

无线传感器网络自适应并发多路由算法

吴震东^{1,2}, 李善平¹

(1. 浙江大学计算机学院, 浙江杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学, 浙江杭州 310018)

摘要: 无线传感器网络地理位置路由算法需要克服本地最小化现象. 已有的算法均以“右手规则”为基础来克服这一现象, 但是, “右手规则”会损失链路且难以在路由过程中动态调整所选路由, 对自适应多路由选择不利. 通过深入分析本地最小化现象, 发现合理限定贪心算法的选路区域可以克服本地最小化现象, 由此提出 Clockwise Rule, 该规则不损失链路, 可动态调整所选路由, 耗费低. 在此基础上, 提出了自适应并发多路由算法 APMR (Adaptive Parallel Multi-path Routing). 算法是分布式的, 可在任意中继节点处动态调整路由策略, 优化路由过程. 仿真结果表明 APMR 算法对网络性能有很好的改善.

关键词: 无线传感器网络; 自适应多路由; 本地最小化现象; 地理位置路由

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 09-1696-06

A Parallel Multi-Path Algorithm for Adaptive Routing in Wireless Sensor Networks

WU Zhen-dong^{1,2}, LI Shan-ping¹

(1. College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: Geographic routing in wireless sensor networks suffers from the local minimum phenomenon. To help packets get out of local minimum phenomenon, the long-known right-hand rule is used, which needs the graphs planarizing. It will lost many links and doesn't suit adaptive routing. Through studying the local minimum phenomenon deeply, we find out that greedy forwarding in restricting routing regions could deal with the local minimum phenomenon. Based on the observation, a new method Clockwise Rule was proposed, which does not lost any links and more suits adaptive routing. We also proposed an adaptive parallel multi-path routing algorithm (APMR) using Clockwise Rule, which can provide various routing strategies and switch these strategies at relay nodes freely. Simulations show that APMR can significantly improve the performance of wireless sensor networks.

Key words: wireless sensor networks; adaptive multi-path; local minimum phenomenon; geographic routing

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSN) 具有: 无中心、自组织、多跳路由、单节点能量有限、易损毁等特点. 根据这些特点, 传统的 internet 路由算法以及 Ad Hoc 网络按需路由算法在传感器网络中效果都不好. 基于距离向量 (DV) 和链路状态 (LS) 的 internet 路由算法控制包开销大, 每个路由器都需要一张全局的拓扑图, 维护这张拓扑图对于能量和计算能力均有限的传感器网络不适用^[1]. Ad Hoc 网络常用的按需路由算法 (DSR)^[2] 通过泛洪 (flooding) 策略获取从源节点到目的节点的路由. 泛洪的耗费随着网络规模的扩大绝对数上涨很快, 对于大规模的 WSN 泛洪的耗费显得高了^[2,3].

在很多应用场合, WSN 在启动之初会进行定位计算^[4,5], 这使传感器在选路时已预知了自己的地理位置, 由此, 研究者提出了地理位置路由算法 (Geographic Routing). GPSR^[3] 是其中具有代表性的算法. GPSR 算法由起始节点开始, 向目的节点实行贪心 (Greedy) 路由, 直至遇到本地最小化现象 (void 区域详见文献 [3,6]). 当遇到本地最小化现象时, 先将图平面化 (planar), 再用“右手规则”继续选路, 直至走出 void 区域为止. GPSR 算法很好地降低了路由的能量开销. 不过面对越来越丰富的 WSN 应用, 不断变化的无线环境^[7], 路由算法在降低能耗的同时还需要提供良好的自适应机制, 以应对不同的环境和应用需求. 例如, 当环境变得恶劣, 链路不稳定性增加时, 自动调整路由策略, 以增加传输耗费为代价

增加路由的可靠性等.类似 GPSR 的单路由算法难以提供灵活的自适应机制.

