

# 基于分段的 ZigBee 网络按需可扩展地址分配算法

任智, 李鹏翔, 姚玉坤, 黄勇

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:** 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; 同时改进现有树路由协议使之能够兼容扩展的地址。理论和仿真分析表明所提算法的地址分配成功率等性能优于 DAAM 和它的改进方案 SLAR。

**关键词:** 无线传感器网络; ZigBee 标准; 地址分配; 算法; 分段

中图分类号: TP393.0

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)05-0131-07

## Segmentation-based on-demand scalable address assignment algorithm in ZigBee networks

REN Zhi, LI Peng-xiang, YAO Yu-kun, HUANG Yong

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology of Chongqing, School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Segmentation-based on-demand scalable address assignment algorithm was proposed, which segmented the 16bit address space according to a value predefined by DAAM. When a router lacks addresses, it extended its address space to a new segment. Thus, more addresses could be attained and assigned to children. Meanwhile, the present tree routing protocol was improved to suit the extended addresses. Theoretical and simulation analysis show that our algorithm outperforms DAAM and one of its present improvements in terms of the success rate of address assignment, communication overhead, etc.

**Key words:** wireless sensor networks; ZigBee specification; address assignment; algorithms; segmentation

### 1 引言

采用 ZigBee 标准<sup>[1]</sup>的无线传感器网络<sup>[2,3]</sup> (简称“ZigBee 网络”)近来得到较多关注。ZigBee 网络在组网过程中会为每个节点分配一个 16bit 的网络地址, 以用于之后的通信。分布式地址分配机制 (DAAM, distributed address assignment mechanism)<sup>[1]</sup>是 ZigBee 网络中一种重要的节点地址分配

机制, 它使用网络协调器和路由节点的最大子节点数  $C_m$ 、最大子路由由节点数  $R_m$  和网络最大深度  $L_m$  这 3 个参数计算并分配节点地址, 通过在分配与被分配地址的节点之间建立“父-子”关系, 使地址与位置相关联, 从而为树路由 (tree routing) 协议<sup>[1,4]</sup>的运行提供条件。因为实现简便且能使地址与位置关联, DAAM 目前得到较广泛的研究和应用。

由于 DAAM 预设了参数  $C_m$  和  $R_m$ , 因此当向

收稿日期: 2010-10-29; 修回日期: 2011-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60972068); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目 (2010-1561); 重庆市自然科学基金资助项目 (2009BB2085); 重庆市教委科研基金资助项目 (KJ090524)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60972068); The Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry (2010-1561); The Natural Science Foundation of Chongqing (2009BB2085); The Science Research Project of Education Committee of Chongqing (KJ090524)

某个路由节点申请地址的路由节点数大于  $R_m$  ,或终端节点数大于  $C_m - R_m$  时,节点分配不到地址,称之为“宽度不足”(insufficient breadth)问题,得不到地址的节点因无法入网而成为孤节点(orphan node)<sup>[5]</sup>,如图 1 中的节点 A。由于网络部署通常难以直接固定所有节点位置,因此宽度不足问题发生的可能性不能忽略。

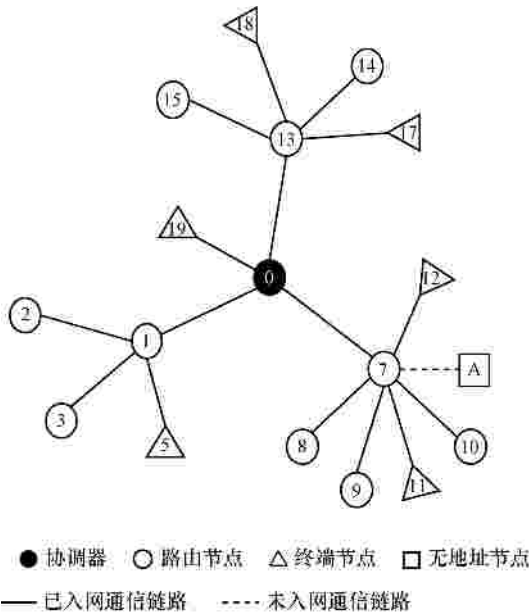


图 1 宽度不足问题 ( $C_m=5, R_m=3, L_m=2$ )

