

文章编号 1004-924X(2008)09-1752-07

# 基于混合汇聚节点的无线传感器网络数据收集方法

马 奎<sup>1</sup>, 黄河清<sup>2</sup>, 沈 杰<sup>2</sup>, 姚道远<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>2</sup>, 阴泽杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

**摘要:**考虑固定传感器网络中固定与移动汇聚节点共存的工作模式,提出了一种数据收集方法。在兼容网络原有固定汇聚节点模式的同时,支持一个到多个移动汇聚节点,移动汇聚节点定期地向其附近小范围内的传感器节点扩散自己的存在信息,传感器节点向离自己跳数最小的汇聚节点发送或者转发数据包。距离移动汇聚节点一跳的传感器节点通过应答-超时重传的方法来保证到移动汇聚节点的数据可靠传输。仿真研究表明:相对于传统固定传感器网络,使用该方法能够大幅度地延长网络寿命(正常流量情况下延长600%以上,大流量情况下延长350%以上);在网络高负载时最高数据传输成功率能达到91%,比节点全静止时提高了8.3倍,最低数据传输延迟仅为46.5 ms,比节点全静止时减小了92%。

**关键词:**无线传感器网络;移动汇聚节点;混合汇聚节点;数据收集

**中图分类号:**TP212.9 **文献标识码:**A

## A data collection method with hybrid sinks in wireless sensor networks

MA Kui<sup>1</sup>, HUANG He-qing<sup>2</sup>, SHEN Jie<sup>2</sup>, YAO Dao-yuan<sup>2</sup>, LIU Hai-tao<sup>2</sup>, YIN Ze-jie<sup>1</sup>

(1. *Department of Modern Physics, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China*)

**Abstract:** A data collection method is proposed to support hybrid sink mode in wireless sensor networks where static and mobile sinks coexist. One or more mobile sinks cooperate with the static sinks to broadcast status update periodically only to a subset of sensor adjacent nodes. Then, the sensor nodes send or transmit data packets to the nearest sink in hop counts. The correct data transmission between the mobile sinks and the last hop sensor node is guaranteed by using ACK-RETRANSMIT method. Simulation result shows that the network lifetime has been improved with the increase of the number of mobile sinks. When the ratio of the mobile sinks to the sensor nodes is above 7.5%, more than 600% lifetime improvement can be achieved. When the load of network is high, the maximum success rate of data transmission reaches to 91%, which has increased by 8.3 times as compared with that of the network in only one static sink, meanwhile, data transmission delay remains at a low level.

**Key words:** wireless sensor network; mobile sink; hybrid sink; data collection

收稿日期:2008-02-13;修订日期:2008-03-06.

基金项目:国家863目标导向类项目(No. 2007AA01Z2A8);中科院知识创新工程重要方向项目(No. KG CX2-YW-110-2)

## 1 引言

无线传感器网络是继 Ad Hoc 网络之后兴起的一个无线自组织网络研究的新方向<sup>[1-2]</sup>。按照节点的移动性来划分,无线传感器网络可以分为固定传感器网络和移动传感器网络。移动传感器网络与固定传感器网络相比具有很大的优势,最近越来越受到研究者的重视<sup>[3-9]</sup>。

当前,大部分移动传感器网络的研究工作只考虑了用移动汇聚节点进行数据收集的情况,存在的主要问题主要有:如果移动汇聚节点通过多跳方式进行数据收集,必须大范围地扩散自身状态更新信息,这势必会带来很大的通信开销,而且由于汇聚节点在不断移动,网络拓扑不断变化,传感器节点到移动汇聚节点的路由很难维护,数据传输成功率得不到保证;如果汇聚节点只从临近节点通过单跳方式收集数据,数据传输延迟太大,不适合某些对数据实时性要求高的应用。如果网络中固定汇聚节点与移动汇聚节点共存,固定汇聚节点的存在可保证网络数据收集的可靠性,移动汇聚节点作为对固定汇聚节点的有益补充加入网络中,可以减小由于传感器节点到固定汇聚节点长距离多跳传输带来的能量开销和传输延迟,延长了网络寿命,提高了整个网络的服务质量。本文采用这种混合汇聚节点工作模式,提出了一种传感器网络数据收集方法。仿真研究表明:采用这种方法,在大幅度延长网络生存时间的同时,数据发送成功率也得到了一定提升,而且数据包平均传输延迟没有因为汇聚节点的移动而显著增大。在数据流量较大的情况下,移动汇聚节点的加入更是增加了整个网络的容量。