本文通过提供灵活的多路径选择机制来提升路由算法的自适应能力.基于地理位置信息的多路由算法需要面对本地最小化问题,传统的“右手规则”需要将图平面化,这损失了大量链路且很难进行自适应路由选择.本文提出如果发生本地最小化现象的区域为凸多边形(这符合大多数实际情况),则可以将节点的选路区间划分为顺逆时针选路区域,在顺或逆时针区域中用贪心算法选路,同样可以走出 void 区域,无需图的平面化.进一步的,给出了自适应并发多路由算法 APMR(Adaptive Parallel Multi-path Routing),提供 3 条不同的路由策略,可根据环境和需求的不同,在任意中继节点处动态调整路由策略,优化路由过程.

2 相关工作

Ad Hoc 网络提出的多路径算法^[9,10]均基于泛洪策略,在目的节点处需要进行集中式处理,对于传感器网络不适用.

GRAB 算法^[11]将多路径算法运用到传感器网络上.为了降低开销,算法为每个节点设计了一对 Cost 值和 Credit 值.选路时根据这两个值,可以将路由限制在源节点到目的节点之间一条狭长的地带内.不过该算法本质上还是一个无限制的泛洪算法,因为每个节点 Cost 值的取得需要一个完整的泛洪过程. Swades De 等研究者^[12]提出了一个基于地理位置信息的交织多路由算法,算法没有考虑本地最小化现象.

Daniel F Macedo^[13], Azzedine Boukerche^[14]等研究者对自适应路由算法进行了研究. Daniel 提供了用户可自调整的路由程序接口, Azzedine 提出了上下文关注的路由调整策略.研究工作^[13,14]主要对基于簇结构(cluster-based)的路由框架进行调整.

Qing Fang 等研究者^[6]对本地最小化现象进行了研究.在二维平面上定义了 stuck 节点,本地最小化现象将发生在 stuck 节点处,提出了 BOUNDHOLE 算法,可以找出包围空洞的边界 stuck 节点. G xing 等研究者^[15]研究了如何配置足够多的传感器节点使选路过程不出现本地最小化现象.

3 算法

本文对所讨论问题有如下假设:(1)所有节点处于同一个二维平面上;(2)网络的每一个节点均已知自己的地理位置;(3)通信范围内的节点均可达;(4)发生本地最小化现象的区域为凸多边形.

3.1 本地最小化现象

本地最小化现象:如图 1,当前节点 x 的所有邻居

节点(w, y)与目的节点(D)的距离均大于 x 与 D 的距离,以距离最小为准则的选路算法(贪心算法)无法继续.

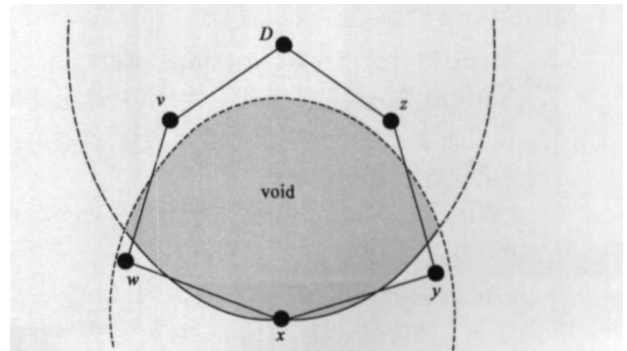


图 1 本地最小化现象示意图(引自文献[3])

传统的克服本地最小化现象的方法是“右手规则”^[6,3],图 1 中运用“右手规则”,节点 $x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow D$. 该规则在使用时需将图平面化(planar),此过程会损失很多链路.根据 B Karp^[3], TOUSSAINT^[8]的研究结果,任何邻居节点的变化都会影响到图平面化的结果,即任何邻居节点的变动都将引起图的重新平面化,这使得在中继节点处动态改变路由策略非常困难.

3.2 关于凸多边形假设的说明

Q Fang 等研究者^[6]得到了这样一个结果:每一个发生本地最小化现象的节点,必处在某个空洞(void 区域)的边界上,该边界是一条闭合曲线.本文假设发生本地最小化现象的节点与目的节点的连线将该闭合曲线切分为两个凸多边形.如图 2,本地节点与目的节点的连线分边界为 A, B 两部分, A, B 均为凸多边形.

首先,我们用 $ns2$ ^[16]随机生成 40 个场景,在 $2000 \times 2000m^2$ 的矩形区域内随机布置 200 个节点.经考察,40 个场景中的所有空洞边界均符合凸多边形假设.并且文献[3,6]中提出的场景同样均符合凸多边形假设.可见凸多边形假设符合大多数实际情况.

