

# 基于距离和概率的能量相关路由协议

王丽珍<sup>1</sup> 张书奎<sup>1,2</sup> 贾俊铖<sup>1</sup> 王 进<sup>1</sup>

(苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)<sup>1</sup>

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)<sup>2</sup>

**摘 要** 由于传感器节点只携带能量十分有限的电池,如何最大化网络生命周期是传感器应用必须考虑的问题。提出一个新的能量相关路由算法,即基于概率和距离的能量相关协议 EPDRP,该协议在选择下一跳时综合考虑节点位置信息和剩余能量这两个方面。使用 NS2 对 GPSR 和 EPDRP 协议进行了实验分析,结果表明 EPDRP 获得了更短的路径长度和更少的路由负载,可有效延长无线传感器网络的生命周期。

**关键词** 地理路由协议,能量,网络生命周期

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.016

## Energy-aware Protocol Based on Distance and Probability

WANG Li-zhen<sup>1</sup> ZHANG Shu-kui<sup>1,2</sup> JIA Jun-cheng<sup>1</sup> WANG Jin<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory for Novel Software Technology at Nanjing University, Nanjing 210093, China)<sup>2</sup>

**Abstract** As the sensor nodes have limited battery resources, how to maximize lifetime of the network is the key consideration. We presented a new energy-aware geographic routing algorithm based on probability and distance (EPDRP), which considers both the local position information and remnant energy when choosing next hop. We evaluated the GPSR and EPDRP protocol using NS-2 simulator. Results show that EPDRP obtains lower average hop count than GPSR, reduces the routing protocol overhead and also effectively prolongs the network lifetime.

**Keywords** Geographic routing protocol, Energy, Network lifetime

## 1 引言

近几年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)<sup>[1]</sup>作为一个多学科交叉的研究课题得到了相当多的关注和讨论。它综合了传感器、嵌入式计算、分布式信息技术,实现了协作式感知及数据采集、处理和传输等功能。无线传感器网络的一个关键特性是每个节点的电源能量有限,但是许多无线传感器路由协议没有考虑节点的有限能量,或者将节点的能量设为无限大。所以,充分考虑能量的高效利用能够延长节点的生命周期,进而最大化网络生命周期。

低功率和廉价的位置跟踪设备例如 GPS 和基于 RSS 和 TOA 的位置评估技术<sup>[2,3]</sup>的有效利用,使地理位置路由得到了相当广泛的应用。大多数地理位置路由算法(包括 GPSR<sup>[4]</sup>、GAF<sup>[5]</sup>和 GOAFR<sup>[6]</sup>)依据位置信息进行转发,转发节点将数据包转发给与目的节点距离最小的邻居节点,所以在转发路径上的节点会更快地消耗完能量,从而造成网络的故障或者网络分区,导致那些依然拥有能量的节点被认为

无效。因为每个传感器节点都具有感知能力,每个节点都很重要,所以仅仅一个节点的失效就可能影响这个网络的感知区域。因此延长网络生命周期尤为重要。

地理位置路由协议的一个缺点是,当转发节点所有一跳邻居与目的节点的距离大于自身与目的节点距离时,可能会导致路由空洞。GPSR<sup>[4]</sup>采取周界转发策略,沿着空洞的边界转发数据包以解决路由空洞问题。贪婪转发经常选择最短路径进行数据转发,这样会使最短路径上的节点能量消耗得更快。当空洞边缘的节点过度消耗能量时,这种问题会变得更严重。这种不平衡的消耗能量的方式会缩短网络的生命周期。

本文在选择下一跳时,综合考虑了节点的位置信息和剩余能量,以确保剩余能量相对较高的节点比剩余能量相对较低的节点被选择的机率更高。本文提出一种能量相关地理位置路由,即基于概率和距离的能量相关协议 EPDRP。仿真结果表明,EPDRP 获得了更短的路径长度和更小的路由协议负载,同时有效延长了网络生命周期。

到稿日期:2014-10-17 返修日期:2015-01-17 本文受国家自然科学基金资助项目(61070169,61201212),江苏省自然科学基金资助项目(BK2011376),江苏省“六大人才高峰”项目(2014-WLW-010),苏州市融合通信重点实验室(SKLC2013XX),江苏省产学研前瞻性项目(BY2012114),软件新技术与产业化协同创新中心部分资助。

