加入网络的成功

到稿日期: 2015-01-12 返修日期: 2015-04-20 本文受国家自然科学基金重点项目(61432015), 国家自然科学基金面上项目(61379124, 61472367)资助。

孙 聪(1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为无线网络, E-mail: smartbrandnew@163.com; 朱艺华(1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无线网络、物联网、网络编码, E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn; 池凯凯(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线网络、纳米网络、网络编码; 袁利永(1983—), 男, 博士生, 副教授, 主要研究方向为无线网络和移动自组织网络。

率、网络地址利用率和地址借用过程的能耗,通过与 IEEE 802.15.5 标准的地址分配策略和基于 ZigBee 簇树结构网络的地址借用策略进行比较获悉,本文策略优于两者。

2 相关工作

IEEE 802.15.5 标准根据节点加入到网络的先后次序产生一棵树, mesh 网络节点地址分配由自底向上的“地址需求汇报过程”和自上而下的“块地址分配过程”组成^[5]。前者始于树叶节点,各节点逐级向其对应的父节点发送汇报帧,其中包含子孙节点个数和需要预留的地址数。根节点在收到所有子节点汇报帧之后,根据网络中各节点的地址需求分配地址,根节点为每一个分支分配一段连续的地址空间,其中每个地址是 16 位短逻辑地址。

为清楚起见,下面以图 1 为例说明 IEEE 802.15.5 mesh 网络地址分配过程。地址汇报过程始于叶子节点 C、F、E 和 H,它们向各自的父节点汇报需要的地址个数分别为 [3]、[2]、[1]和[1]。此处,方括号用于表示地址需求数。树枝节点在收到子节点汇报上来的地址需求之后,加上自己的地址需求,继续向各自的父节点汇报。例如,树枝节点 D,向其父节点 B 汇报地址需求 [5](子节点 F 需要 2 个地址,加上自身需要 3 个地址,共 5 个);树枝节点 B 向其父节点 A(即根节点)汇报地址需求数 [11](子节点 C、D、E 各需要 3、5、1 个地址,自身需要 2 个,共 11 个)。其余节点的地址需求汇报与此类似。这一过程一直持续到根节点收到所有分支的汇报帧而告终。在所有地址汇报帧到达根节点 A 之后,根节点 A 按需分配地址,逐级向下分配地址块,根节点 A 分给自己地址 1,然后分别给节点 B 和 G 分配地址块(4-14)和(2-3)。此处,圆括号用于表示地址块,例如,(4-14)表示地址块自地址 4 开始至地址 14 结束。接着,节点 B 给自己留下地址 4 和 5 之后,分别给节点 C、D、E 分配地址块(6-8)、(9-13)和地址 14。到所有叶子节点分得地址时,地址分配过程结束。

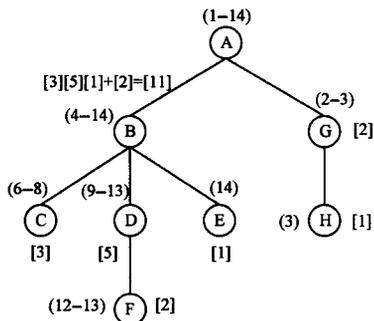


图 1 形成 mesh 树和地址分配

针对上述地址分配方案在地址分配通信开销和时间方面存在冗余的问题,文献[11]提出一种低时延的地址分配算法以减少通信开销和组网时延。事实上,上述地址分配还是会导致孤儿节点问题。例如,节点 G 分得地址块(2-3),其中地址 2 自己用,剩余可分配给新来节点的只有地址 3。此时,倘若新来两个节点选择节点 G 作为父节点加入网络,则只有一个节点可以获得地址 3,另一个节点成为孤儿节点。