## 2 固定和移动汇聚节点混合模式下的数据收集方法

### 2.1 设计思路

在文献[4]中,作者对一个固定汇聚节点位于网络中心位置时的网络负载分布进行了讨论。定义网络中任意传感器节点  $n$  处的平均负载为  $\overline{\text{load}}_n$ ,这里的平均负载指的是处于节点  $n$  探测距离内一小部分节点的负载在一段时间内的平均

值。其分析结果表明,在一个圆形且有一个固定汇聚节点在圆心的场景下,网络中任意传感器节点  $n$  的负载遵循以下关系式:

$$\overline{\text{load}}_n \begin{cases} \approx \frac{\frac{\beta}{2}(R^2 - d^2)\lambda\epsilon}{\frac{\pi}{2}r^2} + \lambda\epsilon & d \geq r \\ = \frac{R^2\lambda\epsilon}{r^2} & d < r \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $R$  为整个网络的半径,  $d$  为节点  $n$  与圆心的距离,  $r$  是汇聚节点通信覆盖半径,  $\lambda$  是传感器节点单位时间内的数据发生率,  $\epsilon$  为节点收发单位数据的能耗,  $\beta = 2\arcsin(r/d)$ , 网络中所有传感器节点均匀分布。当  $d < r$  时,节点负载达到最大值  $\frac{R^2\lambda\epsilon}{r^2}$ , 中心汇聚节点附近节点的负载是全网中最大的,整个网络的生存时间主要取决于这部分节点的生存时间。

向网络中引入移动汇聚节点,一部分目的地是中心固定汇聚节点的数据包被传感器节点附近的移动汇聚节点接收,数据包的平均路径长度减小了,传递一个数据包所使用的平均能耗也就随之减小。在传递相同数据的情况下,存在移动汇聚节点时网络的总能耗和最大负载节点能耗比没有移动汇聚节点时要低,所以网络生存时间得以延长。同时,由于数据包平均路径长度降低,数据传输平均延迟时间减小,网络中数据包发生碰撞的概率降低,整个网络的容量增大。

假设网络中的距离都用跳数来表示,所有节点通信覆盖半径  $r=1$ ,移动汇聚节点影响范围为  $r_{ms}$ ,节点在网络中均匀分布,网络中心有一个固定汇聚节点,并且数据都通过多跳转发。考虑以下情况:

(1)网络中不存在移动汇聚节点时,传感器节点上的最大负载可以表示为:

$$\text{MAX}(\overline{\text{load}}_n)_s = \frac{R^2\lambda\epsilon}{r^2} = R^2\lambda\epsilon. \quad (2)$$

(2)网络中存在一个到多个移动汇聚节点时,在最理想的情况下,所有传感器节点到移动汇聚节点的距离  $d_{sn-ms} \leq r_{ms}$ 。传感器节点上的最大负载可以表示为:

$$\text{MAX}(\overline{\text{load}}_n)_m = \frac{r_{ms}^2\lambda\epsilon}{r^2} = r_{ms}^2\lambda\epsilon. \quad (3)$$

两种情况下节点最大负载比值为:

$$\frac{\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_m}{\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_s} = \frac{r_{ms}^2 \lambda \epsilon}{R^2 \lambda \epsilon} = \frac{r_{ms}^2}{R^2}. \quad (4)$$

假设网络生存时间为网络开始工作到第一个节点失效的时间,节点初始能量都为  $E_0$ ,则存在移动汇聚节点时的网络生存时间  $T_m$  与只有固定汇聚节点时的网络生存时间  $T_s$  比值的最大值可表示为:

$$\text{MAX}\left(\frac{T_m}{T_s}\right) = \frac{E_0/\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_m}{E_0/\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_s} = \frac{\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_s}{\text{MAX}(\overline{\text{load}_n})_m} = \frac{R^2}{r_{ms}^2}. \quad (5)$$