王丽珍(1990—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: xiaolizhen@163.com;张书奎 男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、分布式系统;贾俊铖(1983—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为物联网、认知无线网络、移动计算等;王 进(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为物联网、无线网络、移动计算、网络编码等。

本文第2节概述已存在的相关工作;第3节介绍转发节点选择下一跳转发数据的路由算法;第4节介绍仿真环境并分析仿真结果;最后总结全文并介绍未来的研究方向。

## 2 相关工作

### 2.1 地理位置路由协议

地理位置路由协议使用贪婪转发算法转发数据到目的节点,解决路由空洞问题时每个策略各有不同。Finn<sup>[7]</sup>是最早提出地理位置路由的人,他使用限制泛洪的方法绕开空洞。这个机制的一个缺点是决定一个合适的探索范围比较困难。Karp等人<sup>[4]</sup>提出的GPSR通过在原始网络图中派生出一个平面图来绕开空洞。在GPSR路由协议中,数据包在平面图上采用周界转发模式绕开空洞。GPSR有一个很明显的缺点,即它只向距离Sink节点最近的邻居节点发送数据包并且只有原先作为下一跳的节点失效时才改变它的下一跳。Lin等人<sup>[8]</sup>提出Progress Face算法,它使用遍历的方法判断周界转发的方向,避免数据包转发的方向出错,但同时增加了计算步骤。Habib等人<sup>[9]</sup>提出一个节能数据转发协议,称之为基于加权局部的狄洛尼三角剖分数据转发(WLDT),目的在于延长网络生命周期。Xiang等人提出两种自适应按需地理路由方案,其根据用户应用程序的要求构建高效的路径并且为各种场景提供高效、可靠的路由<sup>[10]</sup>。Chen等人针对几何路由协议提出了自适应更新位置的策略(APU),APU根据节点的移动特性和网络中的转发模式动态地调整位置更新的时间<sup>[11]</sup>。

### 2.2 能量相关路由协议

目前已有许多关于能量消耗的研究,本小节总结了能量相关路由协议的一些范例。

GEAR<sup>[12]</sup>采用查询驱动的数据传输方式,根据地理位置信息建立最优路径,避免泛洪广播消息。转发节点使用节点位置信息以及剩余能量两部分来决定下一跳。在EBGR<sup>[13]</sup>中,每个节点首先根据能量最优转发距离得到它与目的节点连线上的最优下一跳中继位置,然后每个转发节点使用RTS/CTS握手机制选择最靠近它的最优下一跳中继位置的邻居节点作为下一跳节点。AlShawi等人<sup>[14]</sup>将模糊算法和A星算法相结合来获得源节点和目的节点之间的最优路由路径,实现延长网络生命周期和最小化路由负载的目的。LEAR<sup>[15]</sup>试图利用连接的稳定性来最小化能量消耗率;为了验证方案的准确性,提出一个双目标最优化公式。TIEGer<sup>[16]</sup>充分利用节点与目的节点的距离、节点的连通性、链路的稳定性和节点的有效能量,有效平衡整个网络的能量。EAGRP<sup>[17]</sup>协议使用节点的位置信息和有效能量转发数据包,通过增加数据包的成功交付率高效地延长网络生命周期。链路相关集群机制LCM<sup>[18]</sup>使用一个集群标准PTX(Predicted Transmission Count)评估簇首节点构建集群,使用LCM机制确定一个节能、可靠的路由路径。Wang等人<sup>[19]</sup>提出的EASR机制利用传感器节点的剩余能量自适应地调整传感器节点的通信范围并重新定位Sink节点的位置,阻止路由空洞区域附近节点的能量过度消耗,实现延长网络生命周期的目的。

## 3 EPDRP路由算法设计

GPSR路由协议在选择下一跳转发数据包时没有考虑能量的有效利用,它是一个能量无关的协议。在中密度和高密度的情况下,贪婪转发使用率超过98%,所以数据流通常通过最短路径进行转发,最短路径上的节点将会更快地耗尽能量而造成网络故障或分区,导致其他一些依旧有效的节点被认为无效。因此,延长网络节点的生存时间尤为重要。