对于宽度不足问题,目前已有一些研究。文献[5]探讨了节点因预设参数限制而成为孤节点的成因,提出了改变孤节点潜在父节点、重构局部网络拓扑的解决方法,能够减少因宽度不足产生的孤节点,但在通信和运行时间等方面会产生明显的额外开销。文献[6]对宽度不足问题提出的解决方法是无地址的节点以有地址的相邻路由节点为代理,向协调器申请地址,协调器将 DAAM 定义的地址空间之外的地址分配给该节点,这种方法的主要问题是会产生额外通信开销及部分节点无法使用树路由。文献[7]和文献[8]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借地址进行分配,这种方式同样存在额外通信开销和破坏树路由的问题。文献[9]介绍了一种通过地址重配置来减少孤节点的方法,在重配置过程中使用了 DAAM 未用到的地址,但重配置使控制开销增加且其扩展操作是一次性的。文献[10]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);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  $C_{skip(d+1)}$  取代  $C_{skip(d)}$  作为地址偏移量分配地址给子节点,  $C_{skip(d)}$  由式(1)计算:

$$C_{skip(d)} = \begin{cases} 1 + C_m \times (L_m - d - 1), R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \times R_m^{(L_m - d - 1)}}{1 - R_m}, R_m \neq 1 \end{cases} \quad (1)$$

这种“以深度换宽度”的方法虽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。

为解决现有方案存在的上述增加额外通信开销、破坏树路由的问题,本文提出一种基于分段的按需可扩展地址分配算法,对路由节点的子节点地址空间进行分段式按需扩展,为更多节点分配地址,既保持“地址-位置”关系又无需任何额外的通信开销,并且通过改进树路由协议使其适应所有地址。

本文的主要贡献如下。

- 1) 提出一种基于分段的按需可扩展地址分配新算法,在需要时逐段扩展可用地址空间,增加路由节点能够连接的子节点数。
- 2) 改进 DAAM 中的节点地址计算公式,引入段地址和段偏移量,使其适用于新算法,并保持原有的“地址-位置”关系。
- 3) 改进现有的 ZigBee 网络树路由协议,使其与新算法分配的节点地址兼容。

本文后面部分组织如下:第 2 节介绍网络模型,第 3 节详述提出的地址分配新算法和树路由协议的改进方法,第 4 节对新算法的性能进行理论和仿真分析,第 5 节总结全文。

## 2 网络模型

### 2.1 模型与定义

ZigBee 网络的数学模型为:  $G=(V, E)$ , 其中,  $V$  表示所有节点的集合,  $V=\{t\} \cup V_r \cup V_e$ ,  $t$  表示网络协调器,  $V_r$  表示所有路由节点的集合,  $V_e$  表示所有终端节点的集合;  $E$  表示所有对称无线通信链路的集合。

为便于研究,在本文中做如下定义。

**定义 1** 地址空间 (address space): 指具有一定位数的地址集合。

**定义 2** 分段 (segmentation): 指将一个地址空间分为多个容量更小的地址空间。

### 2.2 剩余地址空间

本文在研究中发现,DAAM 定义的地址空间上限很少达到  $65\ 535(2^{16}-1)$ , 这意味着绝大多数情况下有剩余地址空间可供利用。下面推导 DAAM 用完 16bit 地址空间的概率。

根据 DAAM 的原理,有  $S_{DAAM}=\{1, A_m\}$ , 其中,  $S_{DAAM}$  和  $A_m$  分别表示 DAAM 定义的地址空间和分配的最大地址。 $A_m$  可用式(2)计算:

$$A_m=C_{skip}(0)\times R_m+C_m-R_m \quad (2)$$

1) 当  $R_m=1$  时, 有:

$$A_m=(1+C_m\times(L_m-1))\times R_m+C_m-R_m=C_mL_m \quad (3)$$

欲使  $A_m=65\ 535$ , 须  $C_mL_m=65\ 535$ ; 通过因式分解可知 65 535 为 4 个素数的乘积:  $65\ 535=3\times 5\times 17\times 257$ ;