可以发现,网络的生存时间与移动汇聚节点影响范围  $r_{ms}$  的平方成反比,也即单个移动汇聚节点影响范围越小、移动汇聚节点数量越多,网络生存时间越长。在这里考虑协议上的控制开销及移动汇聚节点分布的不均匀性,单从有效数据转发的角度来计算,实际情况中的网络生存时间要小于理论计算值。

以上分析了移动汇聚节点对网络生存时间的影响,除此之外,传感器节点到移动汇聚节点的路由维护协议也是需要重点研究的一个问题。本文采用了类似于文献[10]中讨论的一种路由维护协议:移动汇聚节点只向自己一跳范围内的传感器节点广播位置更新信息,收到更新信息的这一小部分传感器节点负责维护到移动汇聚节点的数据链路以及正确路由。本文的协议与文献[10]中协议的不同点是:文献[10]中负责到移动汇聚节点最后一跳路由的传感器节点是随着移动汇聚节点的位置变化而不断切换的,需要较大的控制协议开销;而本文采用的方法最后一跳节点路由由失效时只需将数据包转发给固定汇聚节点,避免了跟踪移动汇聚节点位置变化而带来的额外开销,同时也避免了因移动带来的链路及路由失效所造成的数据丢失或延迟。

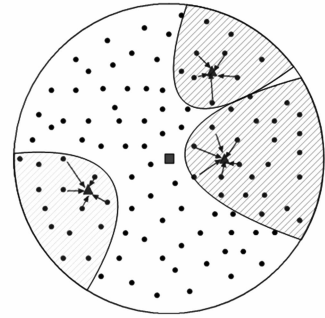
## 2.2 方法描述

### 2.2.1 基本假设

在网络中总共有 3 种类型的节点:传感器节点(Sensor Node, SN)、固定汇聚节点(Static Sink, SS)、移动汇聚节点(Mobile Sink, MS)。

传感数据通过多跳路由从传感器节点传递到汇聚节点。网络拓扑如图 1 所示。这里首先对网络做一些基本假设:

(1)网络中的所有传感器节点是固定的。



▲ Mobile sink ■ Static sink • Sensor node

图 1 网络示意图,阴影部分表示单个移动汇聚节点的数据收集范围

Fig. 1 Network topology, shadowed area indicates the data collection range of a single mobile sink

(2)网络中有一个或多个固定汇聚节点。在不存在移动汇聚节点的情况下,整个网络仅依靠固定汇聚节点就能正常工作。

(3)网络中节点的地理信息不是必需的,节点工作时可以不依靠任何需要地理信息的协议。

(4)汇聚节点(固定、移动)的能量为无穷大或者可以不断补充,而传感器节点携带的能量非常有限。本文只考虑传感器节点的能耗。由于传感器节点花在计算上的能量消耗相对于通信来说是相当小的,因此本文主要考虑传感器节点用于通信上的能耗。

(5)移动汇聚节点采用随机移动模型,其移动速度、运动轨迹及停留时间都不确定而且不能人为控制。汇聚节点不能感知自己的具体位置与移动速度。

### 2.2.2 节点状态及转换

传感器节点在工作过程中按其工作状态分为 3 种类型:

(1)普通工作状态节点(SN):节点上电初始化后就进入该状态,在该状态中节点没有感知到任何与移动汇聚节点有关的信息,只是通过预设的路由协议向固定汇聚节点发送数据。

(2)移动汇聚节点邻近状态节点(Mobile Sink Adjacent, MSA):普通工作状态的传感器节点收到 MS 发出的 HELLO 消息后转变为该状态。在该状态中,MSA 至少能与一个 MS 直接通信。

(3)MSA 感知状态节点(Mobile Sink Adja-

cent Aware,MSAA):普通工作状态的传感器节点收到MSA发送的MSA声明消息(MSA Announcement,MSA\_ANNOUNCE)后切换到该状态。在该状态中,节点能够通过多跳将数据包转发给MSA,再由MSA发送到MS。

