

## 基于树路由的 ZigBee 网络高效多径路由算法

曹建玲, 李 宾, 任 智, 田利华

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对 ZigBee 网络多路径分层树路由算法(Z-MHTR)存在网络开销过大, 路径建立机制不够优化等问题, 提出一种基于树路由的高效多路径路由算法 Z-EMR(ZigBee Efficient Multipath Routing). Z-EMR 算法在多路径建立过程中减少了寻路数据分组的发送个数, 并且删除了树路径的重复发现过程, 从而使得算法变得更加高效. 仿真结果表明, 与 Z-MHTR 算法相比, Z-EMR 算法有效地降低了网络开销, 减少了路径平均长度和平均端到端时延, 达到了路径优化和提高 ZigBee 网络整体性能的目的.

**关键词:** ZigBee 网络; 多路径; 树路由; 高效

**中图分类号:** TP393.04

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2014)05-0006-04

## Efficient Multipath Routing Algorithm Based on Tree Routing for ZigBee Networks

CAO Jian-ling, LI Bin, REN Zhi, TIAN Li-hua

(Key Laboratory of Mobile Communications Technology of Chongqing,  
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To solve the problems that its high overhead and imperfect process of path built in Multipath Hierarchical Tree Routing(Z-MHTR) algorithm for ZigBee networks, an Efficient Multipath Routing(Z-EMR) algorithm for ZigBee networks is proposed. The proposed algorithm reduces the number of routing packets that are delivered and deletes the repeated discovery of tree routing in its process of multipath built, thus making it more efficient. The simulation results indicate that Z-EMR algorithm has lower overhead and reduces average path length and average end to end delay compared with Z-MHTR algorithm, thus playing an important role in optimizing its path-built and improving the overall performance of ZigBee networks.

**Key words:** ZigBee networks; multipath; tree routing; efficient

### 1 引言

在无线多媒体传感网中, 监控区域的源节点向 Sink 节点传送监测到的视频、音频等数据, 对这种高速率数据传输应用的处理, 是现有无线多媒体传感网的一个挑战. ZigBee 技术是基于 IEEE802.15.4 物理层和 MAC 层的一种无线通信技术, 具有低功耗, 低成本, 低传输速率等特点; 它在无线多媒体传感网中的应用, 对网络的传输带宽有较高的要

求<sup>[1]</sup>. 多路径路由算法是对单路径路由算法的扩展, 它能够有效地提高网络的传输带宽, 满足无线多媒体传感网中视频、音频等监测数据的有效传输<sup>[2]</sup>. 近年来, 针对多路径路由算法, 人们进行了大量相关的研究工作. 文献[3]中对不相交多路径和缠绕多路径路由在能量消耗、延迟等方面进行了分析比较. 文献[4]建立了多路径路由分析模型, 提出分流总的通信流量的策略来提高网络的整体性能. 文献[5]针对 ZigBee 无线传感器网络中高数据传输速率应用的

**收稿日期:** 2013-07-29; **修回日期:** 2013-09-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(60972068); 教育部留学回国人员科研启动基金(2010-1561); 重庆市自然科学基金(cstc2012jjA40051); 应急通信重庆市重点实验室开放课题(201201)

要求,提出一种 ZigBee 网络中基于分层树路由的多路径路由算法 Z-MHTR;该算法提出在 ZigBee 网络中通过建立多条不相交的多路径来满足其高数据传输速率应用的要求.本文则对 Z-MHTR 算法进行了有效改进.

## 2 模型描述

### 2.1 ZigBee 网络模型

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/Sink 节点,  $V_r$  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, 网络中存在的每一条链路是  $E$  的一个子集;链路的代价可以是数据传输的端到端时延、链路长度(跳数)等<sup>[6]</sup>.