其次,不满足凸多边形假设的传感器网络可以通过简单的变换转换为符合凸多边形假设的网络.

(1) 如果某节点(如图 2 中 a, c 节点)发现它的邻居节点全处在半通讯区域中(如以一个圆盘为一个通讯区域,则半通讯区域即为半个圆盘),则该节点通知邻居节点将其从备选路由中集中删除;

(2) 备选路由集有改动的节点继续考察自身是否

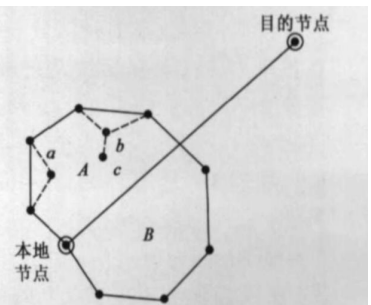


图 2 非凸多边形到凸多边形的转换

处于半通讯区域中,如是,则重复步骤(1)(如图2中**b**节点).

经过步骤(1)、(2)的转换,凸多边形假设可以得到保证.

3.3 顺(逆)时针选路规则(Clockwise-Rule)

已知包围空洞的是一条闭合曲线(具体论证见文[6]).令发生本地最小化现象的节点为

,目的节点为q,两点之间的距离表示为d(,).

定理1 如果p与q连通,则空洞边界上至少存在一个边界节点x,使得 $d(x, q) < d(p, q)$.

证明:分两种情况,(1)q在空洞内;(2)q在空洞外.对于第1种情况,以q为圆心,d(p, q)为半径做一圆.由于p与q连通,圆内必有节点x,满足 $d(x, q) < d(p, q)$.对于第2种情况,由于边界是一条闭合曲线,p与q的连线与空洞边界相交于至少一点y(非p).显然, $d(y, q) < d(p, q)$.令与y最近的节点为x,根据空洞的定义(详见文献[3,6])有, $d(x, y) < d(y, p) \Rightarrow d(x, y) + d(y, q) < (d(y, p) + d(y, q)) = d(p, q) \Rightarrow d(x, q) < d(p, q)$.证毕.

节点的顺(逆)时针区域:节点的通信范围是平面上的一块区域,该区域被由目的节点和节点定义的射线分割成两个区域.射线从节点处出发,顺(逆)时针旋转所扫过的第一个区域为节点的顺(逆)时针区域,区域不包括射线边界(如图3).

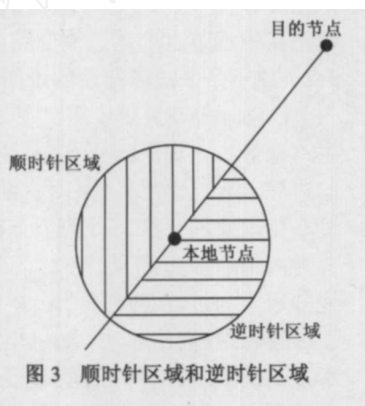


图3 顺时针区域和逆时针区域

顺(逆)时针选路规则(Clockwise-Rule,带参数 时针区域):从本节点的顺(逆)时针区域(由参数 时针区域指定)选取距离目的节点最近的邻居节点作为下一跳路由节点.

说明:参数(顺时针区域 or 逆时针区域)一旦确定,在整个 Clockwise-Rule 选路过程中(从发生本地最小化现象的节点 p 处开始,找到比节点 p 更近的节点 x($d(x, q) < d(p, q)$)为止)将不再更改.

引理1 运用 Clockwise-Rule 选路不会出现振荡和环路.

证明:因为节点的顺(逆)时针区域不包含射线边界,所以若节点 A 在节点 B 的顺(逆)时针区域,则节点 B 不可能在节点 A 的顺(逆)时针区域.假设出现了振荡,则必有两相邻节点均在对方的顺(逆)时针区域内.这与定义矛盾,所以,按 Clockwise-Rule 进行选路不会出

现振荡.假设出现了环路,根据 Clockwise-Rule 选路算法不难推知,该环路形成了一条封闭曲线.显然该曲线包围空洞,又根据定理1,存在节点 x,使得 $d(x, q) < d(p, q)$,即 Clockwise-Rule 将终止于 x(或比 x 更早出现的点),环路不会形成.所以,按 Clockwise-Rule 进行选路不会出现环路.证毕.