网络中每个SN都维护一个汇聚节点列表(Sink Table)和一个MSA列表(MSA Table):Sink Table中保存着节点已知的所有汇聚节点的信息,例如ID、类型、上一跳节点ID、自己到汇聚节点的跳数等;MSA Table中保存节点已知的MSA的信息,其中包括ID、上一跳节点ID和距MSA跳数HopCount。每个SN都处理6种类型的控制消息:SS自声明消息(SS\_ANNOUNCE)、MS发出的HELLO消息(MS\_HELLO)、MSA自声明消息(MSA\_ANNOUNCE)、MSA删除消息(MSA\_DELETE)、MSA无效消息(MSA\_INVALID)和MS数据应答消息(MS\_DATA\_ACK)。

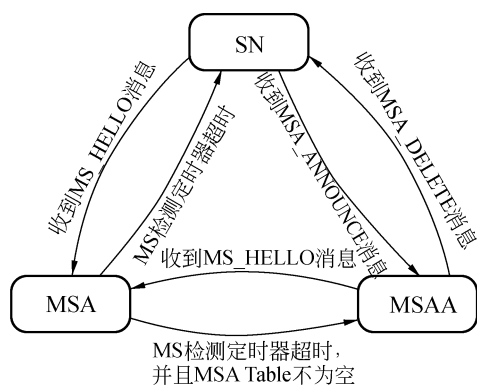


图2 传感器节点状态转换

Fig. 2 Status switching of sensor nodes

### 2.2.3 实现过程

本方法的实现过程主要分为3个部分:

(1)节点上电初始化。网络中全部传感器节点通过扩散SS\_ANNOUNCE消息来建立到固定汇聚节点的距离梯度。

(2)传感器节点建立到固定汇聚节点的路由并开始上报传感数据。传感器节点到固定汇聚节点的路由协议可以采用现有的任何传感器网络相关路由协议,例如AODV、DSR或者地理位置路由等。

(3)移动汇聚节点广播其存在信息。周围小范围内的传感器节点通过交互移动汇聚节点相关

信息来动态维护自己的上行数据路由。这个过程可以细分为以下几个部分:

①MS向邻近节点广播HELLO消息MS\_HELLO。传感器节点接收到MS\_HELLO消息后将该MS加入自己的Sink Table,如果自己不是MSA就向周围节点广播MSA声明消息MSA\_ANNOUNCE。为了将MSA的影响范围控制在一个较小的区域内,必须限制MSA\_ANNOUNCE消息的传播跳数,这可以通过在消息中加入一个TTL域来实现。MSA为TTL域赋予一个较小的初始值,MSA\_ANNOUNCE消息每传播1跳,TTL域的值就减1,当TTL值减到0时节点就扔掉该消息。最后,节点启动MS检测定时器。如果定时器超时,说明MS已经移动到自己的通信范围之外,应该从Sink Table中删除该MS并检查Sink Table是否为空,如果为空,就向周围节点广播MSA删除消息MSA\_DELETE。如果节点在定时器超时前再次收到同一MS的MS\_HELLO,就取消旧的定时器并重新启动一个新定时器。

②接收到MSA\_DELETE消息的传感器节点在自己的MSA Table中查找此MSA。如果找到,就删除该MSA并广播转发MSA\_DELETE消息;如果MSA Table中无此MSA就直接丢弃该消息。

③传感器节点接收到MSA\_ANNOUNCE消息后,查询自己的MSA Table。如果该MSA已经在MSA Table中,则直接丢弃该消息;如果列表中不存在此MSA就将其加入,并将列表项的LastHop及HopCount域设置为消息中的LastHop及HopCount+1。列表项新建完毕后节点将原消息的TTL值减1,LastHop域更新为自己的ID,HopCount域更新为HopCount+1。然后向周围节点广播转发更新后的MSA\_ANNOUNCE。