本文作者先前的工作针对GPSR路由空洞问题提出了一种地理路由算法PDRP(Routing Protocol Based on Probability and Distance)。PDRP路由协议的基本思想是:(1)节点根据邻居节点的位置信息列表,判断自己是否遇到了“空洞”,如果遇到了“空洞区域”,就向自己的邻居节点报告“我是空洞区域节点”,而收到此消息的邻居节点会把该节点从自己的邻居集里删除,然后更新自己的邻居集;(2)通过邻居集的节点位置信息,分别计算节点成为空洞节点的概率 $P$ 和它与目的节点的距离 $L$ ,求出 $L/P$ 的值,然后选择 $L/P$ 值最小的邻居节点为下一跳,并重复该步骤。PDRP路由协议假设节点有足够多的能量,是一个能量无关协议。

考虑到传感器节点的有限能量,本文提出了一种新的能量相关的路由算法,称为地理位置路由算法EPDRP(Energy-aware Protocol Based on Distance and Probability)。该算法综合考虑转发节点的邻居节点的地理位置信息和剩余能量。通过仿真实验观察EPDRP路由协议与GPSR和PDRP路由协议之间性能的差别。算法的详细说明如下:

(1)源节点首先确定邻居节点的候选集合,即概率和距离的比值(Ratio)小于转发节点的比值的所有邻居节点的集合。

(2)计算候选集合中节点的比重(Weight),即Ratio与节点剩余能量的比值。

(3)候选集合中比重(Weight)最小的节点被选为转发数据包的下一跳。

$(X_D, Y_D)$ 和 $(X_I, Y_I)$ 分别表示目的节点 $D$ 和转发节点 $I$ 的位置坐标,转发节点 $I$ 向目的节点 $D$ 转发数据包。概率和距离的比值表示为:

$$Ratio_{ID} = \frac{Dist(I-D)}{Pro(I)} \quad (1)$$

算法1示出了转发节点选择下一跳时使用的算法EPDRP的伪代码。首先,形成邻居节点的候选集合Candidate-Neighbor-Set( $F$ ),它是邻居集Neighbor-Set( $F$ )的子集。对于每一个属于集合Neighbor-Set( $F$ )的邻居节点 $I$ ,当 $I$ 和目的节点 $D$ 的 $Ratio_{ID}$ 小于转发节点 $F$ 和目的节点 $D$ 的比值 $Ratio_{FD}$ 时,节点 $I$ 属于集合Candidate-Neighbor-Set( $F$ )。然后对于每个属于集合Candidate-Neighbor-Set( $F$ )的节点 $I$ ,计算比重 $Weight(I)$ ,即节点的 $Ratio_{ID}$ 与有效的剩余能量的比值。其中节点 $I$ 的有效剩余能量表示为Available Energy( $I$ )。

