

## 延迟容忍传感器网络基于相对距离的数据传输\*

许富龙<sup>1</sup>, 刘明<sup>1</sup>, 龚海刚<sup>1</sup>, 陈贵海<sup>2</sup>, 李建平<sup>1+</sup>, 朱金奇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 610054)

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

### Relative Distance-Aware Data Delivery Scheme for Delay Tolerant Mobile Sensor Networks

XU Fu-Long<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>, GONG Hai-Gang<sup>1</sup>, CHEN Gui-Hai<sup>2</sup>, LI Jian-Ping<sup>1+</sup>, ZHU Jin-Qi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

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

+ Corresponding author: E-mail: jpli2222@uestc.edu.cn

**Xu FL, Liu M, Gong HG, Chen GH, Li JP, Zhu JQ. Relative distance-aware data delivery scheme for delay tolerant mobile sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(3):490–504. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3459.htm>**

**Abstract:** The delay tolerant mobile sensor network (DTMSN) is a type of sensor network used for pervasive information gathering. DTMSN distinguishes itself from conventional sensor networks by several unique characteristics such as sensor mobility, loose connectivity, and delay tolerability. Therefore, traditional data gathering methods cannot be applied. In this paper, a novel data gathering method named relative distance-aware data delivery scheme (RDAD) is proposed. RDAD introduces a simple non-GPS method with small overhead to gain the relative distance from a node to sink and then to calculate the node delivery probability which gives a guidance to message transmission. RDAD also employs the message survival time and message maximal replication to decide message's transmission and dropping for minimizing transmission overhead. Simulation results have shown that the proposed RDAD data delivery scheme does not only achieve a relatively long network lifetime but also get the higher message delivery ratio with lower transmission overhead and data delivery delay than other DTMSN data delivering approaches.

**Key words:** DTMSN (delay tolerant mobile sensor network); data gathering; dynamic data delivery; selective replication; queue management

**摘要:** 延迟容忍移动无线传感器网络(delay tolerant mobile sensor network,简称 DTMSN)用于广泛数据收集.与传统的传感器网络不同,DTMSN 具有节点移动性、间歇连通性并且能够容忍适当的延迟,因此传统传感器网络的数据收集算法不能适用.提出了一种基于相对距离感知的动态数据传输策略 RDAD(relative distance-aware data

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60703114, 60673154, 60903158 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA01Z443 (国家高技术研究发展计划(863)); the Young Teacher Foundation of UESTC under Grant Nos.L08010601JX0746, L08010601JX0747 (电子科技大学青年基金)

Received 2008-03-25; Revised 2008-05-19; Accepted 2008-08-11

delivery scheme).RDAD 采用传感器节点到汇聚点(sink node)的相对距离来计算节点传输概率的大小,并以此作为消息(message)传输时选择下一跳的依据.为优化副本管理,RDAD 引入消息的生存时间 ST(survival time)和消息最大复制数 MR(maximal replication)决定队列中消息传递的优先顺序和丢弃原则.模拟实验表明,与现有的几种 DTMSN 数据传输算法相比,RDAD 能够以较低的数据传输能耗和传输延迟获得较高的数据传输成功率,并且具有相对较长的网络寿命.

**关键词:** 延迟容忍移动无线传感器网络;数据收集;动态数据传输;选择复制;队列管理

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

近年来,传感器技术、嵌入式技术以及电子技术的进步使得微型的、短距离无线传输的传感器在低功耗、低能量、多功能方面得到迅猛的发展.传感器具有感应、无线通信和信息处理能力.无线传感器网络是由一定数量的传感器节点构成的自组织分布式网络系统,其中传感器节点按照一定密度部署在需要监测的地区.数据收集是大多数无线传感器网络应用的基本功能<sup>[1]</sup>.在已有的传感器网络数据收集技术的研究中,大多假设传感器节点在部署之后,整个网络是连通的,即任意网络节点都能在网络拓扑中找到一条通往数据汇聚点(sink node)的路径<sup>[2]</sup>.然而,这种数据收集方法在某些情形下并不适用.例如,生物研究中收集野生动物生活习性数据的过程;空气质量监测中记录和收集每人平均每天吸入的有害气体数量的过程等.与一般应用相比,为了进行有效的数据信息采集,这些应用中需要把传感器节点附着在运动物体(人类或者动物)上,而物体的随机运动可能导致传感器节点之间的非连通性.

为了满足上述应用需求,出现了延迟容忍移动无线传感器网络(delay tolerant mobile sensor network,简称 DTMSN)<sup>[3]</sup>.在 DTMSN 中,传感器节点绑定在运动物体上,用来收集数据信息并形成了一个间歇连通的移动传感器网络;汇聚点放置在特定位置或被某些运动物体携带,用来收集传感器中的数据,并把这些数据转递到骨干网络的入口点.虽然 DTMSN 网络在硬件上与传统传感器网络相似,但由于节点移动,网络的拓扑结构随时间的不同而变化,因此影响到网络的连通性.并且,移动无线传感器网络中的节点数量一般受到目标数量的限制(如野生动物监测中,附着节点的动物是有限的),故其节点密度远小于传统的静态网络,造成网络连通性的进一步恶化.在这样的间歇连通网络中,节点有可能在很长一段时间内才能找到它的下一跳节点,因此传统静态传感器网络的数据传输策略在 DTMSN 环境下并不适用.在 DTMSN 的间歇连通环境中,为了达到一定的数据传输成功率,进行数据的复制(replication)是必要的,而且复制也必将增大系统的传输能耗.如何以尽量低的数据传输能耗和传输延迟来达到尽可能高的数据传输成功率,实现传输成功率、网络开销以及传输延迟之间的平衡,就成了 DTMSN 要解决的首要问题.

目前已有一些学者对 DTMSN 的数据传输策略进行了研究<sup>[4]</sup>.这些研究中,直接传递(direct transmission)策略使节点只与汇聚点发生消息传递,因此消息传递延迟非常大,并且当节点的消息队列较短时,消息溢出导致提交率不高.泛洪(flooding)策略与直接传递相反,将消息传递给所有相遇节点,虽然能够获得较短传输延迟,但毫无选择地盲目复制使传输能耗巨大,严重影响网络寿命.FAD(fault tolerance-based adaptive data delivery)策略依据节点传输概率有选择地复制消息,但对节点传输概率值的计算基于此前消息传输的历史记录,这在 DTMSN 节点稀疏的间歇连通环境中不够合理,因此影响节点传输概率的准确性.

本文提出一种基于相对距离感知的动态数据传输策略 RDAD(relative distance-aware data delivery scheme),不同于以前的研究工作,RDAD 采用一种简单的基于汇聚点广播的方法,使各个节点感知自身到汇聚点的距离,并依此来计算传输概率(nodal delivery probability)值.节点传输概率即传感器节点把消息传递给汇聚点的可能性,它是消息传递时选择下一跳的重要依据.为了有效管理消息副本,RDAD 引入消息的生存时间 ST(survival time)和消息的最大复制数量 MR(maximal replication)来决定消息的重要程度和丢弃原则.仿真模拟实验表明,本文提出的基于汇聚点广播感知相对距离的方法,在不增加硬件的情况下,能够以较小的网络开销取得类似 GPS 的效果.此外,与现有的直接传递算法、泛洪算法、FAD 策略相比,RDAD 能以较低的数据传输能耗和传输延迟获得较高的数据传输成功率以及较长的网络寿命.