ZigBee 和 IEEE 802.15.5 地址分配策略均会产生孤儿节点。为了解决在簇树(Cluster Tree)结构网络^[12]中形成的

孤儿节点问题,文献[13]提出了一个动态地址重分配策略(Adaptive Dynamic Address Redistribution, ADAR),即当节点没有多余地址分配给新加入网络的节点时,整个网络根据需求重新进行一次地址分配。因此,当网络的动态性很强,大量的节点需要加入和离开时,ADAR 策略带来的时延和能耗相当大。文献[14-18]提出地址借用策略,其允许节点向网络中存在剩余地址的节点借用地址。在文献[14]提出的地址借用策略中,网络协调节点 ZC(ZigBee Coordinator)维护一张全局可用地址信息表用于保存网络中节点的可用地址信息,一个节点在因地址空间不足无法给新加入节点分配地址时,就给 ZC 节点发送借用地址请求,然后 ZC 在有富余地址的节点中寻找一个离请求地址节点最近的节点并向其发送命令帧以借用地址。在文献[15]提出的地址借用策略中,当节点地址不足时,节点可以根据网络深度、地址偏移量等参数进行计算,得出一个节点,向其发送借用请求以借用地址。在文献[16]的地址借用策略中,当地址不足时,节点向自己的所有邻居节点广播借用请求,邻居节点在收到请求后,若地址足够,则回复地址借用响应,使得请求地址节点可以选择一个合适的邻居借用地址。由于广播借用地址请求开销比较大,文献[17,18]对其进行改进:前者将借用地址的范围扩大到自己的兄弟节点,后者将地址借用的范围扩展为两跳邻居,同时支持一个连续地址块的借用。

本文也是基于节点的两跳邻居借用地址,与之前方案不同的是,本文在 IEEE 802.15.5 标准的 Hello 帧中添加一个域,以此减小地址借用过程的开销。相比于 ZigBee 地址借用策略,本文提出的策略在节点加入网络成功概率、地址利用率、地址借用过程的能耗等方面优于之前的地址借用策略。

3 两跳邻居地址借用策略

在基于 IEEE 802.15.5 协议的 mesh 网络中,每个节点及其邻居节点周期性地交换 Hello 帧,且维护着一张邻居表,表中记录了每个邻居的相关信息,也保存了一张连接矩阵用于记录节点之间的通路。本文提出的两跳邻居地址借用策略,在 Hello 帧中添加一个称为剩余可用地址个数(Number of Remaining Addresses, NRA)的字段,使得节点可以通过 Hello 帧获得邻居节点的剩余可用地址,从而可以直接从邻居表中获取有剩余地址的邻居并向之借用地址,无须采用广播形式借用地址,从而降低了借用地址时的开销。

3.1 改进的 Hello 帧结构

当一个 mesh 网络构成之后,节点向其邻居节点周期性地发送 Hello 帧以交换信息。在本文策略中,Hello 帧的格式如图 2 所示,其中,NRA 域长度为 1 个字节,用于保存节点的剩余可用地址个数,其余域均与 IEEE 802.15.5 标准相同。其含义如下^[5]:“TTL”代表 Hello 帧最多可传输的跳数;“Beginning Address”和“Ending Address”分别代表当前节点地址块的开始和结束地址;“Tree Level”表示当前节点在树中所处的层次;“Hello Control”表示当前 Hello 帧的类型;“Addresses of One-hop Neighbors”表示当前节点所有一跳邻居的逻辑地址,其长度可变;“Number of One-hop Neighbors”表示当前节点一跳邻居的个数;“Addresses of Multicast Groups”表

示当前节点多播组的地址,其长度可变;“Number of Multi-cast Groups”表示多播组地址的个数。

Octets: 1	1	2	2	2	1
Command Frame Identifier	TTL	Beginning Address	Ending Address	Tree Level	Hello Control
Octets: 1	1	1	Variable		Variable
Number of One-hop Neighbors	Number of Multicast Groups	NRA (Number of Remaining Addresses)	Addresses of One-hop Neighbors	Addresses of Multicast Groups	

图2 Hello 帧格式

3.2 地址借用过程的主要步骤

在新节点 J 要加入 mesh 网络时,它的协议栈 mesh 子层扫描信道以寻找其加入网络的父节点。在选择了父节点之后,如果父节点没有剩余地址可以分配给新节点,则启用本文地址借用策略,其主要步骤如下:

第1步 节点 J 协议栈 mesh 子层扫描信道,得到一个可以作为其父节点加入网络的邻居节点集 N_J 。

第2步 如果 N_J 内的所有节点均无剩余地址(此时节点 J 成为孤儿节点),则在 N_J 中选择一个节点 P 作为代理节点,并向节点 P 发送加入请求帧 JReq (Join Request)。