因此, 满足条件的  $C_mL_m$  组合个数为:  $\sum_{i=0}^4 C_4^i=16$ 。

2) 当  $R_m>1$  时, 有:

$$A_m=\frac{1+C_m-R_m-C_m\times R_m^{(L_m-1)}}{1-R_m}\times R_m+C_m-R_m$$

$$=\frac{C_m\times(R_m^{L_m}-1)}{R_m-1} \quad (4)$$

令  $\frac{C_m\times(R_m^{L_m}-1)}{R_m-1}=65\ 535$ , 则:

$$R_m^{L_m}=\frac{65\ 535}{C_m/(R_m-1)}+1 \quad (5)$$

结合条件  $R_m>1, C_m, R_m$  和  $L_m=1$  进行遍历搜索, 得到满足条件的  $C_mR_mL_m$  组合个数为 3, 即  $(4\ 369, 2, 4), (13\ 107, 4, 2), (21\ 845, 2, 2)$ 。

综上, DAAM 用完 16bit 地址空间的方式有  $16+3=19$  种; 由于  $L_m=\{1, 65\ 535\}, C_m=\{1, 65\ 535\}$ , 因此总的地址分配方式数大于  $65\ 535^2$ , 则 DAAM 用完地址空间的概率  $P<19/65\ 535^2(4.42\times 10^{-9})$ , 近似地,  $P=0$ 。

### 3 基于分段的按需可扩展地址分配算法

根据按需利用剩余地址空间的思路, 提出一种基于分段的按需可扩展地址分配 (SOSAA, segmentation-based on-demand scalable address assignment) 算法, 用 DAAM 定义的单位地址空间作为单位, 对 16bit 地址空间进行按需的分段式扩展 (如图 2 所示), 改善宽度不足问题。

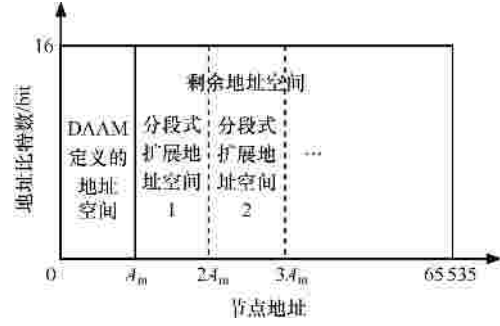


图 2 地址空间分段式扩展

#### 3.1 SOSAA 算法操作

SOSAA 算法操作包括初始化、地址请求和地址分配 3 个阶段, 具体如下。

1) 初始化

网络协调器将自己的地址设为 0, 并确定参数  $C_m, R_m$  和  $L_m$ ; 然后, 向邻居节点广播组网消息。

2) 地址请求

如果一个无地址的节点收到邻居广播的组网消息, 它将邻居地址存入邻居表; 然后, 从邻居表中选择一个信号最强的节点, 向其发送地址请求消息; 如果收到无地址分配的消息, 则依次向邻居表中的其他节点发送地址请求, 直至发往所有邻居。

3) 地址分配

如果地址为  $A_p$  的路由节点收到其他节点的地址请求, 用式(6)为该申请节点分配地址  $A_r$ 。

$$A_r=\begin{cases} A_s\times A_m+A_p+C_{skip}(d)\times n+1, & A_r \text{ 为终端} \\ A_s\times A_m+A_p+C_{skip}(d)\times R_m+n+1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $A_s$  为段地址, 等于进行地址扩展操作的次数, 初始值为 0;  $n$  为同一段地址空间内已分配的同类节点数。若无剩余地址, 该路由节点将  $A_s$  加 1, 重新计算  $A_r$ ; 若  $A_r$  小于 65 536, 则将其分配给申请节点, 否则, 因地址位数大于 16, 向申请节点发送无地址分配消息。

SOSAA 算法进行地址分配的效果可从图 1 中看出, 该图中的节点 A 使用 DAAM 无法获得地址, 但运行 SOSAA 算法则能获得地址  $28(1\times 20+7+1\times 0+1=28)$ 。