定理2 如果发生本地最小化现象的区域为凸多边形、节点 p 与目的节点 q 是连通的,则运用 Clockwise-Rule 选路将在有限步内找到比节点 p 更近的节点 x($d(x, q) < d(p, q)$).

证明:定理1保证了节点 x 的存在性.根据假设,发生本地最小化现象的区域(void 区域)为凸多边形,则任何穿过此凸多边形的直线必分 void 区域为两块区域.由 Clockwise-Rule 的定义可知,任何进行选路的节点与目的节点的连线,或者分 void 区域为两块区域,或者与 void 区域相切.如果与 void 区域相切,则下一跳选路必找到节点 x($d(x, q) < d(p, q)$).如果分 void 区域为两块区域,则当前节点的顺(逆)时针区域非空,即 Clockwise-Rule 的待选集非空.由引理1可知,用 Clockwise-Rule 进行选路时不会出现振荡和环路,且待选集非空,则每一跳均保证选到新的节点.由包围 void 区域的节点数有限可知, Clockwise-Rule 选路将在有限步内找到比节点 p 更近的节点 x($d(x, q) < d(p, q)$).证毕.

由定理2的证明不难看出, Clockwise-Rule 可以在不损失链路的情况下克服本地最小化现象,且不需要根据邻居节点的变化重新调整本节点和邻居节点的拓扑关系.

3.4 自适应并发多路由算法 APMR(Adaptive Parallel Multi-path Routing)

利用地理位置信息和 Clockwise-Rule,可以得到自适应并发多路由算法 APMR. APMR 基本算法由两部分组成:路由发现,路由确认,提供并发的交织多路由.在基本算法之上可安装不同的路由策略,本文提供3条路由策略:离散多路由(不相交的并发多路由)、选择性路由、快速路由,分别适应不同的环境和应用需求并且可以在路由过程中自由切换.

3.4.1 APMR基本算法:路由发现,路由确认

路由发现:由源节点开始到目的节点结束.源节点判断本节点是否遇到本地最小化现象,若是,则用 Clockwise-Rule 选出 m 个邻居节点为下一跳备选节点;若否,则用贪心算法选出 m 个备选节点;向备选节点发送 ROUTE_REQUEST 包,收到 ROUTE_REQUEST 包的节点重复源节点的动作,直至目的节点.这里通过调整 m 的值可以控制多路由扫过的面积,一般 m 取 2 或 3. Forward_State 比特指示所使用的选路算法:贪心算法

(NORMAL. STATE) 或 Clockwise-Rule (CLOCKWISE. STATE).

switch(Forward. State)

```
{
  case NORMAL. STATE:
    用贪心算法选路;
    if(遇到本地最小化现象)
      Forward. State = CLOCKWISE. STATE;
    else break;
  case CLOCKWISE. STATE:
    用 Clockwise-Rule 选路;
    if(走出本地最小化现象)
      Forward. State = NORMAL. STATE;
}
```

路由确认:无线传感器网络传输具有广播特性,相邻节点彼此可以监测到对方的传输.利用这一特性,发送 ROUTE. REQUEST 包的节点可以侦听下一跳节点是否中继了该 ROUTE. REQUEST 包,如是,则备选节点成为正式路由节点;如否,则从备选集中删除.

3.4.2 APMR 算法自适应策略

APMR 算法可以根据应用需求和环境的不同,灵活地调整路由策略.本节在 APMR 基本算法的基础上提供 3 条路由策略:离散多路由,选择性路由,快速路由.

离散多路由(不相交的并发多路由):为了实现不相交的多路由,离散多路由在基本算法的路由发现过程中引入单跳反馈机制:

(1) 如果当前节点 1 次收到 ROUTE. REQUEST 包,则发送 ROUTE. REFUSED 包给请求节点;若第 1 次收到 ROUTE. REQUEST 包,则按 Forward. State 的指示继续选路.