第3步 节点 P 在收到节点 J 的 JReq 之后,在 P 的邻居节点集中选择一个剩余可用地址数最大的节点作为地址借出节点 C ,向节点 C 发送地址借用请求帧 BAREq (Borrowing Address Request)。

第4步 节点 C 收到 BAREq 之后,选择一个未被使用的地址,给代理节点 P 回复发送一个响应帧 BAREp (Borrowing Address Reply),响应帧中包含出借的地址。

第5步 节点 P 收到 BAREp 后,向节点 C 发送借用地址确认帧 BAC (Borrowing Address Confirmation),并且向存储在本地的地址借入表 AddrIn 添加一条包含借入的地址和节点 C 的地址的记录。节点 C 收到 BAC 之后,向存储在本地的地址借出表 AddrOut 中添加一条包含借出的地址和节点 P 的地址的记录。其中,涉及到地址借用的两个表的结构为:AddrIn(Addr_Borrowed, C_Addr) (前一字段存储借来的地址,后一字段存储出借地址的节点 C 的地址)和 AddrOut(Addr_lent, P_Addr) (前一字段存储借出的地址,后一字段存储代理节点 P 的地址)。

第6步 节点 P 回复加入确认帧 JC (Join Confirm) 给节点 J ,并且将借来的地址分配给节点 J 。

第7步 结束。

下面以图3为例说明本文地址借用策略的过程。设 J 是新加入网络节点。节点 J 扫描无线信道,发现可以从节点 D 加入网络(见图3(a)); J 选择节点 D 作为其代理节点并向其发出加入请求 JReq(见图3(b))。节点 D 在无剩余地址的情况下,向其邻居节点借地址。假如节点 B 是邻居表中剩余地址最多的邻居,则节点 D 向 B 发送地址借用请求 BAREq(见图3(c))。节点 B 向 D 回复一个地址借用响应 BAREp(见图3(d))。节点 D 在收到 B 的响应后,向 B 回复一个确认帧 BAC(见图3(e)),并且向存储在本地的地址借入表 AddrIn(Addr_Borrowed, C_Addr) 中添加记录 $(a, a1)$,其中, a 和 $a1$ 分别表示借来的地址和节点 B 的地址。节点 B 收到 BAC 帧之后,向存储在本地的地址借出表 AddrOut(Addr_lent, P_Addr) 中添加记录 $(a, a2)$,其中 $a2$ 表示代理节点 D 的地址。最后,节点 D 向节点 J 回复加入确认 JC,并且把从 B 借来的地址 a 分配给新加入节点 J (见图3(f))。至此,地址借用过程结束。

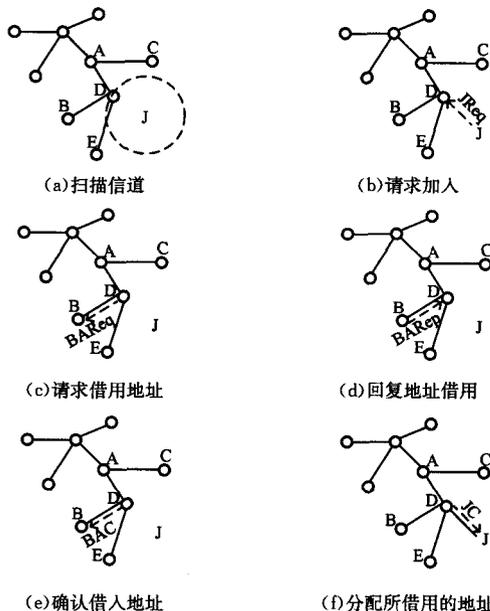


图3 地址借用过程实例

3.3 本文地址借用策略的帧结构

加入请求帧 JReq 和加入确认帧 JC 均采用 IEEE 802.15.5 标准^[5],借用确认帧 BAC 采用 MAC 层 ACK 帧的格式。

地址借用请求帧 BAREq 包含 4 个域:“Frame Control”(2 字节),“Destination Address”(2 字节),“Source Address”(2 字节)和“Command Frame Identifier”(1 字节),均取自 802.15.5 标准^[6],其中,“Command Frame Identifier”域设定为 0x18 (802.15.5 标准 0x18-0xff 是保留字段),用以表示帧的类型。