本文第 1 节对相关工作进行说明,第 2 节对本文的动因以及采用的运动模型进行描述,第 3 节给出 RDAD 的详细设计,第 4 节进行模拟验证,最后总结全文。

## 1 相关工作

延迟容忍网络 DTN(delay tolerant network)<sup>[5]</sup>用于间歇连通的网路传送数据,文献[6]给出了 DTN 的总体结构,作为网路互联时传输层上的覆盖网,它提供了数据存储和重传、经过鉴别的数据传输等服务,DTN 技术近几年被引入无线传感器网路,并且根据节点移动性的不同,可以把延迟容忍传感器网路 DTSN(delay tolerant sensor networks)分为传感器节点静止的网路和节点随机运动的传感器网路 DTMSN。

(1) 在静止 DTSN 网路中,所有传感器节点和汇聚点全部固定不动,由于传感器节点传输距离有限并且电池能量低,各个节点之间松散地连接在一起并且传感器节点由于电量耗尽脱离网路成为孤立节点的现象时有发生,文献[7]是静态 DTSN 具体应用的一个实例,作者采用传感器网路来监控人类的生活环境,文献[8]则运用传感器网路对湖水质量进行定期监测,为了保存电池能量,需要定期关闭一些传感器节点,因此就形成了一个间歇连接的 DTSN 结构。

此外,可以在静止的 DTSN 网路中增加一些易管理的移动节点,以此来改善网路的连通性,例如 data mule 方法<sup>[9]</sup>用来聚集传感器数量稀少的网路中每个传感器节点采集到的数据信息,它通过移动的 data mule 实体定期收集各个节点采集到的数据并提供交互式的信息存储转发服务,与静态的 DTSN 相比,移动节点的加入更加节省传感器的能量。

(2) 目前已有一些文献对 DTMSN 的数据传输进行了研究,其中最基本的数据传输策略称为直接传递(direct transmission)<sup>[10]</sup>,基本思想是传感器节点只与汇聚点发生通信,只有当传感器节点运动到汇聚点的通信范围内时才进行消息传输,显然这种策略的传输能耗非常低,并且消息传输延迟主要取决于各个传感器节点和汇聚点之间的通信频率,通信频率越低,消息的传输延迟就越大,由于 DTMSN 中传感器节点和汇聚点间的通信频率通常较低,因此该算法的传输延迟大并且数据传输成功率也较低。

与直接传递方法相反,另一种基本的数据收集策略称为泛洪策略<sup>[11]</sup>,即令每个传感器节点把消息复制给它通信范围内的所有节点,目的是让网路中尽可能多的节点包含此消息的复本,最终把消息传输给汇聚点,节点存储队列的大小和队列满后的丢包策略对此算法的性能影响很大,若存储队列足够大,这种算法能以消耗大量传感器能量为代价获得较高的数据传输成功率,然而,由于传感器节点的存储队列有限,致使这种算法丢包现象严重,性能较差。

文献[12]中,ZebraNet 使用移动传感器监测斑马的生活习性,作者采用历史记录进行路由:每个传感器节点均保存它把数据包直接成功转发给汇聚点的历史级别,当一个传感器节点和另一个传感器节点相遇后,只有前者的历史级别小于后者时,两者才发生数据传输,然而这种简单的策略并不能保证所需的数据传输成功率,采用此算法的数据传输成功率仍然较低。

文献[13]讨论了采用 SWIM 系统收集鲸的生物信息的场景,SWIM 认为传感器的随机移动性导致所有的传感器节点和汇聚点相遇的概率均相同,为了获得所需的数据传输成功率,传感器节点只需向网路中分发满足一定数量的数据包的复本即可,然而实际应用中,各个传感器节点和汇聚点相遇的概率并不相等,致使 SWIM 工作效率低下。

在文献[14]中,作者提出 RED 策略解决 DTMSN 的数据传输问题,它对传输概率的计算采用了改进的基于历史记录的方法,每当发生消息传输时,就增加节点的传输概率,若一段时间内没有发生消息通信,则适当减小传输概率的值,然而,在 DTMSN 节点较稀疏的间歇连通的网路环境下,节点可能在较长时间内才能遇到传输概率更高的节点,因此,RED 传输概率的计算方法不能真实反映节点当前的向汇聚点传输消息的实际能力;此外,在 RED 中用于提高传输成功率的最佳容错编码参数的计算值也不准确<sup>[10]</sup>,而且在网路中传输大量小的分片消息进一步加剧了网路的传输能耗。

为了达到数据传输成功率和数据传输延迟/能耗的平衡,Wang 等人还提出了 FAD 策略<sup>[15,16]</sup>,FAD 在采用了

与 RED 相同的传输概率计算方法的同时,根据每个消息的错误容忍(fault tolerance)值进行消息队列的管理.如前所述,FAD 采用的这种传输概率方法不准确.另外,FAD 策略忽略了消息的存活时间,因此有可能出现某些传输延迟已经超过了网络延迟容忍限度的消息继续存留于网络中消耗网络带宽和能量的现象.

文献[17]中,作者提出一种计算节点传输概率的方法:统计节点一段时间内的运动模式,并结合节点当前的剩余能量,来共同预测节点将消息传递给汇聚点的可能性.虽然考虑节点的剩余能量具有合理性,但采用基于运动统计的方法会对性能造成影响.

## 2 网络模型和问题描述

### 2.1 网络模型

本文假设初始状态时, $N$  个传感器节点随机分布在一个  $M \times M$  的二维正方形区域  $A$  内. $K$  个汇聚点也部署在区域  $A$ .所有传感器节点和汇聚点的消息传输半径均为  $R$ .此外,假设该传感器网络具有如下性质:

- 所有传感器节点的运动规律符合 Random Waypoint 运动模型.Random Waypoint 运动模型描述为:传感器节点在运动空间  $A$  内随机取起始点  $S$  和目的点  $D$ ,随机选取  $V$  属于  $(V_{min}, V_{max})$  作为此次运动的速度,匀速从  $S$  沿直线运动到  $D$ ,在  $D$  随机选取一个时间  $T_{pause}$  属于  $(T_{min}, T_{max})$  保持静止,这样完成一次运动过程,将本次的目的点  $D$  作为下次运动的起始点  $S$ ,进行下一次运动过程,如此重复.网络中所有传感器节点均遵循上述运动过程,它们之间相互独立.节点的运动过程如图 1 所示.

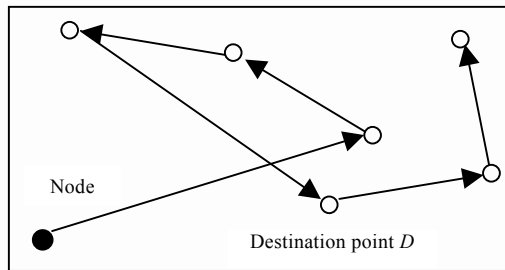


Fig.1 Traveling pattern of a moving node using the Random Waypoint mobility model  
图 1 采用 Random Waypoint 运动模型的节点运动模式

- 汇聚点以基站或车载形式出现,因此视作有无限能量;汇聚点数量可以不唯一;汇聚点位置可以移动或随机确定.

- 汇聚点的无线发射功率可控,即汇聚点可以根据需要调整其发射功率.

模型第 1 项属性规定了节点的移动特性,Waypoint 作为一种典型的网络运动模型,在无线移动网络研究中被广泛应用<sup>[18]</sup>.第 2 项属性假设汇聚点能量无限且数量可以不唯一,它更接近网络的真实部署情况.关于汇聚点具有可控的无线发射功率等级的假设,使得当汇聚点以很高的发射功率等级工作时,发送半径远大于普通节点间数据传输半径,可以覆盖较大区域.

### 2.2 问题描述

与传统传感器网络相比,DTMSN 具有如下特性:1) 节点的随机移动性.由于传感器节点或汇聚点附着在随机运动的物体身上,因此网络的拓扑是动态的;2) 间歇的连通性.网络拓扑结构动态变化导致网络的间歇连通性,并且由于应用限制,DTMSN 中的节点密度远小于传统静态网络,使得网络连通性更加恶化;3) 延迟容忍.由于传感器节点间的间歇连通性,DTMSN 中数据的传输延迟往往较高,因此应用要能够容忍较高的数据延迟.