$$Weight(I) = \frac{Ratio_{ID}}{AvailableEnergy(I)} \quad (2)$$

在邻居节点候选集合中,转发节点 $F$ 选择具有最小Weight值的邻居节点作为下一跳进行数据包转发。

**算法1** EPDRP使用的转发算法

1. Input: Forwarding Node  $F$ , Destination  $D$ , Neighbor-Set( $F$ )

2. Auxiliary Variables: Ratio<sub>I-D</sub>, Candidate-Neighbor-Set (F), Available-Energy(I), Weight(I), Weight-Set(N), Minimum-Weight
3. Output: Next-Hop-Node // If successful
4. NULL//If not successful
5. Initial: Next-Hop-Node = NULL, Minimum-Weight = 1.0, Candidate-Neighbor-Set(F)= $\Phi$ , Weight-Set(N) =  $\Phi$
6. Begin EPDRP Routing Algorithm
7.  $Dist(F,D) = \sqrt{(X_F - X_D)^2 + (Y_F - Y_D)^2}$
8.  $Pro(F) = \int_0^{Dist(F,D)} (\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2l})^N \frac{8}{\pi a} \frac{1}{2a} (\arccos \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} \sqrt{1 - (\frac{1}{2a})^2}) dl$
9.  $Ratio_{F-D} = \frac{Dist(F,D)}{Pro(F)}$
10. for every neighbor node I  $\in$  Neighbor-Set(F) do
11.  $Dist(I,D) = \sqrt{(X_I - X_D)^2 + (Y_I - Y_D)^2}$
12.  $Pro(I) = \int_0^{Dist(I,D)} (\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2l})^N \frac{8}{\pi a} \frac{1}{2a} (\arccos \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} \sqrt{1 - (\frac{1}{2a})^2}) dl$
13.  $Ratio_{I-D} = \frac{Dist(I,D)}{Pro(I)}$
14. if (Ratio<sub>I-D</sub> < Ratio<sub>F-D</sub>) then
15. Candidate-Neighbor-Set (F)  $\leftarrow$  Candidate-Neighbor-Set (F)  $\cup$  {I}
16. end if
17. end for
18. for every neighbor node I  $\in$  Candidate-Neighbor-Set(F) do
19.  $Weight(I) = \frac{Ratio_{I-D}}{AvailableEnergy(I)}$
20. Weigh-Set(N)  $\leftarrow$  Weigh-Set(N)  $\cup$  {Weight(I)}
21. end for
22. Minimum-Weight  $\leftarrow$  Weigh-Set {0}
23. for every neighbor node I  $\in$  Weight-Set(N) do
24. if (Minimum-Weight > 0.0 & Minimum-Weight < Weigh-Set {I}) then
25. Minimum-Weight  $\leftarrow$  Weigh-Set {I}
26. Next-Hop-Node  $\leftarrow$  I
27. end if
28. end for
29. return Next-Hop-Node

根据上面描述的能量相关算法,具有最小概率和距离比值的邻居节点不一定被选为下一跳。与转发节点 F 相比,具有相对较多的剩余能量并且概率和距离的比值相对较小的邻居节点被选为下一跳更合适。这种做法可以很大程度上最大化网络的生命周期,即邻居节点布局没有多大的变化。EPDRP 算法与经常选择概率和距离比值最小的邻居节点的方案相比较,能量的高效利用维持了转发节点和邻居节点的能量平衡。

在空间复杂度和时间复杂度方面, GPSR 算法和 EPDRP 算法均为  $O(n)$ 。可见, EPDRP 并没有增加 GPSR 算法的复杂度,然而,由于减少了无效往返传递数据包的能量消耗,节省了节点的能量,因此延长了整个网络的生命周期。同时,因为考虑了提前通知空洞消息并采取了空洞概率和距离相结合的措施,所以路径长度会比较短,数据包转发次数减少,缩短了时延,提高了整个网络的性能。

## 4 性能分析

为了衡量 EPDRP 的有效性,在多个拓扑结构下对 EPDRP 进行仿真。仿真结果表明, EPDRP 能有效地延长网络生命周期,同时 EPDRP 与 GPSR 和 PDRP 相比,获得了更少的路径跳数并且减少了路由协议负载。

### 4.1 仿真环境

使用 NS2 (版本是 2.35)<sup>[20]</sup> 分别对 EPDRP、PDRP 和 GPSR 进行仿真。数据包按照第 3 节介绍的地理路由算法进行转发,仿真参数如表 1 所列。整个仿真过程中 MAC (Medium Access Control) 层为 IEEE802.11。网络大小为 1000m  $\times$  1000m 的方形区域。事件区域为半径为 500m 的圆形区域。为了在不同的节点密度下对 EPDRP 进行仿真分析,节点的通信半径设为 250m,并且部署在网络中的节点数分别为 25, 50, 100, 代表低密度(平均邻居数为 5)、中密度(平均邻居数为 10)和高密度(平均邻居数为 20)。在仿真中节点带宽为 2Mbps,队列为 FIFO 并且队列大小为 100。

表 1 仿真参数

| 符号             | 参数       | 值                             |
|----------------|----------|-------------------------------|
| A              | 区域 A 的大小 | 1000m $\times$ 1000m          |
| R              | 节点的通信半径  | 250m                          |
| N              | 节点数      | 25, 50, 100                   |
| d              | 网络密度     | d = N/A                       |
| A <sub>s</sub> | 事件区域     | $\pi \times 500m \times 500m$ |
| W              | 链路带宽     | 2Mbps                         |
| S              | 队列大小     | 100                           |
| F              | CBR 流    | 15                            |
| S <sub>r</sub> | CBR 流的大小 | 32bytes                       |
| V              | 发送数据包速率  | 2kbps                         |
| E <sub>i</sub> | 初始能量     | 2J                            |
| E <sub>t</sub> | 传输能量     | 0.002J                        |
| T              | 仿真时间     | 500s                          |