地址借用请求帧 BAREp 包含 5 个域:“Frame Control”(2 字节),“Address field”,“Destination Address”(2 字节),“Source Address”(2 字节)和“Lent Address”(2 字节)。其中,前 4 个域均取自 802.15.5 标准^[6],其中“Command Frame Identifier”域设定为标准中保留的值 0x19,用以区分帧的类型。

3.4 路由方案

如上一节所述,本文策略在地址借用过程中引入了两个表:AddrIn 和 AddrOut,使得在本文地址借用之下,依然可以不需要路由表进行路由。

设发送数据包的源节点为 S ,目的节点为 D ,当前收到数据包的节点为 Z (下称“当前节点”)。为把数据包路由到目的节点 D ,在本文地址借用策略下,当前节点 Z 可以按下述步骤处理数据包:

第1步 若节点 Z 和 D 的地址匹配(即 Z 是目的节点),转到第8步。

第2步 节点 Z 查 AddrIn 表,若 AddrIn.C_Addr 域与节点 D 的地址匹配(这意味着 Z 是节点 D 的一跳邻居节点),则 Z 将数据包直接转发给 D ,转到第8步。

第3步 节点 Z 检查其 AddrOut 表,若 AddrOut, Addr_lent 域与 D 的地址匹配(这意味着 Z 通过代理节点 AddrOut, P_Addr 借地址给 D),则 Z 把数据包发送到 AddrOut, P_Addr 域所记录的代理节点,并由之转发给 D ,转到第8步。

第4步 若 D 的地址在 Z 所拥有的地址块内,则 Z 按照 IEEE 802.15.5 标准所提供的方法计算 D 所在的地址块,并将数据包转发到相应地址块的子节点,转到第8步。

第5步 若 D 是 Z 的一跳邻居,则 Z 将数据包直接发给 D ,转到第8步。

第6步 若 D 是 Z 的两跳邻居,则 Z 根据邻居表或者连接矩阵,将数据包发送给相应的邻居节点,转到第8步。

第7步 节点 Z 将数据包转发给父节点。

第8步 结束。

4 性能分析

本节分别基于节点加入成功概率、网络地址利用率、地址借用过程产生的能耗3个指标,将本文策略与 IEEE 802.15.5 的地址分配策略(下称“传统策略”)以及文献[16]提出的 ZigBee 地址借用策略(简称“ZigBee 策略”)进行对比。

4.1 节点加入网络成功概率

分别以 P_{basic} , P_{ZigBee} 和 P_{our} 表示传统策略、ZigBee 策略和本文策略中节点加入 mesh 网络的成功概率。对于节点 i ,用 N_i 表示其一跳邻居集合, M_i 表示其父节点和子节点的集合, A_i 表示其剩余地址数。显然, $M_i \subseteq N_i$ 。设 J 是欲加入网络的节点。

在传统策略中,节点 J 可以向其任意一个一跳邻居节点发起加入请求,当且仅当节点 J 的所有一跳邻居节点地址都用尽时,节点 J 加入网络失败,由此可得:

$$P_{basic} = 1 - \prod_{i \in N_j} \Pr\{A_i = 0\} \quad (1)$$

在 ZigBee 地址借用策略中,节点 J 也可以向其一跳范围内邻居发起加入请求。在一跳邻居地址用尽时,各邻居可向其父节点和子节点借用地址。因此,当且仅当节点 J 的一跳邻居以及邻居的父节点和子节点地址都用尽时,加入网络失败。因此:

$$P_{ZigBee} = 1 - \prod_{i \in N_j} \Pr\{A_i = 0\} \left(\prod_{j \in M_i} \Pr\{A_j = 0\} \right) \geq P_{basic} \quad (2)$$

在本文策略中,节点 J 可以向其二跳范围内邻居借地址。因此,当且仅当节点 J 的一跳邻居和两跳邻居地址都用尽时,加入网络失败。于是:

$$P_{our} = 1 - \prod_{i \in N_j} \Pr\{A_i = 0\} \left(\prod_{j \in N_i} \Pr\{A_j = 0\} \right) \quad (3)$$