④传感器节点产生传感数据包后,查找自己MSA列表中HopCount最小的一个MSA。如果没有找到,就给数据包设置PTSS(Packet to SS)标记并交由SS的默认路由协议处理;如果找到且其HopCount≤Sink Table中所有SS的HopCount,就给数据包做上PTMS(Packet to MS)标

记并转发到该 MSA 表项 LastHop 域指向的节点。

⑤传感器节点接收到上行数据包,查找自己 MSA 列表中 HopCount 最小的一个 MSA,如果找到且其 HopCount  $\leq$  Sink Table 中所有 SS 的 HopCount,就为数据包设置 PTMS 标记并转发到该 MSA 表项的 LastHop 域指向的节点。这样,通过多跳转发,数据包能够到达 MSA,并由 MSA 发送到 MS;如果节点收到上行数据包时发现自己的 MSA 列表为空且数据包中 PTMS 标记被设置,则向数据包的上一跳节点发送 MSA\_INVALID 消息,声明自己已经不能和任何 MSA 建立联系,然后给数据包设置 PTSS(Packet to SS) 标记并交由到 SS 的默认路由协议处理。

⑥接收到 MSA\_INVALID 消息的节点查找自己的 MSA 列表,删除所有 LastHop 域为此消息发送者 ID 的表项。

⑦MSA 收到上行数据包,启动一个寻路过程。如果附近有 MS,就缓存数据包并将其发送到该 MS,同时启动 ACK 接收定时器;如果附近没有 MS,就将数据包路由到最近的 SS。MS 收到数据后应该在 MSA 的 ACK 接收定时器设定的超时时间内发送一个应答 MS\_DATA\_ACK,MSA 收到 MS\_DATA\_ACK 后将缓存中的数据包删除。如果 MSA 在定时器超时还没有收到应答,就认为该数据已经丢失,重新启动寻路过程。

## 3 仿真研究

### 3.1 仿真平台

网络仿真工具使用 Qualnet 4.0,其基于 C/C++ ,具有严格的分层架构,与其它仿真软件相比具有更快的仿真速度。

仿真场景是一个  $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$  的正方形区域,400 个传感器节点均匀分布在其中,场景的中心位置放置一个固定汇聚节点。物理层采用 Abstract PHY,双径模型,理想无衰落信道,节点通信半径设定为 80 m。MAC 层采用 CSMA 协议。传感器节点到固定汇聚节点使用 AODV 路由协议。移动汇聚节点采用 Random Waypoint 移动模式,在目的点上停留时间为 0 s,每个分段

中的移动速度在  $1 \sim 5\ \text{m/s}$  随机选取。

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 正常数据流量情况下

实验中所有节点物理层传输数据率均设置为  $1\ \text{Mb/s}$ ,每个传感器节点平均 10 s 产生一个长度为 256 Bytes 的数据包。MSA\_ANNOUNCE 扩散半径为一跳。MS 数量为  $0 \sim 30$ ,每增加 5 个 MS 进行一次实验,单次仿真时间为  $10\ 000\ \text{s}$ ,5 轮实验数据做平均得到最后的结果。

(1)网络生存时间的仿真结果如图 3 所示。节点平均收发能耗随着 MS 数量的增加而递减,从 0 个 MS 时的  $5.8\ \text{J}$  减小到 30 个 MS 时候的  $2.66\ \text{J}$ ;节点的最大收发能耗从  $30.68\ \text{J}$  减小到  $4.18\ \text{J}$ ,减少了 86%。如果定义网络生存时间为从网络开始运行到第一个节点失效的时间,加入 30 个 MS 后,网络生存时间比没有 MS 时增加了 634%。可见,MS 的加入使得节点负载分布变得更均匀,同时也减小了单节点的能耗,特别是网络中心部分节点的能耗,使得网络生存时间延长。