为了满足上述特性,一个有效 DTMSN 数据传输策略的数据复制必须是有选择的,即数据消息应传递给在下一时刻最有可能接近汇聚点(最有可能与汇聚点通信)的邻居传感器节点.此外,由于缺少节点到汇聚点的连通路路径,传感器节点的数据消息在被传输到其他传感器节点或汇聚点之前都要在队列中存放相当长的时间,而

节点的存储空间是有限的,因此需要恰当的队列管理策略对队列消息进行管理.

在目前对 DTMSN 传输算法的研究中,已有工作并不能很好地满足以上要求.例如,直接传输和泛洪作为两种基本策略,均不适合实际应用;而文献[15,16]提出的基于节点间消息传递来计算传输概率的方法也会对性能造成影响.考虑到 DTMSN 中节点移动导致的网络拓扑快速变化,节点当前向汇聚点传输消息的实际能力,更多地取决于短时期内自身距离汇聚点的远近程度.通常在无线移动网络中为获取位置信息,大多依赖于外部基础设施(如 GPS、有向天线).然而文献[19]表明,在传感器节点中嵌入 GPS 或有向天线等,不仅成本相对较高,而且需要消耗极大的能量,同时还会存在一些准确定位的问题.

基于上述分析,本文提出了一种同时满足上述两种要求的动态数据传输策略 RDAD.在下一节里,我们将对 RDAD 策略进行具体描述.

### 3 RDAD 策略的设计实现

#### 3.1 数据传输

数据消息的传输以节点的传输概率值作为依据.为计算节点的传输概率,汇聚点周期性地(例如:5 秒一次)以大发射功率等级发出广播消息,该消息内容很少,只包含特定标志位信息,因此发送时间很短,对整个网络的通信干扰以及节点的能量消耗影响很小.第 5 节的模拟实验中将对对此展开讨论.由于消息是以较高功率等级发射,网络中特定区域的所有传感器节点都将收到此广播消息,如图 2 所示,黑色较大的点为汇聚节点,其余均为传感器节点,虚线圆表示汇聚点广播的覆盖范围.一旦传感器节点接收到广播消息,它将记录其信号强度.根据信号传播衰减可知,距离汇聚点越近的节点,其接收到的信号强度越大,反之则越小.因此,不断接收到的广播信号强度可以用来表征最近一段时间内节点到汇聚点距离的变化.

令  $P_i$  表示传感器节点  $i$  的传输概率.假设节点  $i$  总记录最近  $n$  次的广播信号强度,分别用  $S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, \dots, S_{in}$  表示,其中  $S_{i1}$  表示最近  $n$  次广播中最早那次的信号强度,  $S_{in}$  则表示最近一次的信号强度.设与汇聚点能够直接进行消息通信的最大半径  $R$  处的广播信号强度为  $SR$ .一种简单的  $P_i$  计算方法是:先计算  $n$  个信号强度的加权平均值,再除以  $SR$ .对应公式为

$$P_i = \begin{cases} \frac{\alpha_1 S_{i1} + \alpha_2 S_{i2} + \alpha_3 S_{i3} + \dots + \alpha_n S_{in}}{(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) \times SR}, & \text{当 } \frac{\alpha_1 S_{i1} + \alpha_2 S_{i2} + \alpha_3 S_{i3} + \dots + \alpha_n S_{in}}{(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) \times SR} < 1 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  代表信号权值,分别表示最近  $n$  次信号强度对  $P_i$  值的影响程度.在模拟实验中,我们设置  $n=5$ ,并且  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  分别取值 1,2,3,4,5.这样的取值不仅反映了节点此前一段时间的运动状况,同时突出了节点当前位置对  $P_i$  值的影响,例如当节点远离汇聚点时,  $P_i$  值能较迅速变小.由式(1)可以看出,当节点  $i$  在一段时间内多次接近汇聚点,或者始终在汇聚点附近徘徊,它的  $P_i$  值将变大,表明它有更大的可能性将消息传递给汇聚点;若节点始终活跃在远离汇聚点的区域,  $P_i$  值将非常小.

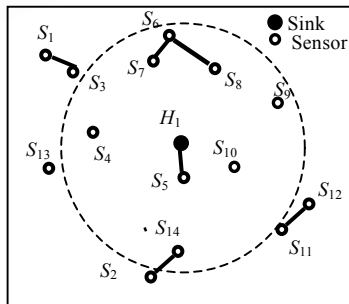


Fig.2 Illustration of sink broadcasting with high-level power  
图 2 汇聚点大功率广播示意图

数据消息的传输根据传输概率进行.同样考虑节点  $i$ ,假设  $i$  的存储队列头部有一个消息  $j$  正等待传输,并且假设目前  $i$  的通信范围内有  $Z'$  其他传感器节点,令  $\Sigma=\{\Psi_z|1\leq z\leq Z'\}$  代表这  $Z'$  个传感器节点的集合.节点  $i$  首先与这  $Z'$  个节点通过简单的握手消息分别了解它们此刻各自的传输概率值,然后对于所有满足  $P_{\Psi_z}>P_i$  的子节点  $\Psi_z$ ,节点  $i$  会根据它们的传输概率值的大小,按照先大后小降序地将消息  $j$  依次复制给这些子节点.具体算法如图 3 所示.

显然,上述算法会导致一个消息产生多个复本,下面将要介绍的队列管理机制会对这些消息复本进行管理,控制消息复本数目,减少能耗.

```

Φ=0
for z=1; z<=Z' ; z++ do // identify receiving sensors
    if P_i < P_Ψz then
        Φ=Φ∪Ψz
    end if
end for
for n=1; n<= |Φ|; n++ do // |Φ| represents the number of nodes in Φ
    forwardmessage(j, Φ_n) // Φ_n for all n∈[1,|Φ|] are sorted by decreasing order of p_Φ_n
end for
    
```

Fig.3 Pseudo-Code of the routing algorithm

图 3 路由算法伪码

### 3.2 队列管理机制

DTMSN 是一个存储转发网络,在典型的存储转发网络中,当消息被成功转发到下一跳节点后,就把消息从原节点存储队列中删除掉.然而,在 DTMSN 的动态数据传输环境中,当消息被转发到其他传感器节点后,本传感器节点仍会保存此消息的复本.因此,网络中会存在大量的冗余数据消息.队列管理的目的就是恰当地分类存储队列中的消息,以便决定当某个传感器节点遇到其他传感器节点时,队列中各个消息传递的优先顺序以及消息的丢弃原则.队列管理对于网络传输效率和传输延迟的影响非常大.本文引入消息的生存时间和消息最大复制数来管理队列.

消息生存时间  $ST$  即消息在网络中的存活时间.生存时间越长的消息,越有可能在网络中存在较多的复本,已被汇聚节点接收的可能性也越大.因此我们运用生存时间表示网络中各个消息的冗余程度和重要性.为了计算消息的生存时间,首先假设每个消息的头部均包含一个域,存放消息的生存时间值.当消息初次产生时,此消息的生存时间被初始化为 0.在每个传感器节点中均有一个本地计时器,每当计时器超时,节点消息队列中所有消息的生存时间值将被增加.由于消息传输距离非常短,我们可以假设消息的传输时间忽略不计,因此,当消息在节点间传递时,接收方节点不更改接收消息的生存时间域,直接把消息插入本地存储队列.对刚发送完又重新放回队列的消息,其生存时间域同样不会被更改.