由于 $M_i \subseteq N_i$,因此 $\prod_{j \in N_i} \Pr\{A_j = 0\} \leq \prod_{j \in M_i} \Pr\{A_j = 0\}$ 。这样,利用式(2)和式(3),得到:

$$P_{our} \geq P_{ZigBee} \geq P_{basic} \quad (4)$$

也就是说,本文策略在节点加入成功概率上优于 ZigBee 借用策略和传统策略。

4.2 地址利用率

定义 mesh 网络的地址利用率为加入到网络的节点数与网络中可用地址数的比率,分别以 R_{basic} , R_{ZigBee} 和 R_{our} 表示传统策略、ZigBee 地址借用策略和本文策略的地址利用率。设网络中可用地址数为 L ,并且有 K 个节点希望加入网络。

在传统策略下,由式(1)可知,节点 k 加入网络的成功概率为:

$$P_k = 1 - \prod_{i \in N_k} \Pr\{A_i = 0\} \quad (5)$$

如果节点 k 加入成功,则网络中增加了1个节点,否则,

网络节点个数不变,即增加0个节点。因此,对于节点 k 来说,加入到网络个数的平均值(数学期望)为 $1P_k + 0(1-P_k) = P_k$ 。所以,在传统策略下, K 个节点加入成功的平均个数为:

$$K_{basic} = \sum_{k=1}^K p_k = \sum_{k=1}^K (1 - \prod_{i \in N_k} \Pr\{A_i = 0\}) \quad (6)$$

于是,传统策略的地址利用率为:

$$R_{basic} = K_{basic} / L = \left(\sum_{k=1}^K (1 - \prod_{i \in N_k} \Pr\{A_i = 0\}) \right) / L \quad (7)$$

同理,利用式(2),ZigBee 策略中, K 个节点成功加入到网络的节点平均个数为:

$$K_{ZigBee} = \sum_{k=1}^K (1 - \prod_{i \in N_k} (\Pr\{A_i = 0\} \prod_{j \in M_i} \Pr\{A_j = 0\})) \quad (8)$$

于是,ZigBee 借用策略的地址利用率为:

$$R_{ZigBee} = K_{ZigBee} / L = \sum_{k=1}^K (1 - \prod_{i \in N_k} (\Pr\{A_i = 0\} \prod_{j \in M_i} \Pr\{A_j = 0\})) / L \quad (9)$$

利用式(3)可得,本文策略的地址利用率为:

$$R_{our} = \sum_{k=1}^K (1 - \prod_{i \in N_k} [\Pr\{A_i = 0\} \prod_{j \in N_i} \Pr\{A_j = 0\}]) / L \quad (10)$$

与证明式(4)类似,可以证明:

$$R_{our} \geq R_{ZigBee} \geq R_{basic} \quad (11)$$

此式表明,本文策略的网络地址利用率优于 ZigBee 策略和传统策略。

4.3 地址借用产生的能耗

考虑到在 IEEE 802.15.5 标准中没有地址借用策略,以下仅对本文策略和 ZigBee 策略进行比较。在地址借用成功的条件下,分别以 E_{ZigBee} 和 E_{our} 表示 ZigBee 地址借用策略和本文策略地址借用过程中产生的能耗。

采用文献[19]的能耗模型。用 A 表示发送节点计算、处理、调制每比特的平均功率,用 B 表示接收方接收每比特的平均功率, ϵ 表示发送数据包的功率。这样,发送 x 比特数据消耗的能量 $E_{TX}(x)$ 和接收 x 比特数据消耗的能量 $E_{RX}(x)$ 可以表示为^[19]:

$$E_{TX}(x) = (A + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{x}{R} \quad (12)$$

$$E_{RX}(x) = B \frac{x}{R} \quad (13)$$

其中, $0 < \beta < 1$ 是放大器的效率, R 是物理层的比特速率。这样,收发一个长度为 x 的数据包产生的总能耗为:

$$E(x) = E_{tx}(x) + E_{rx}(x) = (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{x}{R} \quad (14)$$