#### 3.2 计算复杂度

关于 SOSAA 算法的计算复杂度, 有如下引理。

引理 1 SOSAA 算法具有与 DAAM 相同的计算复杂度。

证明 考虑时间、存储和通信 3 个方面的复杂度。

SOSAA 算法的运行时间主要受网络深度  $L_m$  和节点的最大邻居节点数  $N_m$  影响, 为  $O(L_m+N_m)$ ; 而 DAAM 的时间复杂度同样如此, 也为  $O(L_m+N_m)$ 。DAAM 占用节点存储空间最多的部分是邻居节点的信息, 因此它的存储复杂度由最大邻居节点数决定, 为  $O(N_m)$ ; SOSAA 算法只比 DAAM 多存储了一个长度固定的段地址值, 此值占用空间相对很小, 对存储复杂度没有影响, 因此它的存储复杂度同样为  $O(N_m)$ 。DAAM 算法的通信操作主要包括网络协调器和路由节点的组网消息广播和节点的地址申请与回复, 因此它的通信复杂度由路由节点的数量和度决定, 为  $O(NR_m^{L_m-1})$ , 其中,  $N$  为路由节点的度; 而 SOSAA 算法没有增加任何通信操作, 因此其通信复杂度同样为  $O(NR_m^{L_m-1})$ 。由上述内容可得: SOSAA 算法与 DAAM 具有相同的计算复杂度。证毕。

### 3.3 SOSAA 算法的适用范围与不足

SOSAA 算法可用于任何使用 DAAM 的 ZigBee 网络。当子节点数量适用于 DAAM 时, DAAM 和 SOSAA 算法均可应用且地址分配的效果相同; 而通常情况下子节点数有可能超出 DAAM 的限制, 此时 SOSAA 算法能够分配更多地址, 效果优于 DAAM。在任何规模的 ZigBee 网络中, 都可以用 SOSAA 算法代替 DAAM, 为更多节点分配地址并且保持“地址-位置”关系。SOSAA 算法的不足之处在于: 16bit 地址总空间的限制对分段后留给子节点扩充用的地址空间有一定程度的制约, 当 DAAM 定义的地址空间较大时, 地址空间分段式扩展的次数会降低, 能够多分配的地址数也会相应减少; 但只要 16bit 地址空间没被 DAAM 用完, 就能多分配地址, 前文已推导出用完的概率约等于 0。

另一方面, 由于受到 ZigBee 标准的限制, 节点根本地址的最大值为 65 535; 当节点数小于该值时, SOSAA 算法能够有效扩充节点所用地址空间; 而当节点数大于该值时, 由于根本地址数量已不能满足要求, 因此需要在根本地址的扩充上再想办法, 比如为节点地址扩充附加比特数等, 这涉及到改变 ZigBee 标准对节点地址比特数的定义, 将在下一步工作中深入研究此问题。

### 3.4 树路由协议的改进

为消除 SOSAA 算法对树路由的影响, 本文改进了树路由协议中判断数据传递方向和计算下一跳节点的机制。改进后的树路由协议主要步骤如下。

1) 地址为  $A$  深度为  $d$  的路由节点收到目的地

址为  $D$  的数据分组时, 先计算基准地址  $D'$ :

$$D' = [(D-1) \bmod A_m] + 1$$

2) 用式(7)判断  $D$  是否是子孙节点:

$$A < D' < A + C_{\text{skip}}(d-1) \quad (7)$$

若式(8)成立, 则执行步骤 3); 否则, 将数据分组发给本节点的父节点, 结束。

3) 判断:

$$D' > A + R_m \times C_{\text{skip}}(d) \quad (8)$$

若式(8)成立, 下一跳节点地址  $N=D$ ; 否则:

$$N = A + 1 + \left\lfloor \frac{D' - (A+1)}{C_{\text{skip}}(d)} \right\rfloor \times C_{\text{skip}}(d) \quad (9)$$

然后, 将数据分组转发给下一跳节点。

如上所述, 改进后的树路由协议能够适用于 SOSAA 算法分配的所有地址。

## 4 性能分析

### 4.1 理论分析

1) 地址分配成功率

地址分配成功率用于评价地址分配算法的有效性。定义地址分配成功率  $S$  为

$$S = N_s / N \quad (10)$$

其中,  $N$  为节点总数,  $N_s$  表示获得地址的节点数。因为 SOSAA 算法能够通过按需的地址扩展为原来得不到地址的节点分配地址, 所以会使  $N_s$  增大, 则  $S$  随之增大。