数据流为 CBR (Constant Bit Rate)。节点之间相互发送 CBR 流并且每个 CBR 流的大小为 32kB。仿真 15 条数据流并且 CBR 的发送速率为 2 个数据包/s。数据流的开始时间在 20~30s 之间随机均匀分布。数据流一直持续到仿真结束。

每一次仿真运行都以描述每个节点位置的场景文件作为输入<sup>[21]</sup>。仿真持续时间为 500s。每个节点按照一个在自组织网络中使用广泛的移动模型 random waypoint model<sup>[22]</sup> 进行运动。根据这个模型,初始每个节点在仿真区域随机均匀地选择一个目的位置。节点的初始能量为 2J,每次传输或者接收一个数据包消耗能量 0.002J。

### 4.2 性能指标

为了比较这些协议,给出仿真中使用到的性能标准如下。

(1) 网络生命周期: 很难定义准确的标准来测量能量对于网络生命周期的影响。本文采用网络中所有 Sink 节点最后成功接收数据包的总数作为衡量网络生命周期的标准。

(2) 平均路径长度: 所有 s-d 会话转发数据包时经过跳数的平均值。它反映了一个节点的通信半径和路由的有效性。

(3) 路由协议负载: 发送一个数据包所需要的路由协议包的总数。

(4)能量消耗:能量消耗是信标开销和转发数据包数量的总和。

### 4.3 网络生命周期

图1显示了GPSR,PDRP和EPDRP路由协议的情况。从图1中可以看出,GPSR协议的生命周期比PDRP和EPDRP协议的生命周期短。所以,可以推断出与GPSR相比,EPDRP在能量消耗方面有更好的性能。同时还可以看出,在中密度的情况下GPSR的网络生命周期随着失效节点数目的增加而减小。因为当节点开始死亡时,节点密度变小,所以能量消耗率增加。当网络的密度越来越大时,成功交付数据包的数量也随之增多。

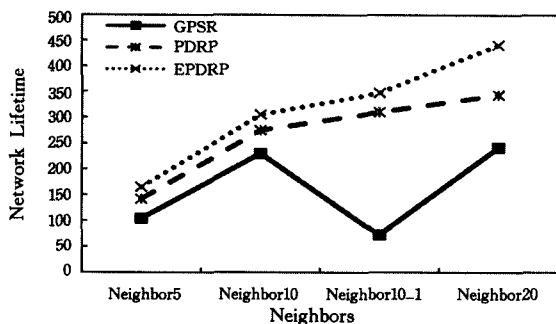


图1 网络生命周期

### 4.4 平均路径长度

图2比较了GPSR,PDRP和EPDRP路由协议的平均路径长度。随着邻居节点数的增加,路由协议的平均路径长度呈现下降的趋势,这3种协议表现很相近。这是因为邻居节点数的增加让节点有了更多的机会选择下一跳。在EPDRP路由协议中,转发节点综合考虑了邻居节点的位置信息和剩余能量,所以转发数据包需要的平均路径长度比GPSR和PDRP短。从图2中还可以看出,随着邻居数目的增加,GPSR和EPDRP之间的差距变小。

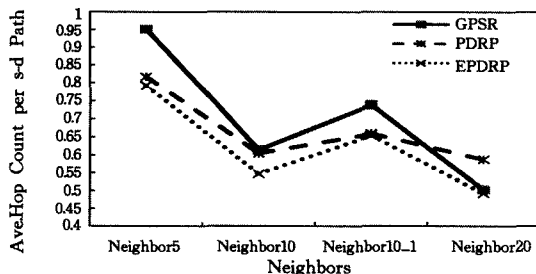


图2 平均路径长度

### 4.5 路由负载

图3显示3种路由协议的路由负载,即在不同的网络密度下整个仿真过程中发送的路由协议包的总数。从图3可以看出,EPDRP协议的路由负载小于GPSR和PDRP协议。在低密度的情况下GPSR和PDRP的路由负载都很高,这是因为转发节点的邻居节点很少,当节点转发数据包时,它需要更多的路由协议包。随着网络节点密度的增加,路由协议负载也减小。同时,从图3中还可以看出,中等密度下当失效节点变多时,路由协议负载也增加很多。总体来看,当网络节点密度增加时,EPDRP协议表现很好。