设加入请求帧 JReq 长度为 l_{JReq} (比特),地址借用请求帧 BAReq 长度为 l_{BAReq} (比特),地址借用响应帧 BARep 长度为 l_{BARep} (比特),地址借用确认帧 BAC 长度为 l_{BAC} (比特),加入响应帧 JC 长度为 l_{JC} (比特)。对于节点 i ,假设在集合 M_i 中有 b_i 个邻居节点剩余地址个数大于零。

ZigBee 地址借用策略有以下6个步骤^[16]:

第1步 加入节点 J 扫描信道,产生能耗 E_1 。

第2步 节点 J 选择代理节点 P ,并发送加入请求 JReq,产生能耗 $E_2 = (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{JReq}}{R}$ 。

第3步 节点 P 地址不够,向自己的邻居广播地址借用请求 BAReq。节点 P 的 $|M_P|$ 个邻居都需要接收这个请求,由式(12)和式(13)知,广播及接收产生的总能耗 $E_3 = (A + |M_P| B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BAReq}}{R}$ 。

第4步 邻居收到 BAReq 后,若地址足够则回复借用响应 BARep,若地址不够则忽略这个请求。 b_p 个地址足够的节点需要回复响应。因此,产生能耗 $E_i = b_p (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BARep}}{R}$ 。

第5步 节点 P 选择一个邻居作为地址借出节点,向其回复借用确认 BAC,产生的能耗 $E_5 = (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BAC}}{R}$ 。

第6步 节点 P 向节点 J 回复加入确认 JC,并分配地址,产生的能耗 $E_6 = (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{JC}}{R}$ 。

综上所述,ZigBee 策略借用地址过程所产生的总能耗是:

$$E_{ZigBee} = \sum_{i=1}^6 E_i = E_1 + (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{JReq} + l_{BAC} + l_{JC}}{R} + (A + |M_P| B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BAReq}}{R} + b_p (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BARep}}{R} \quad (15)$$

本文策略中地址借用过程同样有6个步骤,除第3步和第4步外,其余步骤与 ZigBee 策略相同。本文策略第3步和第4步产生的能耗分别为 $\frac{\beta(A+B)+\epsilon}{\beta R} l_{BAReq}$ 和 $\frac{\beta(A+B)+\epsilon}{\beta R} l_{BARep}$ 。因此本文策略地址借用过程产生的总能耗:

$$E_{our} = E_1 + (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{JReq} + l_{BAReq} + l_{BARep} + l_{BAC} + l_{JC}}{R} \quad (16)$$

因此,由式(15)和式(16)可得本文策略与 ZigBee 策略的能耗之差为:

$$E_{our} - E_{ZigBee} = (1 - |M_P|) B \frac{l_{BAReq}}{R} + (1 - b_p) (A + B + \frac{\epsilon}{\beta}) \frac{l_{BARep}}{R} \quad (17)$$

由于在地址借用成功的条件下,代理节点 P 至少有一个邻居有剩余地址可借用,因此, $|M_P| \geq 1$ 且 $b_p \geq 1$ 。这样,由式(17)可以得到:

$$E_{our} \leq E_{ZigBee} \quad (18)$$

一般来说,在规模比较大的网络中,节点 P 的邻居节点个数大于1,即 $|M_P| > 1$ 。也就是说,式(18)的左边小于其右边,因此,本文提出的地址借用策略的能耗低于 ZigBee 策略产生的能耗。

5 仿真结果分析

本节基于节点加入成功概率、地址利用率、能耗这3个指标,采用仿真方法对本文策略、传统策略和 ZigBee 策略进行对比分析。仿真中,在一个 $1000m \times 1000m$ 的范围内随机部署 1000 个节点,节点间通信距离为 45m。根节点位于网络的中心位置,按照 IEEE 802.15.5^[5] 协议的方法组成 mesh 网络,并且网络中的每个节点得到的地址块长度相同。

仿真采用的主要参数^[5,19]值如表1所列。下述仿真结果是 500 次仿真运算的平均值。

表1 仿真参数及其值

参数名	值	参数名	值
实验区域	1000m * 1000m	l _{JC}	11B
节点数	1000	A	6mW
l _{JReq}	11B	B	20mW
l _{BAReq}	7B	R	250kpbs
l _{BARep}	9B	β	0.9
l _{BAC}	5B	ϵ	30mW

