

基于代理节点的 ZigBee 网络孤立点解决算法^①

贾军营, 王少华, 王月鹏

(中国科学院大学, 北京 100049)

(中国科学院 沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168)

摘要: ZigBee 协议默认的分布式地址分配算法(DAAM)存在孤立点问题, 而没有提出好的解决方案. 提出一种基于代理节点的 ZigBee 地址分配算法 ABAAM, 可以有效的降低因为网络预设参数和节点位置导致的孤立点问题. 当节点无法加入网络时, 选取邻居表中一个路由节点作为代理节点以加入网络; 同时改进现有的树路由协议, 使之能够兼容当前的分配算法. 理论和仿真分析表明, 本文提出的算法的地址分配成功率等性能要优于默认的 DAAM 算法.

关键词: ZigBee; 无线传感器网络; 地址分配; 孤立点; 代理

Agent-Based Orphan Problem Solving Algorithm in ZigBee Networks

JIA Jun-Ying, WANG Shao-Hua, WANG Yue-Peng

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: The default distributed address assignment mechanism (DAAM) of ZigBee protocol exits orphan problem without a good solution. This paper presents a mechanism called agent based address assignment mechanism (ABAAM) which can effectively reduce the orphan problem caused by the network preset parameters and nodes position. When one node cannot join the network, it selects one route node in the neighbor table as an agent and joins the network; the tree routing protocol is also improved to be compatible with the current allocation algorithm. Theoretical analysis and simulation show that the proposed algorithm has a better performance in the success rate than the default DAAM algorithm.

Key words: ZigBee; wireless sensor networks; address assignment; orphan node; agent

1 引言

ZigBee 标准^[1]是一种面向近距离、低速率、低功耗、低成本的无线传感器网络标准. ZigBee 协议在物理层和链路层采用 IEEE 802.15.4 标准, 并在其上增加了网络层、安全模块和应用支持子层模块等, 从而实现了大区域组网.

现实中, ZigBee 网络节点是随机分布或存在运动的, 虽然 ZigBee 网络理论地址数量为 65535(2¹⁶-1), 但在实际中发现, 当节点请求加入网络时, 有时会因为网络条件限制拒绝对其分配地址, 从而无法加入网络, 这种节点称为网络孤立点^[2]. 为了提高 ZigBee 网络地址利用率, 减少孤立点, 本文提出一种基于代理

节点的地址分配策略, 当节点无法从邻近的路由节点获得地址时, 选择其中一个路由节点作为代理节点从而实现加入网络, 同时对原有的树路由做出改进, 使其适应新的算法.

2 ZigBee协议分析

2.1 ZigBee 网络组成

IEEE802.15.4 网络中的设备根据其通信能力, 分为两种设备类型: 全功能设备(Full-Device, FFD)和精简功能设备(Reduced-Device, RFD)^[2]. FFD 设备具有 IEEE802.15.4 定义的所有功能并能够扮演任何网络中的角色, 而 RFD 因为功能受限, 只能与 FFD 通信.

^① 收稿时间:2014-10-27;收到修改稿时间:2014-12-05

ZigBee 标准定义了三种设备类型: ZigBee 协调器, ZigBee 路由器和 ZigBee 终端设备. 协调器负责初始化、维护和控制网络; 路由器负责数据采集, 中继消息, 提供路由信息; 终端节点负责数据的采集. 每个网络必须只有一个协调器, 协调器和路由器必须是 FFD, 终端节点可以是 FFD 或 RFD.

ZigBee 标准支持星型、树形、网状型等网络拓扑结构^[5]. ZigBee 树形网络是最常用的拓扑类型, 在这种拓扑中协调器初始化网络, 路由器形成网络枝干并中继消息, 终端节点作为叶节点不参与消息路由.

2.2 ZigBee 地址分配

ZigBee 协议中有两种地址分配方式: 随机地址分配机制和分布式地址分配机制(Distributed Address Assignment Mechanism, DAAM), 后者作为默认的地址分配机制, 使用了预先设定的网络协调器和路由节点最大子节点数 C_m 、最大子路由节点数 R_m 和网络最大深度 L_m 这三个参数计算并分配节点地址. 计算方法如下所示:

$$A_n = \begin{cases} A_{parent} + Cskip(d) * (n-1) + 1, & T_n = T_{router} & (1) \\ A_{parent} + Cskip(d) * R_m + n, & T_n = T_{end} & (2) \end{cases}$$

其中, (1)适用于申请节点是路由器节点, (2)适用于申请节点是终端节点; A_n 表示 Node(n)的地址, d 表示父节点的网络深度, 即父节点到协调器的跳数, $d \leq L_m - 1$; n 表示本节点是第几个同类型申请节点; $Cskip(d)$ 表示深度为 d 的父路由节点所获得的地址偏移量, 计算公式如下:

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m * (L_m - d - 1), & R_m = 1 & (3) \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m * R_m^{(L_m - d - 1)}}{1 - R_m} & & (4) \end{cases}$$

如图 1 所示, 假设网络参数 $C_m=5, R_m=2, L_m=3$, 则可根据公式(1)、(2)、(3)、(4)分别计算出各个节点的 $Cskip(d)$ 及网络地址.