2) 控制开销

控制开销指地址分配算法在运行过程中用于传送控制分组的开销, 与算法效率负相关。为消除控制分组长度不同的影响, 在本文中用地址分配算法运行结束时节点发出的所有控制分组的比特数  $B_C$  来表示控制开销。

$$B_C = \sum_{i=1}^T L_i \quad (11)$$

其中,  $i$  为大于 0 的整数,  $L_i$  表示第  $i$  个控制分组的长度。由于 SOSAA 算法能够为原来得不到地址的节点分配地址, 这部分节点获得地址后不再触发地址请求分组及其答复分组, 因此与 DAAM 相比,  $i$  减小, 相应地  $B_C$  减小。

3) 地址分配平均耗时

地址分配平均耗时表征算法分配地址的快慢程度。定义地址分配平均耗时  $t_a$  为

$$t_a = t_s / N_a \quad (12)$$

其中,  $t_s$  表示分配地址消耗的全部时间,  $N_a$  表示获得地址的节点总数。与 DAAM 相比, SOSAA 算法能够为更多的节点分配地址,  $N_a$  增大; 减少了节点因得不到地址而多次申请的操作, 使  $t_s$  减小, 所以  $t_a$  减小。

#### 4.2 仿真分析

取 DAAM 和 SLAR<sup>[10]</sup> 作为比较对象, 通过仿真比较分析它们和 SOSAA 算法在地址分配方面的性能。选择 SLAR 的原因在于它能够增大路由由节点的地址空间且未破坏树路由。

##### 4.2.1 仿真设置

使用 Windows XP 平台上的 OPNET 仿真软件<sup>[11]</sup> 对上述地址分配算法进行仿真。在半径为 200m 的圆形区域设置具有不同节点密度的 5 个仿真场景,  $N$  个静止节点在该区域中随机均匀分布,  $N \in \{100, 200, 300, 400, 500\}$ ; 每个场景的中心位置有 1 个协调器, 路由节点和终端节点的数量比例为 6 : 4; 节点的 MAC 层和物理层采用 IEEE802.15.4a 标准<sup>[12]</sup>, 节点通信范围统一设为 35m, 考虑节点总数和路由、终端节点比例,  $C_m$ 、 $R_m$  和  $L_m$  的缺省值分别设为 5、3 和 8。每个仿真实验做 4 次, 结果取平均值。随机种子值分别取 128、130、132 和 134。

##### 4.2.2 仿真结果及分析

###### 1) 地址分配成功率

从图 3 可看出, SOSAA 算法在 5 个场景中的地址分配成功率均明显大于 DAAM 和 SLAR, 它们的均值分别为 88%、65% 和 30%, 最小的差距也有 20% (300 节点场景), 分析其原因主要在于 SOSAA 算法通过扩展地址使更多的节点得到地址, 而且不影响节点原有的地址分配机会。SLAR 由于缩小了网络深度, 对地址分配成功率造成了明显影响。

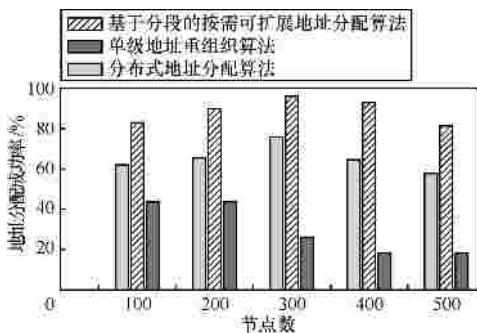


图 3 地址分配成功率比较

###### 2) 控制开销

图 4 显示了 SOSAA 算法的控制开销(均值为

552 700.8bit)在各场景中均不大于另外 2 种算法, 这验证了前面的理论分析。此外, 由于深度减小而丢失地址的节点会再次发送地址请求消息, 也使开销上升。随着节点数的增加, SOSAA 算法的优势从 0 (100 节点) 上升到 28.6% (500 节点), 也从侧面说明了无地址节点的增加使 DAAM 和 SLAR 的开销增加较明显, 尤其是 SLAR, 上升速率最大, 说明重配置过程在节点多时会明显增加开销。