在 mesh 网络构成之后,随机产生一批节点加入网络,就通信距离的变化和网络地址总数的变化来对3个策略进行对比。给定网络可用地址总数为 5000,因此,在 mesh 网络构成后,1000 个节点中每个节点除自己使用一个地址外,平均有 4 个未使用地址。此外,让节点的无线电通信距离分别取 30m, 33m, 36m, ..., 60m。节点加入成功概率仿真结果如图4所示,图中“basic”表示传统策略。从这个图可以看出:1)本文策略的节点加入网络成功率比其它两者都要高(这与上节理论分析的结果一致);2)随着通信距离的增加,节点加入成功概率逐渐增大,这是因为随着通信距离的增加,节点的邻居数增多,使得新节点成为孤儿的概率降低,加入成功的概率增大。

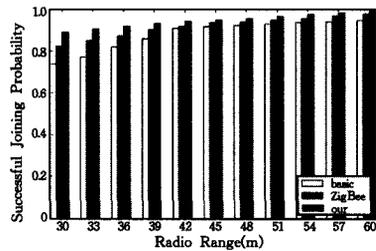


图4 节点无线电通信距离对加入成功概率的影响

取节点的无线电通信距离为 45m,让网络地址总数取 3000, 3500, 4000, ..., 6000,节点加入成功概率的仿真结果如图5所示。从图5依然可见:本文策略的节点加入网络成功率比其它两者都要高;而且,随着网络地址总数的增加,节点加入成功概率逐渐增大。这是因为网络地址总数增加就会导致网络中可用地址数增加,从而会降低新节点成为孤儿的概率,增大其加入成功的概率。

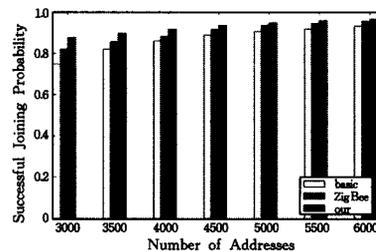


图5 网络地址总数对加入成功概率的影响

设网络已有节点个数为 1000,节点间的通信距离为 45m,地址总数为 5000。让新加入节点个数分别取 2000, 2200, ..., 4000,得到的网络地址利用率随着加入节点数变化的趋势如图6所示。由此图可见,本文策略的地址利用率高于其它两个方案(这与上节的理论分析一致);而且,随着加入节点个数的增多,网络地址利用率呈现逐渐提高的趋势。

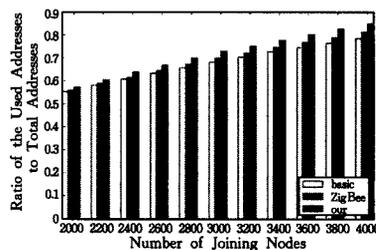


图6 加入节点数对地址利用率的影响

本文策略和 ZigBee 策略的能耗对比仿真结果如图7所示。该图反映参数 $|M_P|$ 和 b_p 对能耗的影响。从图中可见:本文策略的能耗低于 ZigBee 策略,这与上节理论分析结果是一致的。

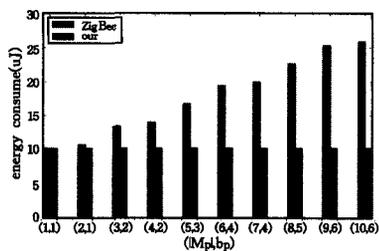


图7 M_P 和 b_P 对能耗的影响

结束语 本文设计了一个基于两跳邻居的地址借用策略,允许节点在缺少可用地址的情况下向其两跳范围内的邻居节点借用地址以缓解孤立节点问题。本文策略通过给 IEEE 802. 15. 5 mesh 网络的 Hello 帧增加一个“剩余未使用地址数”字段,让代理节点直接向剩余地址最多的邻居节点借地址,无须广播一个地址借用请求,以此减小地址借用过程的开销。理论分析和仿真结果均表明,本文策略能够提高节点加入网络成功概率和网络地址利用率,且能够降低地址借用过程的能耗。

参考文献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2012, 38(4): 393-422

[2] Rodenas-Herraiz D, Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, et al. Current trends in wireless mesh sensor networks: a review of competing approaches [J]. *Sensors*, 2013, 13(5): 5958-5995