消息的最大复制数  $MR$  是指消息在某节点中能够被转发给其他节点的最大次数. $MR$  值的确定,是节点根据自身当前能力(即节点自身能够成功传递消息至汇聚点的概率),为使消息能够以一个较大概率被汇聚点成功接收,而对消息所需转发次数的预评估计算.每当新消息产生,或者当消息被复制到一个新节点,节点在接纳这个消息的同时,计算最大复制数并写入对应消息域.当节点运动过程中碰到合适的下一跳节点,在把消息复制给下一跳后,重新放回的消息的  $MR$  将被减 1,若  $MR$  被减为 0,则消息将被节点删除.由于  $MR$  规定了消息能被节点复制的最大数量,因此若节点  $i$  具有多个邻居节点,且这些邻居中满足发送条件(即节点的消息传输概率大于  $P_i$ )的节点个数大于待发送消息的  $MR$  值,消息将只被复制给传输概率最大的  $MR$  个邻居节点.

不失一般性,我们考虑传感器节点  $i$  当前正接收到一个新的消息  $j$ .因为队列满以及传输冲突等原因造成的丢包概率很低,为了简化问题分析,我们忽略这些因素造成的影响.由于  $P_i$  表示节点  $i$  当前能够传递消息给汇聚点的概率,因此若节点  $i$  转发消息  $j$  的  $m$  个复本,而这些复本中至少 1 个被汇聚点成功接收的概率可表示为

$$1-(1-P_i)^m \tag{2}$$

设消息  $j$  被汇聚点接收的概率达到某一阈值  $\gamma$  (通常可取 0.8 或 0.9), 那么节点  $i$  所需转发的消息  $j$  的复本数  $m$  至少应为

$$m = \begin{cases} \lceil \log_{1-P_i}(1-\gamma) \rceil, & \text{当 } P_i < \gamma \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)得到的  $m$  即为消息的最大复制数  $MR$ , 它是依据节点  $i$  此刻的传输概率值(用  $P'_i$  表示, 与  $P_i$  相区别)计算的, 在将  $MR$  写入消息的同时,  $P'_i$  也被记录在消息的特定字段中。

考虑到节点的不断运动, 其传输概率也随之变化, 如果节点  $i$  运动使得传输概率  $P_i$  值相对于计算  $MR$  时的  $P'_i$  已有很大不同, 那么消息传递时仍然使用旧的  $MR$  值就显得不够确切. 因此, 当节点  $i$  运动过程中遇到邻居并传递消息复本后, 对要重新放回的消息, 首先比较此时此刻的  $P_i$  值与消息中保存的  $P'_i$ , 若两值接近 ( $|P_i - P'_i| \leq \lambda$ ,  $\lambda$  为很小的一个正值), 直接将消息的  $MR$  值减 1 即可; 若  $P_i$  与  $P'_i$  值差距较大, 则需要按以下公式更新最大复制数:

$$NEW\_MR = \lceil MR \cdot \log_{1-P_i}(1-P'_i) \rceil \quad (4)$$

式(4)表示, 原本在节点  $i$  传输概率为  $P'_i$  时仍需要  $MR$  个复本才能达到消息的传输成功率  $\gamma$ , 在新传输概率值为  $P_i$  的情况下, 尚需要传递的消息复本数量. 为了推导出式(4), 不失一般性, 我们假设节点  $i$  在传输概率值为  $P'_i$  时, 消息已经被传递了  $k$  个复本, 因此有:

$$1 - (1 - P'_i)^{k+MR} = \gamma \quad (5)$$

$$1 - (1 - P'_i)^k \cdot (1 - P_i)^{NEW\_MR} = \gamma \quad (6)$$

式(5)、式(6)相减, 可得等式:

$$(1 - P_i)^{NEW\_MR} = (1 - P'_i)^{MR} \quad (7)$$

由式(7)即可得  $NEW\_MR$  计算公式(4).

在计算得到新的  $MR$  值后, 首先将新的  $MR$  和此时的  $P_i$  值更新至消息的对应字段中, 然后再将  $MR$  字段值减 1, 根据  $MR$  是否为 0 对消息作丢弃或重新入队列处理。

可以看出, 最大复制数随节点的传输概率值而变化. 当节点始终活跃于汇聚点附近时, 消息只需被复制很少的次数(最小为 1 次); 而当节点远离汇聚点, 最大复制数将变大. 为了避免网络中某消息的复本数过于泛滥, 可为最大复制数设置一个上限. 这种随节点传输概率动态调整的最大消息复本数机制, 既可以保证较高的消息提交成功率, 又兼顾了网络开销, 使其不致过大, 从而可以较好地达到提交成功率和网络开销间的折衷。

每个传感器节点均有一个存储队列保存准备要发送的数据消息, 这些消息有 3 个来源(如图 4 所示): (a) 当节点从自身的传感单元获取收集的数据时, 就会根据这些数据产生消息, 插入到自己的存储队列中; (b) 当节点收到其他的节点发送来的消息时, 就会接收这些消息并把它们插入到队列中; (c) 当本节点把消息发送到其他传感器节点(非汇聚点)后, 若消息的最大复本数  $MR$  仍大于 0, 将被重新插入队列, 因为网络并不能保证发送出去的消息最终能被汇聚点接收。

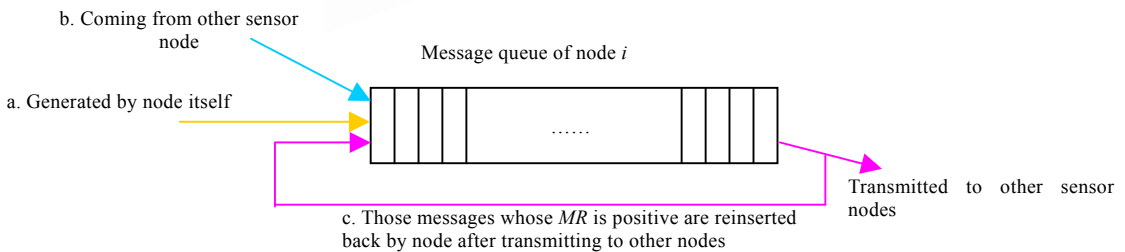


Fig.4 Source of messages in the queue

图 4 队列消息的来源

由于生存时间表明消息的重要程度, 因而队列管理是基于生存时间进行的. 具体来说, 队列中的各个消息按

照生存时间由短到长的顺序进行排列,生存时间短的消息排在前面并得到优先发送权,例如,生存时间最短的消息被放在队列头部并得到最先发送权.此外,以下 3 种场合发生消息丢弃现象:首先,当消息到达传感器节点时节点的存储队列已满,我们就把新到消息的生存时间和队尾消息的生存时间进行比较,若新消息的生存时间长,则直接把新消息丢掉,否则丢弃队尾消息然后把新消息根据其生存时间插入到队列中的适当位置.其次,队列中的消息在生存时间的更新过程中,一旦发现某消息的生存时间大于整个网络延迟容忍限度值(例如  $\theta$ ),立刻丢弃此消息.这样做是为了避免生存时间过大的消息继续存留在网络中消耗传感器能量和浪费网络带宽.此外,当节点把消息发送到其他传感器节点后,若消息的最大复本数减为 0,消息将被丢弃,而不再重新插入队列.

#### 4 模拟实验

我们模拟实现了 RDAD、FAD、直接传递算法和泛洪算法,主要从以下 4 个方面进行:

1) 对本文提出的算法与其他 3 种算法针对数据消息的平均传输成功率、平均传输能耗和平均传输延迟进行比较.

2) 研究不同的实验参数对这 4 种算法产生的影响.

3) 分析 RDAD 的汇聚点广播造成的消息传输干扰.

4) 分析比较 RDAD 与其他 3 种算法的网络寿命,从整体能耗方面对算法进行性能分析.