2.3 孤立点原因分析

ZigBee 默认的地址分配算法造成孤立点问题的产生是不可避免的^[10]. 形成孤立点的原因主要有三种情况:

- 1) 通信距离及障碍物的限制. 实际在建筑环境中, ZigBee 设备有效通信距离大概在十几到几十米之间, 如果有障碍物的阻挡会更容易无法连接到网络中.
- 2) 父节点达到最大 L_m . 申请加入的节点如果向

已达到网络最大深度 L_m 的路由节点发送申请, 将无法获得新地址. 如图 2 所示, 节点 8 已达到网络最大深度 $L_m=3$, 于是 A 节点再向其申请加入网络则失败, 此时 A 节点成为孤立节点.

- 3) 父节点子节点数已达到 C_m , 即父节点可分配的地址池已用尽. 如图 2 所示, 节点 1 的子节点个数已达到 $C_m=5$ 个, 无法再为多余的节点分配地址, 因此 B 节点成为孤立节点.

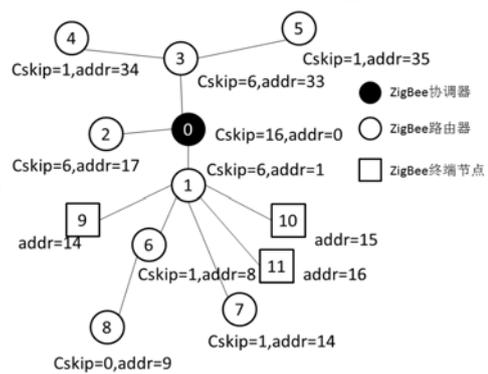


图 1 ZigBee 树形网络地址分配

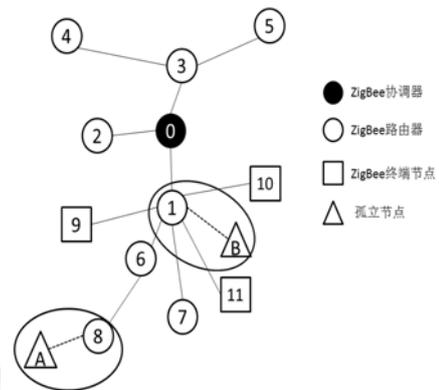


图 2 ZigBee 孤立点示意图

3 相关工作

针对孤立点问题目前已有一些研究. Pan Meng-Shiuan 等人证明了节点因预设参数限制而成为孤节点是不可避免的, 将孤立点问题分成了两个子问题: 连接尽可能多的路由节点(BDDTF)和连接尽可能多的终端节点(EDMM), 并提出集中式的迭代建树和修剪、分布式的先深度后广度搜索、分布式的孤节点主动探测路径等方法对孤节点问题加以改善^[10], 能够缓解孤节点问题. 任智等人提出基于分段的按需可扩展地址分配算法, 按照预设的地址量对 16bit 地址空间进行分段, 当路由节点子地址空间不足时对其逐段

扩展,使更多节点获得地址^[3].卿晓霞等人提出了当节点网络参数指标已用完的情况下,通过一种转移机制进行节点的转移,平衡网络各个节点的孩子数^[4],但没有考虑实际节点的物理位置对转移机制的限制.FANG M Q 等人提出了借地址的思路,子地址空间不足的路由节点向有剩余地址的路由节点进行借地址来为孤立点分配地址^[6,9],但这种方式存在额外通信开销和破坏树路由的问题.Yan-rui Li 等人介绍了一种通过地址重新分配方法来减少孤节点^[8],在重新分配过程中使用 DAAM 算法未用到的地址,但这种方法使控制开销增加且其扩展操作是一次性的.Giri 等针对宽度不足问题提出了一种通过增大深度参数减小地址偏移量,从而使路由节点的子节点地址空间增大的方案 SLAR(single level address reorganization)^[7];当深度为 d 的路由节点子地址不够时,启动地址重配置过程,使用 Cskip(d+1)取代 Cskip(d)作为地址偏移量分配地址给予节点.这种方法虽然能增大路由节点的子节点地址空间,但减小了网络深度,且地址重配置操作使控制开销和耗时增加.