### 2.2 能量模型

本文所采用的能量模型如图 1 所示:当节点 A 向距离为  $d$  的节点 B 发送  $k$  bit 的信息, A 消耗的能量由发射电路损耗和功率放大电路损耗两部分组成<sup>[7]</sup>, 即

$$E_r(k, d) = kE_{\text{elec}} + k\epsilon_{\text{fs}}d^2 \quad (1)$$

式中,  $E_{\text{elec}}$  表示节点发送  $k$  bit 信息发射电路的损耗,  $\epsilon_{\text{fs}}$  表示发送  $k$  bit 信息功率放大所需的能量. 当节点 B 接收节点 A 发送的信息时, 其无线接收装置所需的能量为

$$E_r(k) = kE_{\text{elec}} \quad (2)$$

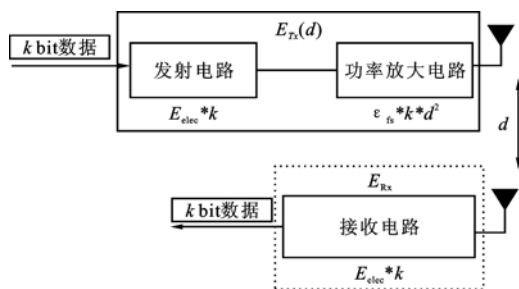


图 1 能量模型图

## 3 Z-EMR 算法

### 3.1 Z-MHTR 算法简介

为了提高基于 ZigBee 技术的无线多媒体传感网的传输带宽, Zahia Bidai 等人提出了基于树路由的 ZigBee 网络多路径路由算法 Z-MHTR<sup>[5]</sup>. 该算法在 ZigBee 树路由协议的基础上, 源节点将所有邻居节点平等对待, 每次通过广播 10 个数据分组进行寻路; 经过比对源节点和当前节点的树路由信息 ZTP(ZigBee Tree Path Information), 将寻路数据

分组传送给可用的邻居节点, 建立从源节点到 Sink 节点的多条不相交的路径; 利用多路径传输数据分组, 从而提高了网络的吞吐量, 满足了高速率数据传输的要求. 该算法存在两个不足之处: 一是在多路径的建立过程中, 初始阶段通过广播 10 个数据分组进行路径发现, 导致网络开销较大; 二是在多路径的建立过程中, 对于假设已经存在的树路径再次进行路径发现, 导致网络的开销较大以及整体上数据传输的路径平均长度偏大.

### 3.2 Z-EMR 算法设计

针对上述问题, 在 Z-MHTR 算法的基础上, 提出一种基于树路由的 ZigBee 网络高效多路径路由算法 Z-EMR. 在新算法中, 我们主要对 ZigBee 网络多路径建立阶段进行改进, 以降低网络开销, 减少网络平均路径长度.

#### 3.2.1 地址分配

在 Z-EMR 算法中, 使用基于树状网络拓扑的分布式地址分配机制 DAAM<sup>[6]</sup>, 其详细的地址分配步骤如下:

(1) 网络协调器节点地址为 0, 网络深度为 0, 确定 3 个参数:  $C_m$ 、 $R_m$ 、 $L_m$  后, 在网络中广播组网消息, 其他节点收到组网消息后记录下组网参数再进行广播转发.

(2) 网络中的未入网的节点通过 MAC 层数据监听, 记录邻居节点发送地址分配控制信息的次数, 发送地址分配控制信息的次数越多, 说明该节点携带的子节点的数目越多, 以此判断各个邻居节点已经分配的子节点的个数.

(3) 网络中未入网的节点通过对邻居表(一跳范围)的查询, 选择相应的邻居节点作为潜在父节点发送入网请求.

(4) 地址为  $A_p$  的网内路由节点收到未入网的节点的入网申请后, 根据组网参数进行判断, 无剩余地址可用于分配, 则发送拒绝加入消息; 若有空余网络地址, 按照 DAAM 分配机制为节点分配网络地址.

(5) 节点收到分配地址的控制信息, 确定自己网络地址和节点深度(父节点的深度加 1).

#### 3.2.2 基于树路由的多路径建立

网络中的每个节点通过发送 Hello 控制信息, 进行邻居发现, 建立自己的邻居表, 邻居表中包含的信息有邻居节点地址, 与节点的关系(父节点, 子节点, 横向邻居节点), 是否已经参与路由的标志位 In-use. 网络中的节点通过邻居节点, 找到通往 Sink 节

点的不相交的多条路径. 在本算法中, 树路径作为已有的路径, 不必进行路径发现. 节点的邻居表中, 父节点对应的 Inuse 标志为 1.