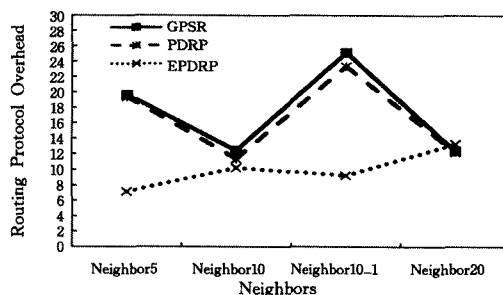


图3 路由协议负载

### 4.6 能量消耗

图4显示了3种路由协议的能量消耗情况。与GPSR和PDRP协议相比,EPDRP获得了更小的能量消耗值。这种情形的出现应该归因于EPDRP综合考虑邻居节点的位置信息和剩余能量。在一个给定的网络中,网络能量的消耗随着网络节点密度的增加而减少。随着邻居节点数目的增加,转发数据包的数量变少。从图4中可以看出,当失效节点增多时,能量消耗值增加;同时还可以看出GPSR和EPDRP协议之间能量消耗值的差距随着失效节点的增多而变大。EPDRP在决定下一跳时考虑了邻居节点的剩余能量,从而延长了网络生命周期(见图1),EPDRP同时也延长了那些几乎耗尽能量的节点的生命周期。因此,与GPSR协议相比,EPDRP协议能有效地节约更多的能量。

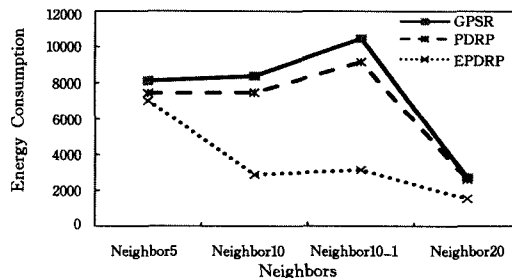


图4 能量消耗

**结束语** 本文提出一种基于距离和概率的能量相关地理位置路由,称之为EPDRP。很多无线传感器网络的路由协议没有考虑传感器节点有限的能量资源。在贪婪转发路由中,数据包总是被转发给与目的节点距离最近的节点,因此更快地消耗了最短路径上节点的能量。这种情况造成的网络故障或者分区将会导致那些依然有剩余能量的节点被认为无效。所以这些网络应该考虑能量有效性,因为它能够延长节点的生命周期进而延长网络生命周期。

本文在选择下一跳转发数据包时,综合考虑了节点的位置信息和剩余能量。在多跳无线传感器网络中,从源节点向目的节点传递数据包,EPDRP具有高效和可靠的特点。在NS2仿真环境下,将EPDRP分别与GPSR和PDRP协议进行仿真比较。仿真实验使用表1中的仿真参数在不同的节点密度下进行。结果说明EPDRP在延长网络生命周期方面表现更好,它同时也减少了平均路径长度以及路由协议负载和能量消耗。