4 基于代理节点的算法ABAAM

4.1 ZigBee 孤立点问题解决思路

基于代理节点地址分配算法主要解决 ZigBee 协议自身不足引起的孤立点问题,孤立点产生后:当所有可询问的路由节点地址空间用尽时,选取其中一个路由器节点作为父节点,通常是距离最近的节点即信号强度最强的节点,请求其成为代理节点并将其加入网络.

4.2 所需要的数据结构

为了能够实现代理机制,作为代理节点的父节点需要解决以下几个问题:1)代理节点如何与被代理节点如何实现关联;2)父节点如何维持代理的子节点的路由.

由于原 ZigBee 协议中没有相应的帧命令,我们需要对 ZigBee 原有的帧格式稍作修改以实现代理机制.表 1 所示是改造后的 ZigBee 协议网络层的帧格式,网络层帧首部增加一个字节的代理标识符字段,用于代理节点查找代理地址转换表进行地址替换.如表 3 所示,在帧类型子域中定义 10 为数据代理帧,11 为命令代理帧,以区别代理帧与正常帧.为了实现关联过程,需要在网络层命令帧载荷中增加两种定义,如表 4 所

示.在表 5 中,代理回应命令帧的载荷中有代理地址、代理标示符、状态位字段,当申请节点收到代理回应命令后检查状态位字段如果为 1 说明申请成功,并设置自己的地址及标示符,否则申请不成功.

表 1 网络层帧格式

byte: 2	2	2	1	1	1	可变长度
帧控制域	目的地址	源地址	代理标示符	广播半径域	帧序列号	帧载荷
网络层首部						网络层有效载荷

表 2 帧控制域的格式

bit: 0-1	帧类型
2-5	协议版本
6-7	发现路由
8	多播标志
9	安全
10	源路由
11	目的 IEEE 地址
12	源 IEEE 地址
13-15	保留

表 3 帧类型域

帧类型值	帧类型名
00	数据帧
01	网络层命令帧
10	数据代理帧
11	网络层命令代理帧

表 4 命令帧标示符

命令帧标示符	命令名称
0x01	路由请求
0x02	路由请求应答
0x03	路由错误
0x04	离开
0x05	路由记录
0x06	重新加入请求
0x07	重新加入回应
0x08	代理请求*
0x09	代理回应*

表 5 代理回应命令帧载荷

byte: 1	2	1	1
0x09	代理地址	代理标示符	状态位

作为代理节点的父路由节点要想对不同类型的子节点发送数据,需要一种区分机制,即要给不同的被代理节点分配代理地址 P_a 及代理标示符 P_f .其中代理

地址 P_a 属于网络不可能用到的地址空间, 即 $P_a[P_u, 65534]$. 其中:

$$P_u = C_{skip}(0) * R_m + C_m - R_m + 1$$

$$P_u = \frac{1 + C_m - R_m - C_m * R_m^{(L_m-1)}}{1 - R_m} * R_m + C_m - R_m + 1$$

$$P_u = C_m * \frac{1 - R_m^{L_m}}{1 - R_m} + 1$$

本文对代理节点引入一种表, 保存被代理节点的分配的代理地址及代理标示符的一一对应关系, 如表 6 所示.

表 6 代理地址转换表

P_a	P_f
0x796f	0x01
0x7970	0x02
0x7971	0x03

4.3 ABAAM 的组网步骤

1) ZigBee 协调器建立一个新的网络, 将 16bit 的网络地址初始化为 0, 初始化自己的网络深度 $Depth=0$, 并将设定的网络参数 C_m 、 R_m 、 L_m 通知全网络.

2) 申请加入网络的节点 $Node(n)$ 首先发起网络发现过程, 进行信道选择, 通过对邻居表查询, 找出未被标记的深度最小的父节点 $Node(k)$, 并向其发送请求加入网络的关联请求, 关联请求获得批准后, $Node(n)$ 正式加入网络; 如未收到回应, 则可周期性的重新发送关联请求.

3) 地址为 A_{parent} 的网内路由节点 $Node(k)$ 收到未入网的节点 $Node(n)$ 的入网关联请求后, 检查是自身是否有剩余地址可用, 如有则根据申请节点类型及顺序按照(1)(2)为 $Node(n)$ 节点分配地址.