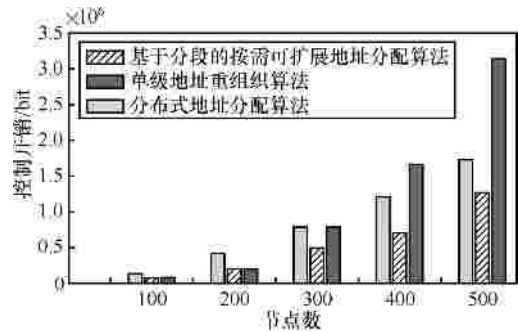


图 4 控制开销比较

###### 3) 地址分配平均耗时

图 5 表明 SOSAA 算法的地址分配平均耗时(均值为 0.12s) 在总体上少于 DAAM (均值为 0.14s) 和 SLAR (均值为 0.60s)。分析其原因在于 DAAM 中无地址的节点会向相邻的所有路由节点申请地址, 引起耗时增加; SLAR 在第一次分配地址之后会再次运行地址分配过程, 使分配耗时增加; 从图中数据来看, SLAR 地址重配置过程加上之后的无地址节点的地址请求过程, 使地址分配平均耗时成倍增加。100 个节点的场景中由于节点总数和无地址的节点数都较少, 因此 SOSAA 算法的优越性尚未充分体现, 平均耗时比 DAAM 稍高, 但仍比 SLAR 低约 60%。

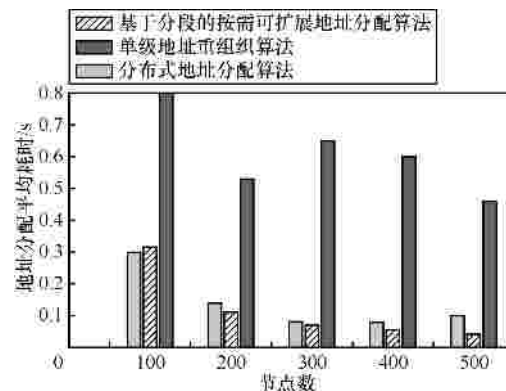


图 5 地址分配平均耗时比较

#### 4) 路由节点比例的影响

选择 500 个节点的场景,改变路由节点比例,得到如图 6 所示的结果。从图中可看出,随着路由节点比例的增加,SOSAA 算法的地址分配成功率从 4.2%开始上升,在比例为 0.8 时获得最大值 91%,地址分配平均耗时从 0.393 开始下降,在比例为 0.6 时取得最小值 0.042s,说明路由节点比例的增加总体上对 SOSAA 的节点地址分配性能有利,这为网络部署时路由节点比例的选取提供了一个参考。

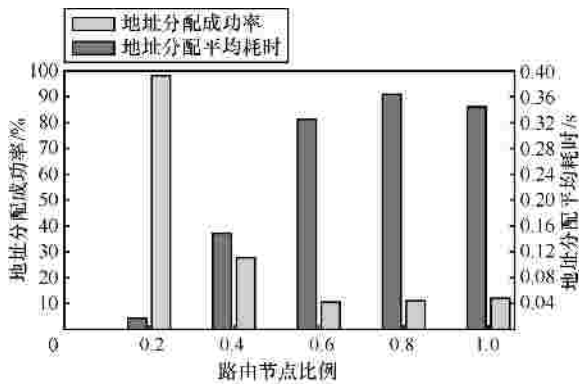


图 6 路由节点比例对 SOSAA 性能的影响

#### 5) 网络深度的影响

选择 500 个节点的场景,取  $C_m=5, R_m=3, L_m \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ,考察 SOSAA 算法的性能得到如图 7 所示结果。由图 7 可知,SOSAA 算法的地址分配成功率和平均耗时在  $L_m=8$  时取得最优值,说明网络最大深度和地址分配性能不是正相关关系。分析其原因在于:在宽度一定的情况下,深度小时因深度不足而无法得到地址的节点会增多;而深度大时,在地址总量 65 535 的限制下,因 DAAM 占用的地址空间增大而会导致可扩展的地址空间减少,这也验证了 3.3 节的分析。