在模拟实验中,我们定义整个运动区域为  $200\text{m}\times 200\text{m}$  的方形,为简单起见,只设定一个汇聚点,它位于运动区域的中心位置;汇聚点每 5s 广播一次,当汇聚点以最大发射功率等级广播时,发射半径为 100m;传感器节点记录最近 5 次广播信号强度.假设传感器节点的数据产生过程遵循平均到达时间间隔为 100s 的泊松过程,网络带宽为 10Kbps,其他网络参数以及相应的缺省值见表 1.需要强调的是,对于泛洪算法,当传感器节点的存储队列满后,节点除继续接收自己产生的消息外,不再接收任何邻居节点发送来的消息.以下的实验结果如未特别说明均为 100 次独立实验结果的均值.

Table 1 Simulation parameters

表 1 模拟参数

Parameter	Default value
Network size	200×200
Number of sensor node	100
Transmission radii $R$ (m)	3
High power-level transmission radii of sink $RB$ (m)	100
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ of the formula(1) for calculating $P_i$	1,2,3,3,5
Speed of sensor node $V$ (m/s)	1~5
Pause time $T_{\text{pause}}$ (s)	0~120
Maximum queue size of sensor	200 messages
Size of data message (bits)	200
Size of broadcast message (bits)	20
Message generation rate	0.01/s
Position of sink node	(100,100)
Maximum delay tolerant value (s)	2000
$\gamma$ of RDAD	0.9
Fault tolerance threshold of FAD	0.9
$\alpha$ of FAD	0.1
Timer expiration value $\Delta$ of FAD	30
Initial energy of sensor node (joule)	10

##### 4.1 4种算法的性能对比

默认参数下算法的性能比较见表 2.综合 3 个性能指标,可以看出 RDAD 的性能最好,它在 4 种算法中具有最高的数据传输成功率以及最低的消息平均传输延迟,而且对网络平均传输能耗(即消息的平均复本数)控制得比较好.直接传递策略由于不与其他传感器节点发生消息通信,只在遇到汇聚点时向其递交队列中的消息,因此复本数恒为 1,具有非常低的平均传输能耗,但由于节点很难遇到汇聚点,因此造成非常大的消息延迟和较低的消息传输成功率.另外从表 2 中可见,泛洪的传输成功率略大于直接传递算法,而平均传输延迟只比直接传递策



略稍小,这是由队列管理策略引起的:当存储队列满后节点仍继续接收自身产生的消息而丢弃原来入队的一些消息.这使存储队列中的消息分为两类:队列满后入队的消息和队列满之前泛洪产生的大量消息副本.前者通常只能由本节点传输给汇聚点,相当于直接传递的效果,而泛洪的消息由于能被不同传感器节点传输到汇聚点,具有较高的传输成功率.因此泛洪的总体传输成功率比直接传递要大些,而传输延迟要小些.

**Table 2** Simulation results comparison with default parameters

表 2 默认参数下仿真结果的对比

	RDAD	FAD	Direct transmission	Flooding
Delivery ratio (%)	91.1	85.8	61.6	68.9
Average copies for each message	6.3	7.0	1.0	9.6
Average delay (s)	320.6	396.4	1 646.5	1 454.2

从表 2 我们还可以看出,RDAD 策略与 FAD 策略相比,在复本数量基本相同的情况下具有更高的平均传输成功率以及更小的平均传输延迟,因此更好地实现了传输成功率、传输能耗和传输延迟之间的平衡.这是因为在 DTMSN 节点稀疏的间歇连通网络环境下,节点遇到汇聚点和其他节点的频率不高,考虑到 DTMSN 中节点移动产生的网络拓扑快速变化,节点成功传输消息的实际可能值更多地取决于短时间内离汇聚点的远近程度,因此 FAD 策略的节点传输概率值不能很好地反映节点当前将消息成功提交给汇聚点的实际能力,对性能造成影响.相比之下,RDAD 算法的节点传输概率由接收到的汇聚点广播消息强度(即节点到汇聚点的相对距离)来确定,5s/次的接收频率以及最近多次信号强度值的记录使用,使节点传输概率值相对 FAD 具有较高的准确性.此外,尽管 FAD 基于消息错误容忍值  $FT$ (fault tolerance)的队列管理策略在理论上比较合理,但由于计算  $FT$  需要用到参与消息传输的各方节点的传输概率值,而节点传输概率的不够准确对队列管理效率造成影响.另外,由于 FAD 的队列管理没有考虑到消息的最大生存期,因此可能存在超出网络延迟容忍限度的消息继续存留于网络中消耗网络带宽和能量的现象.相比之下,RDAD 采用消息生存期和最大复制数机制来管理消息队列.消息生存期管理可以清除网络中过于陈旧的消息,因此减少了不必要的网络开销.而消息最大复制数随节点传输概率动态调整,在保证较高的消息传输成功率的同时,使消息的复本数始终控制在较合理的范围内.虽然消息最大复制数的计算公式相比 FAD 的消息错误容忍值  $FT$  公式更简单,只需知道发送节点一方的传输概率值就可计算,但实验结果表明,它能够有效地平衡传输成功率和传输能耗两者的关系.

为了准确分析节点间相遇的频繁程度,图 5 给出了使用 FAD 策略、具有 50 个传感器节点的 DTMSN 网络,在最初运行的一段时间内,传输概率为 0 的节点数量随时间变化的曲线.因为在 FAD 策略中,初始时所有传感器节点传输概率全都为 0,传输概率的增大是从汇聚点逐渐扩散开来的,所以传输概率为 0 的节点数量多少,可以用来反映节点遇到高传输概率邻居的难易程度.可以看到,网络启动 500s 时仍然有 24% 的节点传输概率为 0,此时平均每个节点已产生 5 条消息.另外,通过模拟实验我们也发现,在实验设定的默认参数下,当网络达到稳定时,平均每个节点每经历 71.2s 才能遇到一个具有更高传输概率的邻居节点或汇聚点.这更进一步证实了节点间相遇频率不高.

## 4.2 初始阶段传输率的变化

图 6 展示了网络初始阶段 4 种策略的传输成功率的变化情况.从图中可以看出,直接传递策略的传输成功率随时间线性增长,这是容易理解的:直接传递只有当节点遇到汇聚点时才将队列消息进行提交,而节点遇到汇聚点的概率随时间线性增长.另外可以看出,RDAD 策略的消息提交率始终高于 FAD,且在最初 600s 内,RDAD 曲线的斜率远大于 FAD.这是由于 FAD 策略在初始时,所有传感器节点  $P_i$  值都为 0,因此,网络中各节点  $P_i$  值从 0 变为非 0,是一个从汇聚点逐步“扩散”开来的过程,而这种“扩散”在节点相遇频率不高的稀疏网络环境中,经历的时间会更长一些.根据消息传输策略,节点只向  $P_i$  值更大的邻居传递消息,这样在网络最初运行的一段时间里,节点间的消息传递活动较少,因此传输成功率不高.图 6 还显示泛洪策略的曲线与其他 3 种策略有很大不同,它在极短的时间内(600s)达到一个峰值,随后缓慢下降,逐渐趋向于直接传输策略的曲线.造成这种状况的原因是:最初大量的泛洪消息使网络中多数传感器节点的消息队列在 600s 内就被填满,此后由于不再接收泛洪消息,只有节点本身产生的新消息入队列,使得将消息递交到汇聚点变得困难,整体性能趋向于直接传输策略.