4) 如果 $Node(k)$ 没有剩余地址可分配, 则回复拒绝加入信息. 申请节点对拒绝加入的父节点进行标记后, 重新执行步骤 2), 依次向邻居表中的其它节点发送地址请求, 直至发完所有节点.

5) 当请求设备遍历完邻居表中的潜在父节点而没能成功加入网络, 此时邻居表中的节点都被标记. 从中选取一个节点作为代理节点, 向其发送代理请求消息.

6) 被选中的父节点收到代理请求消息后, 将申请节点加入代理节点表, 并设置代理地址, 向申请节点发送代理应答消息.

7) 入网节点收到代理应答消息后, 向代理节点发

送确认消息, 开始数据传输.

4.4 ABAAM 的路由过程

为了适应新的算法, 本文对原有的树路由协议进行了改进. 主要步骤如下:

1) 代理节点收到来自子节点的帧, 首先判断帧类型是否为代理帧, 如果不是则按照正常树路由协议进行下一跳地址计算并转发; 如果是代理帧, 则把帧中的源地址替换为自己的地址, 然后进行转发. 经过地址替换的帧在网络中其它节点看来就是代理节点自身所发出的帧.

2) 网络中的非代理节点收到代理帧不做处理, 直接根据目的地址进行转发. 目的节点收到代理帧后如果进行回应则同样将帧的类型设置为代理帧, 目的地址设置为收到的源地址.

3) 代理节点收到来自上层节点的帧, 同样先判断是否为代理帧, 如果不是则向对应的子节点进行转发; 如果是则根据帧头部的代理标示符查找代理地址转换表, 如果找到则将帧头部的目的地址进行替换, 并将帧转发给目的子节点.

5 性能分析

5.1 理论分析

衡量改进算法与原算法主要从地址分配成功率与地址分配耗时方面出发. 其中, 地址分配成功率 $R_s = N_s / N$, N_s 表示节点入网个数, N 表示节点总数. 由于 ABAAM 算法比 DAAM 算法允许更多的节点加入网络, 因此地址分配成功率 R_s 会相应提高. 地址分配平均耗时表示节点入网快慢, 定义为 $t_a = T_s / N_s$, 其中 T_s 表示全部入网节点地址分配时间和, N_s 表示全部入网节点总数. 由于 ABAAM 算法会使节点入网总数增加, 所以 N_s 变大, T_s 也相应增加, 因此与 DAAM 相比变化不大.

5.2 仿真及结果

实验将 ZigBee 原有的 DAAM 算法和 ABAAM 算法进行对比分析, 通过仿真比较两者在地址分配成功率及地址分配平均耗时等性能方面的差异.

仿真工具采用 NS-2(ns-2.35), 网络覆盖面积 300×300 , 网络中节点数为 50, 100, 200, 300, 400, 500 个, 路由节点与终端节点数量 1:1, 节点位置随机均匀分布, 协调器节点处于仿真区域中心, 节点通信半径设为 35m. 考虑到网络参数的组合方式有 65535^2 种^[3], 为得到地址的空间足够大, 同时网络深度不至于太大

而造成端到端延迟过高, 设定 C_m 、 R_m 、 L_m 的缺省值为 (8, 3, 7). 每个实验做 20 次, 结果取平均值.

1) 地址分配成功率

如图 3, ABAAM 算法在实验中的地址分配成功率要明显优于 DAAM 算法, 随着网络规模的增大, ABAAM 的优势趋于明显, 比 DAAM 提高 5%-15% 的分配成功率, 这是因为当使用 DAAM 时, 节点数越多, 网络深度有可能越多, 路由节点可分配地址越少, 更多的节点成为孤节点. 而 ABAAM 则不受此限制使更多节点能加入网络.

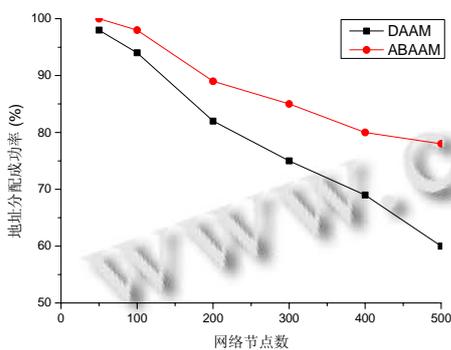


图 3 地址分配成功率

2) 地址分配平均耗时

图 4 表明了 ABAAM 的地址分配平均耗时与 DAAM 算法差距不是太大. 由于 ABAAM 与 DAAM 算法中, 无地址的节点都会多次向邻居节点申请地址, 而当查询一遍邻居节点后才会启用 ABAAM, 故平均耗时两者相差不明显. 但随着网络规模变大, ABAAM 的地址分配成功率会提高, 故地址分配耗时会比 DAAM 低一些.