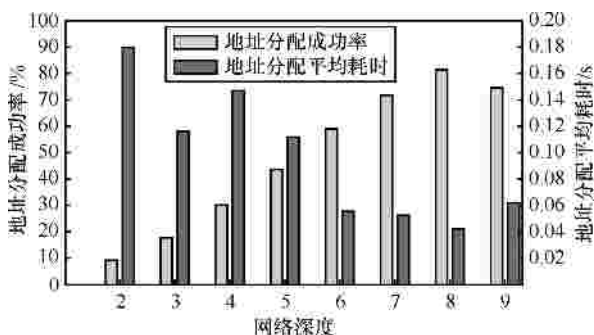


图 7 网络深度对 SOSAA 性能的影响

### 5 结束语

本文提出了一种基于分段的按需可扩展地址分配算法——SOSAA 算法,当路由节点的子节点地址空间不足时对其进行分段式扩展,从而为更多的节点分配地址,并且避免了额外通信开销和对树路由的影响。理论分析和仿真结果显示,与 DAAM 和它的一种改进方案(SLAR)相比,SOSAA 算法在地址分配成功率、控制开销和地址分配平均耗时等方面的性能表现整体更优。在未来工作中,将深入研究根本地址的扩充问题和宽、深度不足问题的合成解决方案。

#### 参考文献:

- [1] ZigBee Alliance, ZigBee Specification Document 053474r17[S]. 2007.
- [2] AKYILDIZ I F, SU W L, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [3] 黄琼, 张宏科, 郜帅等. 基于 IPv6 的无线传感器网络应用设计[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2006, 18(5): 621-624. HUANG Q, ZHANG H K, GAO S, et al. Application design of wireless sensor network based on IPv6[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2006, 18(5): 621-624.
- [4] HARBAWI M A, RASID M F A, NOORDIN N K. Improved tree routing (ImpTR) protocol for ZigBee network[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2009, 9(10):146-152.
- [5] 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.
- [6] YEN L H, TSAI W T. The room shortage problem of tree-based ZigBee/IEEE 802.15.4 wireless networks[J]. Computer Communications, 2010, 33(4):454-462.
- [7] GIRI D, ROY U K. Address borrowing in wireless personal area network[A]. 2009 IEEE International Advance Computing Conference (IACC 2009)[C]. Patiala, India, 2009.181-186.
- [8] FANG M Q, WAN J, XU X H. A preemptive distributed address assignment mechanism for wireless sensor networks[A]. of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM' 08)[C]. Dalian, China, 2008.1-5.
- [9] LI Y R, SHIH B, TANG B Y. Address assignment and routing protocol for large-scale uneven wireless sensor networks[A]. 2009 International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology[C]. Wuhan, China, 2009.1-4.
- [10] GIRI D, ROY U K. Single level address reorganization in wireless personal area network[A]. 2009 International Conference on Comput-

ers and Devices for Communication[C]. Kolkata, India, 2009.1-4.

- [11] HAMMOODI I S, STEWART B G, KOCIAN A. A comprehensive performance study of OPNET modeler for ZigBee wireless sensor networks[A]. 2009 Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies[C]. Cardiff, Wales, UK, 2009.357-362.
- [12] KARAPISTOLI E, PAVLIDOU F N, GRAGOPOULOS I, *et al.* An overview of the IEEE 802.15.4a standard[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(1): 47-53.
- [13] 王宝英, 蔡雪梅, 梅春燕等. 基于 ZigBee 技术的智能交通网络研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007, 19(6): 748-751.  
WANG B Y, CAI X M, MEI C Y, *et al.* Research of ITS based on ZigBee technology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2007, 19(6):748-751.



李鹏翔(1986-), 男, 安徽宿州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络组网技术。



姚玉坤(1964-), 女, 重庆人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络管理与应用及网络编码。

#### 作者简介：



任智(1971-), 男, 四川内江人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线移动通信网络。



黄勇(1985-), 男, 安徽黄山人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为机会网络路由协议。

#### (上接第 130 页)

- [14] ZigBee Alliance. ZigBee Specification[S]. 2008.
- [15] 张洁颖. 基于 ZigBee 网络的定位跟踪研究与实现[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
ZHANG J Y. The Research and Implementation of Localization and Tracking in the ZigBee Network[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] GONÇALO G, HELENA S. Indoor location system using ZigBee technology[A]. Third International Conference on Sensor Technologies and Applications[C]. 2009. 152-157.

黄博微(1986-), 男, 江西九江人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为网络通信技术。

曾照福(1969-), 男, 江西上犹人, 湖南科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信技术。

周明辉(1979-), 男, 湖南浏阳人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信技术。

#### 作者简介：



周少武(1964-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 湖南科技大学教授, 主要研究方向为无线网络通信技术、煤矿安全监控技术。

詹杰(1973-), 男, 湖南常德人, 湖南科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信技术。