### 参考文献

- [1] Akyildiz F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40

- [2] Patwari N, Hero A O, Perkins M, et al. Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2003, 51(8): 2137-2148
- [3] Doherty L, Pister K S J, Ghaoui L. Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks[C]// The Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. April 2001
- [4] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks[C]// Proceedings of the Sixth ACM Annual International Conference on Computing and Networking. Boston, USA, 2000: 243-254
- [5] Bose P, Morin P, Stojmenovic I, et al. Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks[J]. Wireless Networks, 2001, 7(6): 609-616
- [6] Kuhn F, Wattenhofer R, Zollinger A. Worst-Case Optimal and Average-Case Efficient Geometric Ad-Hoc Routing[C]// Proceeding of the Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. 2003: 267-278
- [7] Finn G G. Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks: Technical Report ISI/RR-87-180[R]. USC/ISI, March 1987
- [8] Lin C N, Yuan S A, Chiu S W, et al. ProgressFace: An Algorithm to Improve Routing Efficiency of GPSR-Like Routing Protocols in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(6): 822-834
- [9] Ammari H M, Das S K. Forwarding via checkpoints: Geographic routing on always-on sensors[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(7): 719-731
- [10] Xiang X F, Wang X, Zhou Z H. Self-Adaptive On-Demand Geographic Routing for Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(9): 1572-1586
- [11] Chen Q J, Kanhere S S, Hassan M. Adaptive Position Update for Geographic Routing in Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(3): 489-502
- [12] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks [EB/OL]. <https://www.cs.wmich.edu/wsn/doc/geography/yu01geographical.pdf>
- [13] Zhang H B, Shen H. Energy-Efficient Beaconless Geographic Routing in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(6): 881-896
- [14] Alshawi I S, Yan L S, Pan W, et al. Lifetime enhancement in wireless sensor networks using fuzzy approach and A-star algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(10): 3010-3018
- [15] Rango F D, Guerriero F, Fazio P. Link-Stability and Energy Aware Routing Protocol in Distributed Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(4): 713-726
- [16] Singh I B, Ho Q D, Le N T. TIEGeR: An Energy-Efficient Multi-Parameter Geographic Routing Algorithm [C] // 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Quebec City, Canada, 2012: 1-5
- [17] Elrahim A G A. Energy aware routing protocol for low energy sensor networks[C]// 2013 International Conference on Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE). Khartoum, Sudan, 2013: 109-114
- [18] Wang S S, Chen Z P. LCM: A link-aware clustering mechanism for energy-efficient routing in wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 728-736
- [19] Wang C F, Shih J D, Pan B D, et al. A Network Lifetime Enhancement Method for Sink Relocation and Its Analysis in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(6): 1932-1943
- [20] Fall K, Varadhan K. ns notes and documentation [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns,2000>
- [21] Broch J, Maltz D, Johnson D, et al. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols[C]// Proceeding of the Fourth annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98). 1998: 85-97
- [22] Bettstetter C, Hartenstein H, Perez-Costa X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model: epoch length, direction distribution, and cell change Rate[C]// Proceeding of the Fifth ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Mobile Systems. 2002: 7-14

(上接第 44 页)

名被试者的呼吸信号在各种呼吸模式下呈现相同的特征。

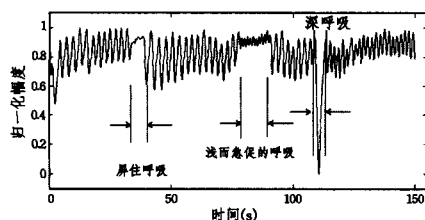


图6 被试者 A 后 150s 的各种呼吸模式下的 Kinect 呼吸信号

**结束语** 呼吸信号的非接触式测量可以提供给被测试者更多的舒适性,也可以在特殊的情况下给测试者提供更多的隐蔽性。本文设计改进了一种基于 Kinect 体感相机的呼吸信号非接触测量方法,这种方法适用于被试者采取坐立方式测量呼吸信号。实验证明 Kinect 测试的呼吸率和接触式生理探测仪测试的呼吸率之间的相对误差为 0.4%,且 Kinect 可以测试出呼吸信号不同的呼吸模式。

目前的实验数据在可控的实验环境下完成,即被试者尽量保持静止。未来将研究更加复杂情况下的非接触式测量方法,提高被试者在大幅度晃动情况下测量方法的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] Whyte K, Allen M, Fitzpatrick M, et al. Accuracy and significance of scoring hypopneas[J]. Sleep, 1992, 15(3): 257-260
- [2] Heitman S, Atkar R, Hajduk E A, et al. Validation of nasal pressure for the identification of apneas/hypopneas during sleep[J]. American journal of respiration and critical care Medicine, 2002, 166(3): 386-391
- [3] Murthy R, Pavlidis I. Noncontact measurement of breathing function[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2006, 25(3): 57-67
- [4] Xia J, Siocchi R A. A real-time respiratory motion monitoring system using KINECT: proof of concept[J]. Medical Physics, 2012, 39(5): 2682-2685