由于网络中的每一个节点通过 DAAM 地址分配会有一个唯一的网络地址, 通过网络地址能够得到节点在网络拓扑中的位置. 通过计算, 可以得到每个节点到达 Sink 节点的树路径信息. 网络中节点的树路径信息  $ZTP_c$  可经过式(3)、(4)计算出.

$$ZTP_c = \begin{cases} (C_1, C_2, \dots, C_{d_c}, 0, \dots, 0) & 0 < d_c < L_m \\ (C_1, C_2, \dots, C_{L_m}) & d_c = L_m \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $C_k$  表示地址为  $C$  的节点深度为  $k$  的父节点是深度为  $k-1$  的父节点的第几个子节点, 即表示树路径上的每个节点在其深度级别的序号. 由此通过  $ZTP_c$  可以得到  $C$  节点到 Sink 节点的树路径信息. 当  $C_k$  为 0 时, 表示路径结束.  $C_k$  的计算方法如式(4)所示:

$$C_k = \left\lceil \frac{A_c - k - \sum_{i=1}^{k-1} C_{skip}(i-1)(C_i - 1)}{C_{skip}(k-1)} \right\rceil + 1 \quad (4)$$

式中,  $A_c$  表示  $C$  节点的网络地址,  $C_{skip}(i)^{[7]}$  表示深度为  $i$  的路由节点的地址偏移量.

不相交的多路径的具体建立过程如下:

Step 1. 源节点以广播方式将第一个寻路数据分组(寻路数据分组前面加一标志位 flag, 默认为 0, 表示该数据用来建立多路径)发送给自己的邻居表中对应 Inuse 不为 1 的节点; 同时向周围节点发布自己已参与路径的信息;

Step 2. 节点收到邻居节点参与路径的通知信息, 将邻居表中对应的标志位 Inuse 置为 1.

Step 3. 中间节点收到 flag 为 0 寻路数据分组, 判断该数据分组经历的跳数是否为 1, 若经历的跳数为 1, 执行 Step4; 若经历的跳数不为 1, 表示当前节点不是第二跳节点, 则执行 Step5. 中间节点收到 flag 为 1 数据分组, 则执行 Step 6.

Step 4. 判断该寻路数据分组是否是子节点发送来, 若是, 表示该条路径为树路径, 由于树路径是已经存在的路径, 没有必要再进行路径发现, 所以此数据不再转发; 若该寻路数据分组不是子节点发送来, 则执行 Step5.

Step 5. 节点比较当前节点与源节点的 ZTP 信息, 若第一个不相同的分支节点的深度为 1, 说明当前节点与源节点的有唯一的公共父节点是根节点,

执行(1); 若第一个不相同的分支节点的深度为当前节点的深度, 说明当前节点与源节点是兄弟节点, 执行(2); 若第一个不相同的分支节点的深度大于 1 小于当前节点的深度, 执行(3);

(1) 节点将数据发送给自己的父节点, 将寻路数据分组前面的 flag 置为 1, 同时向周围节点发布自己已参与路径的信息, 在路由表中添加源节点到 Sink 节点的路由信息, 源节点传来的数据经过此节点之后按照树路径传送;

(2) 节点将数据发送给自己的邻居表中对应 Inuse 标志位为 0 的节点. 同时向周围节点发布自己已参与路径的信息, 在路由表中添加源节点到 Sink 节点的路由信息;

(3) 节点将数据发送给自己的父节点, 同时向周围节点发布自己已参与路径的信息, 在路由表中添加源节点到 Sink 节点的路由信息.

Step 6. 节点收到寻路数据分组, 直接将数据发送给父节点, 同时向周围节点发布自己已参与路径的信息.

Step 7. Sink 节点收到数据, 获取寻路数据分组中记录的源节点的邻居节点信息, 按照树路由将该节点信息通知给源节点, 表示通过该邻居信息有到达 Sink 节点的不相交路径.

Step 8. 源节点收到路径回复信息, 建立到 Sink 节点的路由表, 确定到达 Sink 节点的路径条数.

至此, 多路径建立完成.

### 3.2.3 数据传输

多路径建立以后, 源节点在发送数据时, 按照路径的长度, 优先使用树路由, 之后依次使用长度较短的路径传输数据分组.

路径建立以后产生的数据分组, 在树路径上传送的数据分组, 前面的标志位置为 1; 不是沿树路径传送的数据信息, 标志位置为 2.

当节点收到数据信息时, 若数据分组的 flag 为 1 时, 表示该路径为树路径, 将数据分组传送到父节点; 若 flag 为 2, 则查询路由表, 若路由表信息显示数据分组在该节点以后按照树路径传送数据, 则将数据分组的 flag 置为 1 后, 将数据分组传送到路由表中的下一跳节点; 若没有显示, 则直接将数据分组传送到路由表中的下一跳节点. 直至将数据分组传送到目的节点 Sink.