(2) 收到 ROUTE. REFUSED 包的节点按 Forward. State 的指示另选一个节点作为备选节点.

离散多路由策略将数据并行地在不相交的多路由上传递,提高了网络的吞吐量和负载均衡.当底层的无线链路比较可靠,上层有大数据量需要传输时,该策略有其优势.

选择性路由:选择性路由策略在多个可选路由中选择一条最合适的路由传递数据,如最稳定的路由等.当底层的无线链路不稳定,上层需要传输的数据量不是很大时,该策略有其优势.

快速路由:快速路由策略省略了路由确认过程和 ROUTE. REQUEST 包,将路由发现过程中的 ROUTE. REQUEST 包替换为需发送的数据包,直接传递.由于省略了路由请求和建立过程,并且利用所有可能的路由进行传递,快速路由增加了数据包的可靠到达率和到达速度,但同时也增加了网络的能量和带宽开销.当网

络中有紧急数据需要传递时,该策略有其优势.

4 仿真结果及分析

本文使用的仿真工具为 ns2.28^[16].实验中,向 ns2 仿真平台添加了 APMR 算法模块,传感器节点设置为不移动(大部分 WSN 应用中传感器节点均不移动).将 APMR 算法 3 种不同的路由策略放到 3 种不同的应用环境下进行考察,并与已有的路由算法(GPSR^[3], ETX metric^[7], GRAB^[11], M-MPR-SF^[12], Lazy loss detection^[17])进行比较.

4.1 离散多路由策略

本部分仿真中,假设无线链路是可靠的,则 GPSR, ETX metric, Lazy loss detection 算法的传输性能大致一样(后两个算法均是针对不可靠链路设计的,可靠链路中与 GPSR 类似),GRAB 和 M-MPR-SF 的传输性能也相仿(两者均在交织路由中进行选择性传递,均通过目的节点反馈机制建立路由表),考察 APMR, GPSR, GRAB 的平均能耗、能量方差、点对点传输延时.采用的信道带宽为 2Mbps,频率 914MHz,MAC 层协议为 802.11,物理层采用 DSSS,通信范围 250m.50 个节点的随机拓扑由 Michigan 大学于 2003 年提供的 CMU 修正版本产生,产生位置限制在 600m × 500m, 800m × 600m, 1000m × 800m, 1200m × 900m 的矩形范围内,这样可以得到平均节点密度(每个节点通信范围内的平均邻居节点数)为 19, 14, 9, 6.5 的随机场景.共生成了 40 个场景,2 条 CBR 流, CBR 流的源-目的节点的选取尽量靠近矩形的对角,每条 CBR 流 1kByte/s 数据量,模拟时间 720s.

平均能耗(Mean Energy Consume) (E_{mean}):

$$E_{\text{mean}} = \frac{\text{总能耗}}{N} \quad (1)$$

能量方差(Energy Variance) (E_{var}):

$$E_{\text{var}} = \frac{1}{N} [(E_1 - E_{\text{mean}})^2 + (E_2 - E_{\text{mean}})^2 + \dots + (E_N - E_{\text{mean}})^2] \quad (2)$$

N :网络的总节点数.

能量方差反映网络的负载均衡情况,方差越小能量分布越均匀.NS2.28 的能耗模拟在物理层 wireless-phy.cc 进行,该层对所有侦听到的包,包括非本节点之间发送的包,均减去相应的能耗.实验时对这一点进行了修改,不是发给本节点的包,不计算相应能耗.包传递的能耗计算方法是:设定节点的传输功率和接收功率,根据包的大小和信道带宽可以计算出传输时间,传输功率(接收功率) × 传输时间 = 传输能耗(接收能耗).