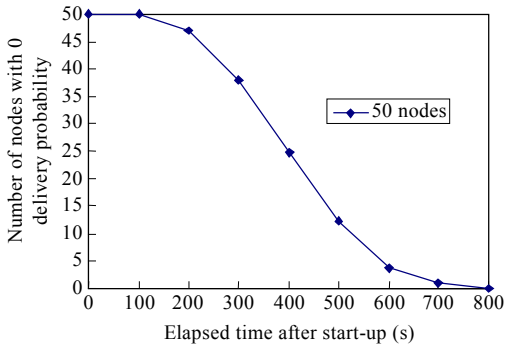


Fig.5 Node number of 0 delivery probability vs. time elapse  
图5 初始阶段传输概率为0的节点数随时间变化图

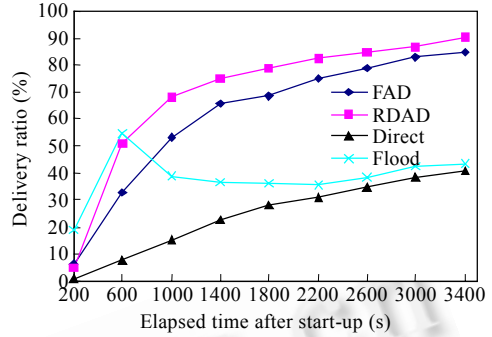


Fig.6 Delivery ratio vs. time elapse  
图6 初始阶段传输成功率随时间变化图

### 4.3 通信半径对性能的影响

图7展示节点最大通信半径从1~10逐渐增大时4种策略的性能对比.从图7(a)不难看出,RDAD的消息传输成功率始终高于FAD、直接传递以及泛洪算法.当节点的通信半径较小时,RDAD相比FAD优势更加明显.这是因为当节点通信半径较小时,节点遇到其他节点的可能性降低,相遇时间间隔增长,FAD因此受到较大影响.当节点的通信半径逐渐增大时,各个算法的消息传输成功率逐渐提高.这是由于此时节点通信半径变大,增加了传感器节点在自身的通信范围内遇到邻居传感器节点的可能性,从而也增加了消息被转递的机率.此外,节点通信范围的增大也增大了传感器节点与汇聚点的通信概率.从图中还可以看出,当节点通信半径增大到一定程度(大于7)时,FAD算法的消息传输成功率急剧下降.依照FAD策略,节点在 $\Delta$ 时间内没有发生消息传递,节点的传输概率会适当降低.而当节点通信半径大于7时,节点间相遇并发生消息传递的实际间隔已普遍小于 $\Delta$ 的默认值30s,因此造成大量节点的传输概率值只增不减,逐渐增大.而过大的节点传输概率值影响到队列管理,使消息在 $FT$ 值迅速增大之后更容易被丢弃,因此复本数减少,平均传输成功率迅速下降.图7(b)表明,直接传递算法的平均消息复本数永远为1,因为传感器节点只与汇聚点发生直接通信.当节点传输半径较小时,RDAD有效的队列和消息管理机制使得RDAD的平均消息复本数小于FAD和泛洪算法;传输半径大于7时,FAD策略的复本数减少,原因如上所述,即 $\Delta$ 默认值不再适合此时的网络环境.图7(c)显示,随着通信半径 $R$ 的增大,各算法平均传输延迟均逐渐减小.由于RDAD能够获得较准确的节点传输概率,因此下一跳节点的选择最有效(更能与汇聚点发生通信),平均传输延迟最低.

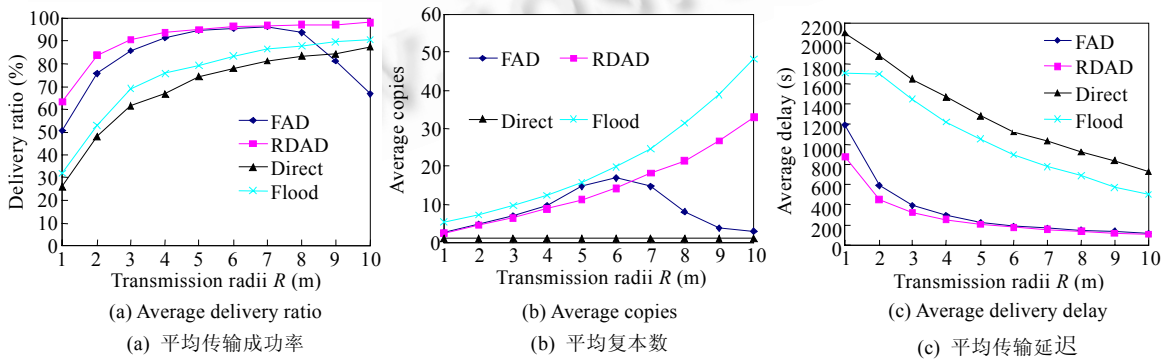


Fig.7 Impact of transmission range  
图7 通信半径的影响

### 4.4 节点密度对性能的影响

为了分析节点密度对性能的影响,此项实验将网络中节点数从20逐次递增至160.从图8(a)可以看出,随着

节点密度的增大, RDAD 和 FAD 算法的传输成功率有非常轻微的提高; 而直接传递策略因为不与其他节点发生消息传递, 因此提交率大体不变; 泛洪算法中因为有大量消息具有直接传递的性质, 因此消息提交率比直接传递算法稍高。需要注意的是, 当节点数量在 40~100 之间时, RDAD 比 FAD 的传输成功率高出较多, 说明 RDAD 策略更适合此密度范围的 DTMSN 数据收集。节点密度降至 20, 虽然 RDAD 比 FAD 具有更准确的节点传输概率, 但由于节点太过稀疏导致节点间消息传递普遍受到影响, 因此两种策略的消息传输成功率接近; 而节点数量升至 100 以上, 节点相遇变得较频繁, 因此 RDAD 在消息传输成功率方面的优势也有所减弱。考虑消息的平均副本数, 图 8(b) 显示随着节点密度的增大, RDAD, FAD 以及泛洪算法的平均消息副本数均有所上升。这是因为节点密度增大导致节点相遇频繁, 增加了消息传递的机会, 进而引发了消息副本数的上升。另外, 图 8(c) 展示了节点的密度与平均传输延迟的关系, 因为直接传递算法中传感器节点只与汇聚点发生通信, 因此节点密度的增大对传输延迟没有影响。而节点密度增大有利于遇到下一跳节点, 使消息更快速地向汇聚点传递, 因此降低了 RDAD 和 FAD 的传输延迟。从图 8(c) 还可以看出, 随着节点密度增大, 泛洪算法的平均传输延迟却有所上升。这是因为消息的节点密度小时, 邻居节点比较稀少, 因此需要经过较长的时间才能使节点的存储队列被泛洪产生的消息复本填满, 所以在恒定的仿真时间内, 队列满后入队的节点自身产生的消息所占比重较小, 总的平均传输延迟较短。而当节点密度较大时, 很短的时间内存储队列就被泛洪的消息复本填满, 之后入队的节点自身产生的消息所占比重增大, 由于这部分消息基本上仅能被本节点传递给汇聚点, 因此尽管节点密度的增大有利于消息间消息传递, 但总体来看传输延迟仍有所增长, 也更接近直接传递策略。

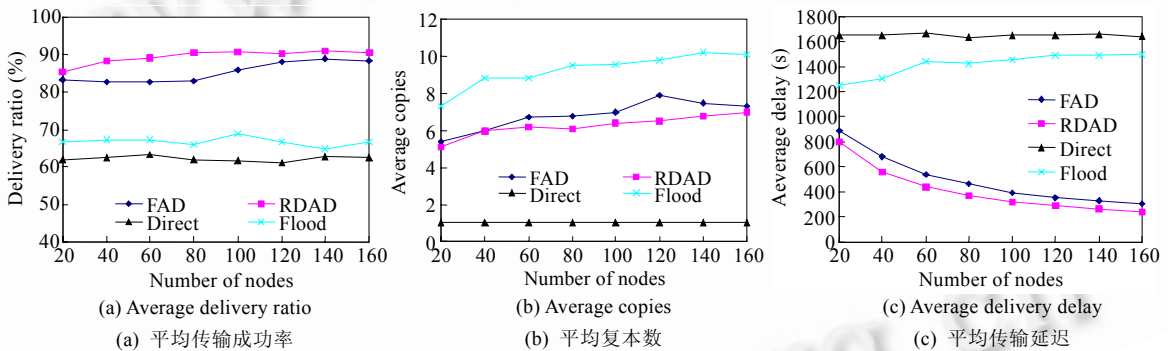


Fig.8 Impact of node density

图 8 节点密度的影响

#### 4.5 节点运动速度对性能的影响

本组实验研究节点运动速度对 4 种算法性能的影响。需要说明的是, 节点的运动速度是  $1 \sim V_{\max}$  之间的某随机值, 我们在实验中对  $V_{\max}$  的值做修改, 使其从 1~11 逐渐增大。如图 9(a) 所示, 当传感器节点运动速度加快时, 4 种算法的传输成功率均有所提高, 这是因为节点运动速度加快意味着节点与其他节点相遇的机率增大以及节点到达汇聚点的速度加快。此外, 节点的运动速度对网络平均副本数及平均传输延迟都有一定的影响。如图 9(b) 所示, 节点运动速度加快使 RDAD, FAD 和泛洪算法传输能耗有所增加, 这同样是由于节点与其他传感器节点相遇的可能性增大引起平均消息副本数增加造成的。从图 9(c) 还可以看出, 随着节点运动速度加快, 4 种算法的平均传输延迟均降低。