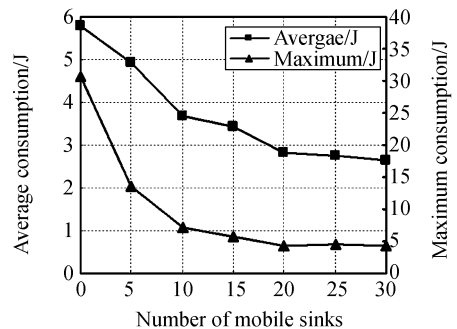


图 3 节点平均/最大能耗

Fig. 3 Average/maximum energy consumptions

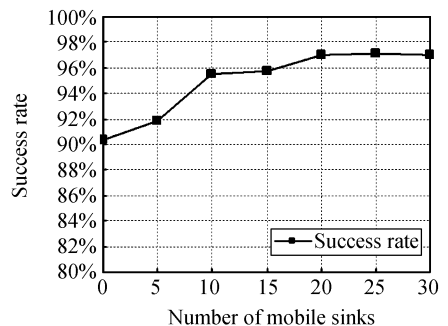


图 4 数据传输成功率

Fig. 4 Success rate of data transmission

(2)数据传输成功率的仿真结果如图4所示。当网络中不存在移动汇聚节点时,节点分布不均匀造成的路由寻路错误和靠近网络中心部分流量增大而产生的数据碰撞丢失,使得数据传输成功率只有90%左右。当加入移动汇聚节点后,数据传输成功率从0个移动汇聚节点时的90%提高到30个移动汇聚节点时的97%。

(3)数据平均传输延迟由图5可以看出。5个MS加入后,数据平均传输延迟比只有SS时增加了5ms左右,为19.5ms。在MS节点数量从5个增加到20个的过程中,数据平均传输延迟基本没有变化。当MS数量超过20时,数据平均传输延迟开始逐渐减小,到30个MS时,传输延迟为16.8ms。造成这个变化过程的主要原因是:当MS数目比较少时,单个MS上承载的数据流量较大,使得其附近的数据包碰撞重传几率增加,同时MS移动也会带来一部分数据包因传递错误而重传,从而网络的平均延迟增大;当MS数量较多时,每个MS上承载的数据流量较小,数据包碰撞重传的几率也随之变小,所以传输延迟减小。

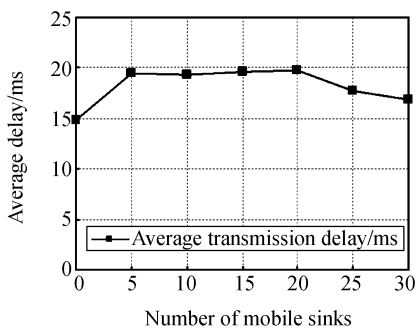


图5 数据包平均传输延迟

Fig. 5 Average data transmission delay

### 3.2.2 大数据流量情况下

实验中所有节点物理层传输速率设置为512 kbit/s,每个传感器节点平均每2s产生一个长度为256 Bytes的数据包。MSA\_ANNOUNCE扩散半径为一跳。MS数量为0~30,每增加5个MS进行一次实验,单次仿真时间5000s,5轮实验数据做平均得到最后的结果。

(1)数据传输成功率和平均延迟。根据仿真设置,网络中所有传感器节点每秒平均产生 $256 \times 0.5 \times 400 \times 8 = 400$  kbits的数据。仿真结果如图6所示,当网络中只存在SS的时候,由于SS

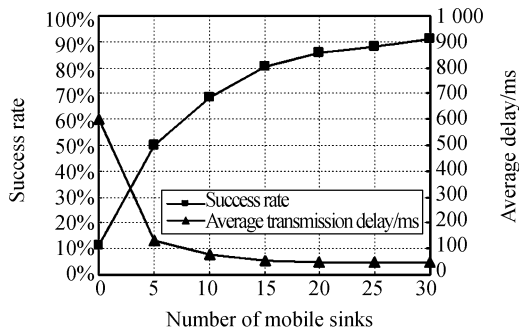


图6 数据传输成功率及平均传输延迟

Fig. 6 Success rate of data transmission and average data transmission delay

周围节点承载的数据流量太大,数据包碰撞频繁,导致传输成功率只有11%左右,而且平均传输延迟达到600ms。加入5个MS之后,传输成功率增加到了50%,平均传输延迟减小到130ms。随着MS数量不断增加,传输成功率呈缓慢上升趋势,平均传输延迟则缓慢下降。到30个MS时,传输成功率达到了91%,平均传输延迟减小到46.5ms。仿真结果说明:在大数据流量的时候,MS的加入使得网络流量被平均分配,SS附近节点的瓶颈效应得以缓解,大幅度提升了整个网络的容量。