如图 4 所示,由于多路由均摊了能量损耗,APMR

算法的能量方差明显小于 GPSR 算法的能量方差,只有 GPSR 的 60%左右。APMR 与 GRAB 均为多路由算法,能量方差接近,但由于 GRAB 算法是选择性传递,即从多条交织路由中选择一条进行传递,能量均衡比多路由并发传递的 APMR 算法略差。

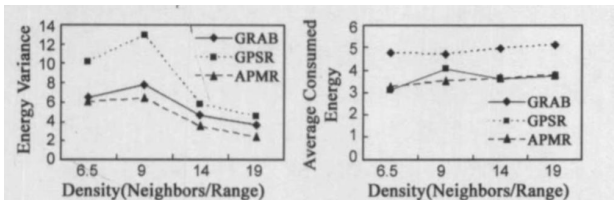


图 4 能量方差 (E_{var}) 图 5 平均能耗 ($E_{mean}, mW \times S$)

图 5 显示 GRAB 算法的平均能耗高于 APMR、GPSR 算法,GRAB 算法需要周期地泛洪广播来维护路由,使得能耗增加。APMR、GPSR 算法的平均能耗基本一样,不过 APMR 算法的能耗更稳定。当节点密度为 9 时,GPSR 算法的能耗出现波动,这是由于当遇到本地最小化现象时,GPSR 算法将图平面化的同时损失了质量比较好的链路,使得整个路由的能耗上升(图 4 中密度 9 时的能量方差变化也是由于这个原因);APMR 算法不损失链路,可选择质量较好的链路,能耗比较稳定。

表 1 是 APMR 算法与 GRAB、GPSR 算法点到点平均延迟的比较。在系统没有拥塞的情况下,点到点平均延迟主要取决于途径的跳数,各跳的处理时间。由于 APMR 算法均分了包的长度,使各跳的处理时间缩短,在平均跳数大致相等的情况下,APMR 算法的平均延迟短于 GRAB、GPSR 算法。GRAB 算法在传输前需要通过泛洪 + 反馈机制建立路由,这消耗了大量的时间。

表 1 点对点平均延迟

Density	6.5	9	14	19
GRAB	91ms	79ms	63ms	49ms
GPSR	43ms	37ms	30ms	25ms
APMR	24ms	19ms	13ms	12ms

4.2 选择性路由策略

本部分仿真中,假设无线链路是不可靠的,每条链路的包接收率在 0.85 ~ 0.99 之间随机分布,考察 APMR、GPSR、ETX metric、Lazy loss detection 算法的源-目的节点平均包接收率。这里各算法均不使用 ACK 确认机制,无数据包的重传。APMR、GRAB、M-MPR-SF 算法均使用选择性路由策略,在此种情况下传输性能相仿。

图 6 显示了源-目的节点包到达率随路由由跳数的变化情况。APMR 算法可以从多条路由中选出最稳定的路由进行传输,其包到达率比另 3 种单路由算法高。ETX metric、Lazy loss detection 算法针对不稳定链路情况进行了优化,它们的包到达率高于未经优化的 GPSR 算法。包到达率越高,包重传越少,消耗的能量和带宽越少,网络的能量效率、吞吐量越高。

4.3 快速路由策略

本部分仿真中,将无线链路的包接收率设为 0.85 ~ 0.99,使用 1kByte 数据包和 64kByte 路由请求包,使用 ACK 机制,考察 APMR、GRAB、M-MPR-SF 算法的传输速度。GPSR 等单路由算法在不稳定链路上包到达率明显低于多路由算法(如图 6),较高的重传几率使得单路由算法的传输速度低于多路由算法。

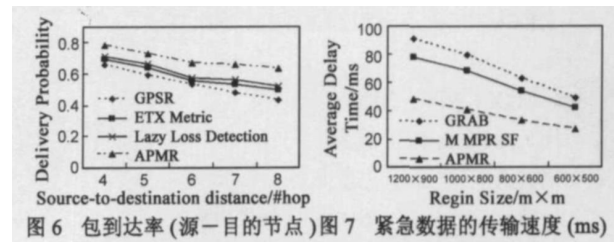


图 6 包到达率 (源-目的节点) 图 7 紧急数据的传输速度 (ms)

图 7 显示了 3 种多路由算法的紧急数据传输速度,APMR 算法明显快于 GRAB、M-MPR-SF 算法。APMR 算法利用所有可能的路由进行传递,使得包重传的几率几乎为零,节约了时间,加快了传递速度。并且 GRAB、M-MPR-SF 算法均需要通过目的节点反馈机制建立路由,反馈机制会降低传输速度。