#### 4.6 存储队列长度对性能的影响

本组实验主要研究不同长度的存储队列对各种算法的性能影响。存储队列长度表示节点所能容纳的最大消息数量, 鉴于传感器节点的实际硬件条件限制, 研究存储队列对性能的影响很有意义。

从图 10(a) 可以看出, 随着节点存储队列长度的增长, 4 种算法的传输成功率均呈现增大的趋势, 这是因为存储队列的增长使节点所能容纳的消息增多, 消息在被丢弃之前有更大的可能性传输到汇聚点。图 10(b) 表明了节点存储队列的增长还使 RDAD, FAD 以及泛洪算法产生更多的消息复本, 这同样是由于存储队列的增长使节点

能容纳更多的消息副本引起的.但从图可以看出,RDAD 始终能够相对较好地控制消息副本的数量,使它低于泛洪和 FAD 算法产生的消息副本.图 10(c)说明节点存储队列的变化对 4 种算法的传输延迟没有显著的影响.

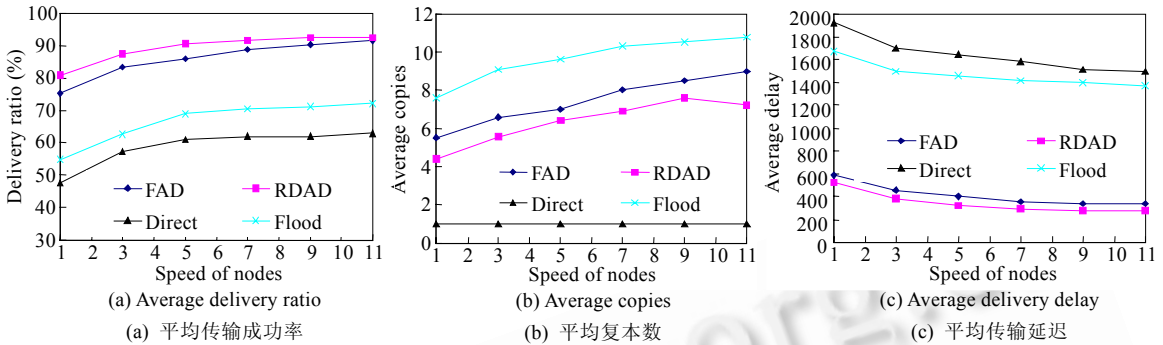


Fig.9 Impact of movement speed  
图9 节点运动速度的影响

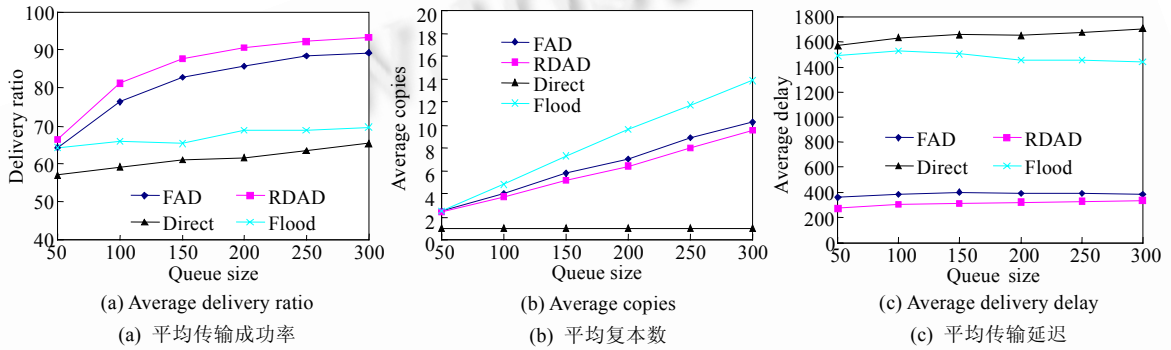


Fig.10 Impact of queue length  
图10 存储队列长度的影响

### 4.7 汇聚点广播对节点间消息传递的干扰

由于无线传感器节点通过共享无线信道传输消息,而汇聚点的广播会造成无线信道干扰,导致被干扰消息的重传,从而给正常的节点间消息传输带来影响,增加了网络的传输开销.当汇聚点广播消息时,所有接收节点在汇聚点广播覆盖范围内的消息传输,都将受到干扰.如图 11 所示,小圈表示汇聚点的广播区域,大圈半径在此基础上加上节点间最大通信半径  $R$ ,图中黑色未标号的折线表示的通信因为接收节点在广播范围内而受到干扰;而标为 1 和 2 的折线所表示的通信虽然发送节点在广播范围内,但由于接收节点在此之外所以传输不受影响.我们通过仿真实验来评估广播干扰对网络性能造成的影响.

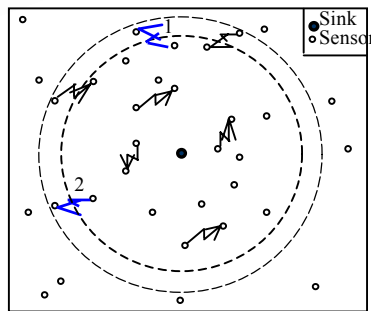


Fig.11 Interference of transmission by broadcast  
图11 汇聚点的广播干扰

通过实验我们发现,默认网络参数下,汇聚点广播导致的消息重传数量,只占到全部消息传输量的 0.458%,因此造成的网络开销很小,对网络性能的影响也很小.图 12 表示汇聚点广播间隔的变化对传输干扰的影响,可以看出,汇聚点广播频率增大时,造成的传输干扰也逐渐增大,但是即使广播间隔缩短至 1s,被干扰的消息数量也只占到全部消息传输量的 2%.图 13 表示汇聚点广播半径变化对传输干扰的影响,由图可知,虽然广播半径增大使受干扰消息增多,但是这种干扰对于整个网络消息传输的影响十分有限:当广播半径为 150 米时,整个运动区域都被覆盖,而此时的消息干扰率仅为 0.509%.因此,虽然汇聚点广播半径很大,但由于广播消息非常短(只有普通数据消息长度的 1/10),因此传输时间很短,造成的传输干扰较小;此外,节点的间歇连通性,也使得短暂时间内整个网络中的消息传输量较小,这也是汇聚点广播造成的消息传输干扰比较小的原因.