(2)网络生存时间。和正常流量情况下类似,网络节点最大能耗随着MS数量的增加而减小,如图7所示。加入30个MS时的网络生存时间比只有SS时增加了376%。

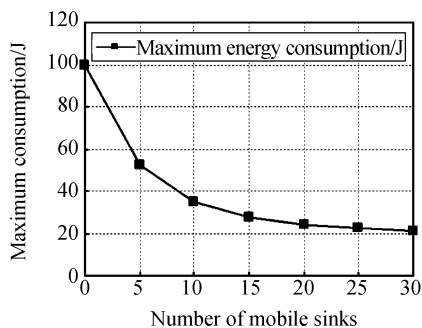


图7 节点最大能耗

Fig. 7 Maximum energy consumption

## 4 结论

本文提出了一种结合固定与移动汇聚节点

的无线传感器网络数据收集方法。仿真实验证明,相对于传统固定传感器网络,该方法能够大幅度延长网络寿命(正常流量情况下延长 600%以上,大流量情况下延长 350%以上),在网络高负载时最高数据传输成功率能达到 91%,比只存在一个固定汇聚节点时提高了 8.3 倍,最低数据传输延迟仅为 46.5 ms,比只存在一个固定汇聚节点时减小了 92%。本方法在网络只存在固定汇

聚节点和固定移动汇聚节点共存的情况下都能很好地工作,灵活性和可扩展性较强。

现阶段还没有考虑传感器节点的睡眠问题,由于传感器节点大部分能量都消耗在空闲侦听上,要进一步延长网络生存时间就必须引入一种合理的睡眠机制。移动汇聚节点如何和具有睡眠功能的传感器节点交互协作是下一步要研究的主要问题。

## 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.*. A survey on sensor networks[J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2002, 40(8):102-114.
- [2] 沈杰, 姚道远, 黄河清, 等. 野外地表无线传感网信道传播模型的测定与分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):141-149.  
SHEN J, YAO D Y, HUANG H Q, *et al.*. Measurement and analysis of radio channel model for near-ground wireless sensor network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):141-149. (in Chinese)
- [3] SHEN R C, ROY S, JAIN S, *et al.*. Data MULEs: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks[J]. *Ad. Hoc. Networks*, 2003, 1(2/3):215-233.
- [4] JUN L, HUBAUX J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[C]. *INFOCOM 2005, 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Proceedings IEEE*, 2005:1735-1746.
- [5] CHAKRABARTI A, SABHARWAL A, AAZHANG B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks[C]. *Information Processing in Sensor Networks: Second International Workshop, Ipsn 2003, Proceedings, Palo Alto, Ca, Usa*, 2003:129-145.
- [6] TONG L, ZHAO Q, ADIREDDY S. Sensor networks with mobile agents[C]. *Proc. IEEE MILCOM'03, Boston, MA*, 2003:688-693.
- [7] KANSAL A, RAHIMI M, ESTRIN D, *et al.*. Controlled mobility for sustainable wireless sensor networks[C]. *IEEE SECON*, 2004:1-6.
- [8] GANDHAM S R, DAWANDE M, PRAKASH R. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations[C]. *GLOBECOM '03, IEEE*, 2003:377-381.
- [9] KANSAL A, SOMASUNDARA A, JEA D, *et al.*. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks[C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Boston, MA, USA: ACM*, 2004:111-124.
- [10] QING H, YONG B, LAN C. An efficient route maintenance scheme for wireless sensor network with mobile sink [C]. *Vehicular Technology Conference, 2007, VTC2007-Spring, IEEE 65th*, 2007:155-159.

作者简介:马奎(1979—),男,湖南湘潭人,博士,主要从事无线传感器网络的研究。E-mail: makui@ustc.edu