[3] Liu Y H, He Y, Li M, et al. Does wireless sensor network scale? A measurement study on GreenOrbs [J]. *IEEE Transactions on Parallel And Distributed Systems*, 2013, 24(10): 1983-1993

[4] ZigBee Alliance (ZigBee Document 02130r7) Draft Version 0. 90, Network Specification[S]. 2004

[5] Part 15. 5; mesh topology capability in wireless personal area networks (WPANs); IEEE Std. 802. 15. 5-2009[S]. 2009

[6] Garcia-Sanchez A J, Garcia-Sanchez F, Rodenas-Herraiz D, et al. On the synchronization of IEEE 802. 15. 5 wireless mesh sensor networks; shortcomings and improvements [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(198): 1-23

[7] Zhang R, Park T, Lee M J, et al. Testbed experimentation of a meshed tree routing with local link state for wireless PAN mesh [C]//IEEE International Conference on Communications, 2008; 3060-3065

[8] Lee M J, Zhang R, Zheng J, et al. IEEE 802. 15. 5 WPAN mesh standard-low rate part; meshing the wireless sensor networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 973-983

[9] Lee M J, Zhang R, Zhu C, et al. Meshing wireless personal area networks; introducing IEEE 802. 15. 5 [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(1): 54-61

[10] Pan M S, Tsai C H, Tseng Y C. The orphan problem in ZigBee wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(11): 1573-1584

[11] Ren Z, Suo J W, Liu Y, et al. High efficient and low delay address assignment algorithm for LR-WPAN Mesh [J]. *Computer Application*, 2014, 34(1): 1-3

[12] Giri D, Roy U K. Single level address reorganization in wireless personal area network [C]// International Conference on Computers and Devices for Communication, 2009: 1-4

[13] Li Y R, Shi H B. Address assignment and routing protocol for large-scale uneven wireless sensor networks [C]// International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, 2009: 1-4

[14] Giri D, Roy U K. Address borrowing in wireless personal area network [C]// IEEE International Advance Computing Conference, 2009: 181-186

[15] Fang M Q, Wang J, Xu X H. A preemptive distributed address assignment mechanism for wireless sensor networks [C]// Proceedings of The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobil Computing, 2009: 1-5

[16] Park S, Lee E J, Ryu J H. Distributed borrowing addressing scheme for ZigBee/IEEE 802. 15. 4 wireless sensor networks [J]. *ETRI Journal*, 2009, 31(5): 525-533

[17] Yao Y, Li P, Ren Z, et al. A borrowed address assignment algorithm based on inheritance relation for ZigBee networks [C]// IEEE International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), 2011: 454-457

[18] Hu S C, Lin C K, Tseng Y C, et al. Distributed Address Assignment with Address Borrowing for ZigBee Networks [C]// IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2014: 454-459

[19] Vazifehdan J, Venkatesha R, Niemegeers I. Energy-efficient reliable routing considering residual energy in wireless ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(2): 434-447

(上接第 92 页)

[3] Jia J, Zhang Q, Shen X. HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management [J]. *IEEE J. Selected Areas in Comm.*, 2008, 26(1): 106-117

[4] Kim H, Shin K G. Fast Discovery of Spectrum Opportunities in Cognitive Radio Networks [C]// Proc. IEEE Int'l Symp. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'08), 2008

[5] Guo C, Peng T, Qi Y, et al. Adaptive channel searching scheme for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]// Proceedings of the 2009 IEEE Wireless Communications & Networking Conference, Budapest, Hungary, 2009: 1337-1342

[6] Jiang H, Lai L, Fan R, et al. Optimal selection of channel sensing

order in cognitive radio [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 297-307

[7] Fan R, Jiang H. Channel sensing-order setting in cognitive radio networks; a two-user case [J]. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2009, 58(9): 4997-5008

[8] Lai L, Gamal H E, Jiang H, et al. Cognitive Medium Access; Exploration, Exploitation and Competition [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 10(2): 239-253

[9] Cheng H T, Zhuang W. Simple Channel Sensing Order in Cognitive Radio Networks [OL]. <http://engine.lib.uwaterloo.ca/ojs2.2/index.php/pptvt/article/view/541>