## 4 仿真及性能分析

使用仿真软件平台 OPNET Modeler 14.5<sup>[8]</sup> 模

拟由一个协调器节点和若干个信息采集节点组成的 ZigBee 网络,网络场景大小为  $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ ,协调器节点在场景中心,网络中的节点随机均匀分布在协调器周围.节点 MAC 层和物理层采用 IEEE802.15.4 标准,假设网络中的所有节点都是路由节点.网络有随机的一半节点发送数据,每秒发送 5 个数据分组,目的地址为 Sink 节点.节点能量低于初始能量的 5% 时节点死亡,当节点死亡个数超过网络中节点总数的 20% 时,网络结束运行.主要仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数设置

| 变量名         | 值                    |
|-------------|----------------------|
| 节点数目        | 25,50,75,100,125,150 |
| 节点初始能量/J    | 10                   |
| 节点通信范围/m    | 35                   |
| 节点发送功率/W    | 0.000 6              |
| 接受功率门限/dBm  | -73.25               |
| 数据部分长度/Byte | 80                   |
| 发射电路损耗/J    | $5 \times 10^{-8}$   |
| 发送功率能耗/J    | $1 \times 10^{-11}$  |

仿真结果分析如下:

(1)与 Z-MHTR 算法相比,Z-EMR 算法能够有效减少网络开销 6.73%~11.32%.Z-EMR 算法主要从以下方面减少网络开销:源节点在寻路的时候只发送一个数据分组,并且将这个数据分组以广播方式发送给自己的邻居节点以建立路径,由于树路径是已经存在的路径,所以在路径建立阶段,不必进行树路径的建立和确认,所以如果第二跳节点收到子节点传来的数据,说明是按照树路由传送的数据,不进行转发.如果是邻居节点传来的数据,则选择下一跳转发数据.在寻路效果相同的前提下,通过减少寻路数据分组的发送和转发以及删除树路径的重复建立与确认,以减少网络开销.

(2)Z-EMR 算法中数据传输的平均路径长度小于 Z-MHTR 算法中路径的平均长度,最大降低 7.20%.Z-EMR 算法在多路径建立的初始阶段,将寻路数据分组的个数由 10 个减为 1 个,减少了数据分组的转发次数;在多路径的建立阶段,删除了树路径的发现过程,同样也减少了寻路数据分组的转发次数;并且在多路径建立完成以后,源节点在发送数据分组时,按照路径的长度,优先使用树路径传送数

据,之后依次使用长度较短的路径传送数据,尽量减小传输数据分组的路径长度,使得 Z-EMR 算法的数据传输路径的平均长度较 Z-MHTR 算法有所减少.

(3)与 Z-MHTR 算法相比,Z-EMR 算法的数据分组传输平均端到端时延降低 2.94%~6.94%.Z-EMR 算法能够降低数据传输的端到端时延,主要原因是:①在多路径建立的初始阶段,源节点减少了寻路数据分组的发送个数;并且在多路径的建立过程中,删除掉了树路径的重复发现过程,这样在多路径的建立过程中通过减少寻路数据分组的转发次数降低发送时延.②在多路径建立完成以后,源节点在发送数据分组时,通过使用长度较短的路径,尽量降低数据分组的传输时延.

(4)数据分组传送成功率

在网络中死亡节点出现之前,数据分组的传送成功率如表 2 所示.

表 2 数据分组传送成功率比较

| 节点场景 | Z-EMR/% | Z-MHTR/% |
|------|---------|----------|
| 25   | 100     | 100      |
| 50   | 100     | 100      |
| 75   | 100     | 100      |
| 100  | 100     | 100      |
| 125  | 100     | 100      |
| 150  | 100     | 100      |

从表 2 中的数据可看出,与 Z-MHTR 算法一样,Z-EMR 算法的数据传送成功率达到 100%,说明 Z-EMR 算法在减少网络开销和降低传输路径平均长度的同时保证了数据传送的成功率.