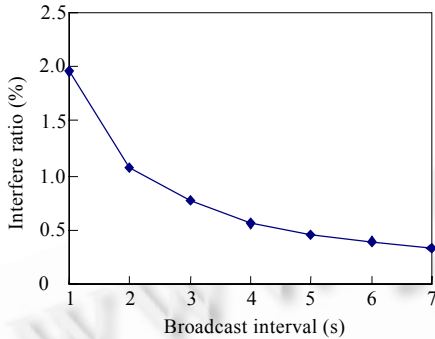


Fig.12 Broadcast interval vs. interfere ratio  
图 12 汇聚点广播间隔对传输干扰影响

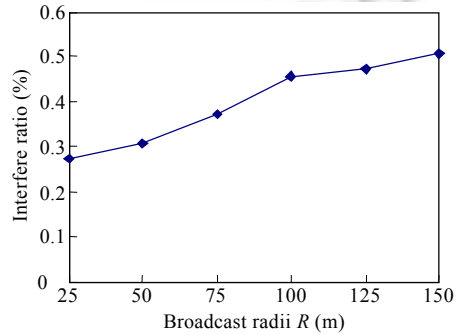


Fig.13 Broadcast radii vs. interfere ratio  
图 13 汇聚点广播半径对传输干扰影响

#### 4.8 网络寿命分析

本组实验主要研究 4 种算法的网络寿命,并从总体能耗方面对算法进行分析.我们已假设每个传感器节点的初始能量 10J,每发送或接收特定长度消息的能量消耗采用文献[20]的能量模型计算.我们假设当网络中一半数量的节点能量耗尽时网络死亡.

从表 3 可以看到,4 种算法中直接传递的网络寿命最长,这是因为直接传递算法中传感器节点不与其他节点发生消息通信,只在遇到汇聚点时将队列中消息递交,因此节点的能量消耗极小.泛洪算法由于队列管理策略的原因,在网络开始工作很短时间内,节点的消息队列就会被大量消息副本所填满,而随后入队列的消息通常只能被自身节点所存储和递交(只有偶尔遇到刚将消息递交给汇聚点而使队列清空的邻居节点,队列中消息才会产生复制),因此网络寿命比较长.我们也通过实验将泛洪算法的消息队列长度增长至 3 000,此时由于消息在节点间大量复制,网络寿命迅速缩短至 1 天.此外,通过实验我们也看出,RDAD 的网络寿命比 FAD 稍长.虽然节点接收汇聚点周期性广播消息需要消耗能量,但是由于消息长度很短,因此接收消耗的能量很少.实验表明,在整个 RDAD 网络的生命期里,每个节点用于接收广播消息的能量消耗,只占其自身全部能量的 0.66%,因此,汇聚点广播对网络寿命造成的影响较微弱,网络寿命更多地受节点间消息传输策略影响.由于 RDAD 策略能够更好地平衡网络开销与消息提交成功率,因此获得了较理想的网络寿命.

Table 3 Network lifetimes of four schemes with default parameters

表 3 默认参数下 4 种算法的网络寿命

	RDAD	FAD	Flooding	Direct transmission
Network lifetime (day)	3.805	3.606	46	1155

## 5 结论及下一步工作

与传统传感器网络相比,延迟容忍的移动无线传感器网络 DTMSN 具有的独特性质使得传统传感器网络的数据收集方法在 DTMSN 中并不适用.为了有效收集 DTMSN 网络中的数据,本文提出了一种基于相对距离感知



的动态数据传输策略 RDAD.与已有工作相比,RDAD 的主要贡献在于以下几个方面:

(1) 提出了一种有效的动态路由机制,能在 DTMSN 间歇连通环境中以较小的网络开销获取节点相对于汇聚点的距离信息,并较准确地计算节点与汇聚点通信概率从而有效选择下一跳传输节点.因此,RDAD 的传输成功率比 FAD 高,平均传输延迟也比 FAD 低.

(2) RDAD 引入有效的队列管理机制,使得在尽量增大传输成功率的同时有效控制了消息副本数量,降低了网络传输能耗,延长网络寿命.

模拟实验显示,与现有的几种 DTMSN 数据传输算法相比,RDAD 的数据传输成功率高,传输能耗低且延迟较小,具有较长的网络寿命.

在模拟实验中,为了简化分析我们只设定了一个位置固定的汇聚点,并在此基础上得出了较好的实验结果.然而考虑到实际的应用场景,网络中可能会存在多个汇聚点,或者出现汇聚点通过车载等方式随机移动来收集消息的情形.为了使 RDAD 策略更加具有实际应用意义,我们下一步将开展上述复杂场景下 RDAD 策略的性能研究工作.

## References:

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramania Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002,40(8): 102–114.
- [2] Liu M, Gong HG, Mao YC, Chen LJ, Xie L. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2005,16(12):2106–2116 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>
- [3] Wang Y, Lin F, Wu H. Poster: Efficient data transmission in delay fault tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN). In: Bestavros A, Kurose J, eds. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2005)*. Piscataway: IEEE Press, 2005.
- [4] Wang Y, Dang H, Wu H. A survey on analytic studies of delay-tolerant mobile sensor networks. Published online in *Wiley InterScience*, 2007,7:1197–1208.
- [5] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, Fall K, Cerf V, Durst B, Scott K, Weiss H. Delay-Tolerant networking—an approach to interplanetary Internet. *IEEE Communications Magazine*, 2003,41(6):128–136.
- [6] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In: Feldmann A, eds. *Proc. of the ACM SIGCOMM 2003 Conf. on Computer Communications*. New York: ACM Press, 2003. 27–34.
- [7] Mainwaring A, Polastre J, Szewczyk R, Culler D, Anderson J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: Cauligi S, ed. *Proc. of the ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*. New York: ACM Press, 2002. 88–97.
- [8] McDonald P, Geraghty D, Humphreys I, Farrell S, Cahill V. Sensor networking with delay tolerance (SeNDT). In: Guo K, ed. *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 2007)*. Piscataway: IEEE Press, 2007. 1333–1338.
- [9] Shah R C, Roy S, Jain S, Brunette W. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In: Ekici E, ed. *Proc. of the 1st Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 30–41.
- [10] Wang Y, Wu H. Delay/Fault-Tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): A new paradigm for pervasive information gathering. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,6(8):1021–1034.
- [11] Amin Vahdat, David Becker. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report, Vol.CS-200006, Durham, Duke University, 2000.
- [12] Philo J, Hidekazu O, Yong W. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. *ACM Operating System Review*, 2002,36(5):96–107.
- [13] Small T, Haas Z J. The shared wireless infostation model—a new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a Way). In: Gerla M, ed. *Proc. of the ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003)*. New York: ACM Press, 2003. 233–244.
- [14] Wang Y, Wu H. Replication-Based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN). In: Gregori E, ed. *Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 485–489.
- [15] Wang Y, Wu H Y, Dang H, Lin F. Analytic, simulation, and empirical evaluation of delay/fault-tolerant mobile sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007,1(11):3287–3296.

- [16] Wang Y, Wu H, Lin F, Tzeng NF. Protocol design and optimization for delay/fault-tolerant mobile sensor networks. In: Shatz S, ed. Proc. of the 27th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2007). Washington: IEEE Computer Society, 2007.
- [17] Pasztor B, Musolesi M, Mascolo C. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR. In: Conti M, ed. Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE Press, 2007. 1-12.
- [18] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. Wireless Communication & Mobile Computing, 2002,2(5):483-502.
- [19] Stojmenovic I. Position based routing in ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(7):128-134.
- [20] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.

#### 附中文参考文献:

- [2] 刘明,龚海刚,毛莺池,陈力军,谢立. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议. 软件学报, 2005,16(12):2106-2116. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>



许富龙(1980-),男,河南太康人,博士生,主要研究领域为移动计算,无线传感器网络.



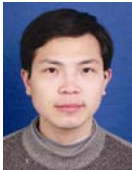
陈贵海(1963-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式,并行计算.



刘明(1973-),男,博士,副教授,主要研究领域为移动计算,传感器网络技术.



李建平(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为小波分析,信息处理技术.



龚海刚(1975-),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络.



朱金奇(1980-),女,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,延迟容忍网络.