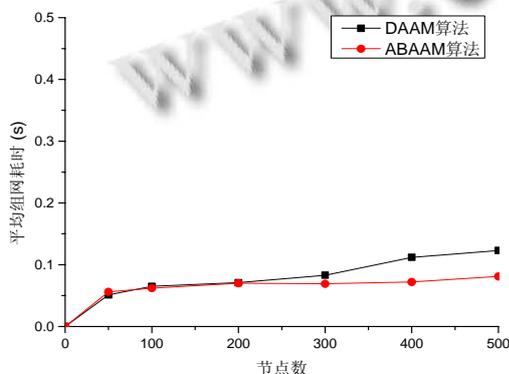


图 4 地址分配平均耗时

3) 网络预设参数的影响

为考察 ABAAM 的一般性, 选择 500 个网络节点

场景, 对 7 组不同的网络参数组合 (C_m, R_m, L_m) 进行仿真得到如图 5 所示结果. 从图中整体可知, 对不同的网络参数组合 ABAAM 在地址分配成功率方面都要优于 DAAM. 地址分配成功率随着网络深度的增大而增加, 参数组合 (8,3,1) 显示了网络深度为 1 的极端情况. (3,3,5) 及 (3,3,7) 组合由于 $C_m=R_m$, 终端节点在 DAAM 下无法加入网络, 导致地址分配成功率低于 50%, 而 ABAAM 算法可以使额外的终端节点加入网络.

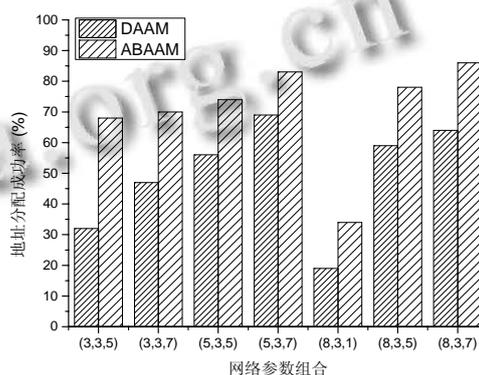


图 5 不同网络参数组合的影响

6 结语

本文提出了一种基于代理节点的孤立点解决算法 ABAAM, 当路由节点作为被申请节点无法分配更多地址时, 申请节点发送代理申请命令, 父路由节点转变为代理节点行使代理功能, 将子节点加入网络, 并通过地址转换完成数据的传输过程, 从而减少了孤立点的发生, 避免了额外的通信开销. 理论和仿真实验显示, 与原有的 DAAM 算法相比, ABAAM 算法在地址分配成功率, 地址分配平均耗时方面都有不错的表现.

参考文献

- 1 ZigBee Alliance. ZigBee Specification Document 053474r17. <http://www.zigbee.org/>. 2007.
- 2 Farahani S. Zigbee wireless networks and transceivers. NEWNES. 2008.
- 3 任智, 李鹏翔, 姚玉坤. 基于分段的 ZigBee 网络按需可扩展地址分配算法. 通信学报, 2012, 33(5).
- 4 卿晓霞, 王文章, 王波. 基于节点转移的 ZigBee 网络孤立点减免算法. 仪器仪表学报, 2010, 31(7), 1650-1656.
- 5 蒋庭, 赵成林. ZigBee 紫蜂技术及其应用. 北京: 北京邮电大

- 学出版社,2006.
- 6 Fang MQ, Wan J, Xu XH. A preemptive distributed address assignment mechanism for wireless sensor networks. Proc. of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM'08). Dalian, China. 2008. 1-5.
- 7 Giri D, Roy UK. Single level address reorganization in wireless personal area network. 2009 Int. Conf. on Computers and Devices for Communication. 2009. 1-4.
- 8 Li YR, Shi HB, Tang BY. Address assignment and routing protocol for large-scale uneven wireless sensor networks. 2009 International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology. Wuhan, China. 2009. 1-4.
- 9 Giri D, Roy UK. Address borrowing in wireless personal area network. 2009 IEEE International Advance Computing Conference (IACC 2009). Patiala, India. 2009.181-186.
- 10 Pan MS, Tsai CH, Tseng YC. The orphan problem in ZigBee wireless networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2009, 8(11): 1573-1584.

www.c-s-a.org.cn

www.c-s-a.org.cn