## 5 结束语

本文针对 Z-MHTR 算法存在的不足,提出一种高效多路径路由算法 Z-EMR.新算法在多路径的建立过程中优化了原算法的路径建立机制;从仿真结果中可以看到,它在保证数据传送成功率的同时,有效地降低了网络开销,减少了路径平均长度和平均端到端时延,从而达到了提高整个 ZigBee 网络性能的目的.在接下来的工作中,我们将继续研究多路径路由算法,以满足不断出现的高速率数据传输应用的需求.

(下转第 13 页)

分割图像的边缘像素数,  $N_{Det}$  代表算法分割图像的边缘像素数,  $N_{Det \cap GT}$  代表算法准确检测到的边缘像素数,  $\alpha = 0.5$ .

表1 区域数和  $F$ 

| 图片 | 文献[3] |         | 本文算法 |         |
|----|-------|---------|------|---------|
|    | 区域数   | $F$     | 区域数  | $F$     |
| 1  | 113   | 0.254 5 | 10   | 0.260 6 |
| 2  | 49    | 0.238 0 | 13   | 0.246 1 |
| 3  | 47    | 0.164 4 | 10   | 0.178 2 |
| 4  | 173   | 0.035 5 | 11   | 0.210 9 |

从表1可以看出,与文献[3]相比,本文算法能够用更合理的区域数对分割结果进行描述,而且分割精度也比较高。

## 5 结束语

本文提出了一种基于多尺度滤波和自适应标记提取的分水岭新算法.实验结果表明:本文算法能够获得具有实际意义且更合理的分割区域.与其它改进的分水岭算法相比,本文算法不需要人工设置参数,能够完全自适应的进行分割,同时能够有效的降低分水岭的过分割问题.

## 参考文献:

- [1] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulation [J].

IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6):583-598.

- [2] 余旺盛,侯志强,宋建军.基于标记分水岭和区域合并的彩色图像分割[J].电子学报,2011,39(5):1007-1012.
- [3] 王宇,陈殿仁,沈美丽,等.基于数学形态学梯度重构和标记提取的分水岭图像分割[J].中国图像图形学报,2008,13(11):2176-2180.
- [4] Soille P. Morphological image analysis applied to crop field mapping [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(13):1025-1032.
- [5] 王小鹏,罗进文.基于形态学梯度重建的分水岭分割[J].光电子.激光,2005,16(1):98-101.
- [6] 高丽,杨树元,夏杰,等.基于标记的 Watershed 图像分割新算法[J].电子学报,2006,34(11):2018-2023.
- [7] Univ Californi,Berkeley, CA. The berkeley segmentation dataset and benchmark[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bada>.

## 作者简介:

邓超 男,(1980—),博士,讲师.研究方向为数字图像处理、嵌入式系.

关格利 女,(1986—),硕士研究生.研究方向为图像分割.

王志衡 男,(1983—),博士,副教授.研究方向为计算机视觉.

(上接第9页)

## 参考文献:

- [1] Zhao J, Zeng J C. Delayed and non-delayed coverage-enhancing algorithm for wireless multimedia sensor networks[C]//2012 International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Networks. China: Taiyuan, 2012: 187-190.
- [2] Yamunadevi S P, Vairam T. Efficient comparison of multipath routing protocols in WSN[C]//2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies. Kumaracoil, 2012: 807-811.
- [3] Ganesan D, Govindan R, Shenker S, et al. Highly-resilient energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4):3-5.
- [4] Chen Canfeng, Wu Weiling, Li Zheng. Multipath routing modeling in Ad Hoc networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Seoul, 2005: 2974-2978.
- [5] Zahia Bidai, Hafid Haffaf. Node disjoint multi-path routing for zigbee cluster-tree wireless sensor networks[C]//

2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). Ouarzazate, 2011: 1-6.

- [6] 李鹏翔. ZigBee 网络分布式地址分配算法研究[D].重庆:重庆邮电大学,2012.
- [7] Liu Z X, Zheng Q C, Xue L. Energy and node degree synthesized clustering algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(sup):250-256.
- [8] Hao J, Wu J C. Modeling and simulation of CAN network Based on OPNET[C]//International Conference on Communication Software and Networks. Xi'an, 2011: 577-581.

## 作者简介:

曹建玲 女,(1974—),博士研究生.研究方向为无线传感器网络.

李宾 男,(1986—),硕士研究生.研究方向为机会网络绿色路由算法及仿真.

任智 男,(1971—),博士后,教授.研究方向为宽带无线移动通信网络及网络优化.

田利华 女,(1987—),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络路由算法及仿真.