5 结论

本文在充分利用地理位置信息的基础上,提出了一个新的解决本地最小化现象的方法 Clockwise-Rule。该方法不损失链路,可动态地调整所选路由,耗费低。设计了 3 条适应不同环境的路由策略,这些策略可在任何中继节点处,根据环境和需求的不同自由切换。综合 Clockwise-Rule 及 3 条不同的路由策略,得到了自适应并发多路由算法 APMR。APMR 算法在实验中取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] Kahn JM, Katz RH, Pister KSJ. Next century challenges: Mobile networking for smart dust [A]. Harel Kodesh. Proc of the 5th Annual ACM/ IEEE Int'l Conf on Mobile Computing and Networking [C]. Seattle, WA, USA: ACM Press, 1999. 263 - 270.
- [2] Johnson DB, Maltz DA. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks [A]. Imielinski T. Mobile Computing [C]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996. 153 - 181.
- [3] Kap B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [A]. Raymond Pichholtz. Proc. of the 6th Annual ACM/ IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Boston: ACM Press, 2000. 243 - 254.
- [4] K Chintalapudi, R Govindan, G Sukhatme, A Dhariwal. Ad-Hoc localization using ranging and sectoring [A]. Victor O K Li. INFOCOM 2004, Twenty-third Annual Joint Conference of the

- IEEE Computer and Communications Societies [C]. Hongkong, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 2662 - 2672.
- [5] A Savvides, C C Han, M B Strivastava. Dynamic fine grained localization in ad-hoc sensor networks [A]. Christopher Rose. Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001) [C]. Rome, Italy: ACM Press, 2001. 166 - 179.
- [6] Qing Fang, Jie Gao, Leonidas Guibas. Locating and bypassing routing holes in sensor networks [A]. Victor O. K. Li. INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. Hongkong, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 2458 - 2468.
- [7] D S J De Couto, D Aguayo, J Bicket, R Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 419 - 434.
- [8] TOUSSAINT G. The relative neighborhood graph of a finite planar set [J]. Pattern Recognition, 1980, 12(4): 261 - 268.
- [9] A Nasipuri, R Castaneda, S DAS. Performance of multipath routing for on-demand protocols in mobile ad hoc networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2001, 6(4): 339 - 349.
- [10] P Papadimitratos, Z J Hass, E G Sirer. Path set selection in mobile ad hoc networks [A]. Lausanne, Switzerland. ACM Mobihoc 2002 [C]. New York: ACM Press, 2002. 1 - 11.
- [11] Ye F, Zhong G, Lu S, Zhang L. Gradient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks [J]. ACM Wireless Networks, 2005, 11(3): 285 - 298.
- [12] Swades De, Chunming Qiao, Hongyi Wu. Meshed multipath routing with selective forwarding: an efficient strategy in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2003, 15(4): 481 - 497.
- [13] Daniel F Macedo, Luiz H A Correia, et al. A rule-based adaptive routing protocol for continuous data dissemination in WSNs [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(4): 542 - 555.
- [14] Azzedine Boukerche, Richard Werner Nelem Pazzi, Regina Borges Araujo. Fault-tolerant wireless sensor network routing protocols for the supervision of context-aware physical environments [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(4): 586 - 599.
- [15] Guoliang xing, Chenyang Lu, Robert Pless, Qingfeng Huang. On greedy geographic routing algorithms in sensing-covered networks [A]. Jun Murai. The Fifth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc) [C]. Tokyo, Japan: Association for Computing Machinery, 2004. 31 - 42.
- [16] NS2 [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [17] Qing Cao, Tian He, Fang Lei, Abdelzaher T, Stankovic J. Efficiency centric communication model for wireless sensor networks [A]. Jordi Domingo-Pascual. 25th IEEE International Conference on Computer Communications Proceedings [C]. Barcelona, Spain: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006. 1 - 12.

作者简介:



吴震东 男, 1976年2月出生于浙江省东阳市, 博士研究生. 主要研究方向为传感器网络、分布式计算. E-mail: zhendongwu@hotmail.com



李善平 男, 1963年8月出生于浙江省宁波市, 现为浙江大学教授, 博士生导师. 目前主要研究方向为分布式计算、信息集成技术、本体论、嵌入式操作系统开发应用. E-mail: shan@cs.zju.edu.cn