

## 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输\*

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

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

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

### Selective Replication-Based Data Delivery for Delay Tolerant Mobile Sensor Networks

ZHU Jin-Qi<sup>1</sup>, LIU Ming<sup>1+</sup>, GONG Hai-Gang<sup>1</sup>, CHEN Gui-Hai<sup>2</sup>, XU Fu-Long<sup>1</sup>, SONG Chao<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: csmliu@uestc.edu.cn

**Zhu JQ, Liu M, Gong HG, Chen GH, Xu FL, Song C. Selective replication-based data delivery for delay tolerant mobile sensor networks. *Journal of Software*, 2009,20(8):2227-2240. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3323.htm>**

**Abstract:** This paper proposes a data gathering method—SRAD (selective replication-based adaptive data delivery scheme). The main idea of SRAD is to replicate messages selectively to nodes that have higher probability to meet the sink. SRAD consists of two key components: data transmission and queue management. The former makes decisions on when and where to transmit data messages according to the node delivery probability in random waypoint mobility model. The latter based on the message survival time to decide message's transmission and dropping to minimize the transmission overhead. Simulation results show that the proposed SRAD data delivery scheme cannot only have a relatively longer network lifetime but also a higher message delivery ratio with the lower transmission overhead and less data delivery delay than other DTMSN (delay tolerant mobile sensor networks) data delivering approaches.

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

**摘要:** 提出了一种基于选择复制的动态数据传输策略 SRAD(selective replication-based adaptive data delivery scheme),基本思想是把消息(message)动态的复制给更有可能与汇聚点(sink node)通信的传感器节点.SRAD 由数据传输和队列管理两个主要部分组成:前者根据 Random Waypoint 随机运动模型下不同时刻各传感器节点传输概率的大小进行数据消息的传输;后者通过消息的生存时间 ST(survival time)值决定队列中消息传递的优先顺序和丢弃

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60703114, 60673154, 60721002, 60825205 (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 Jiangsu Provincial High-Tech Research Project of China under Grant No.BG2007039 (江苏省高技术研究计划); the Young Scholar Foundation of the University of Electronic Science and Technology of China under Grant Nos.L08010601Jx0746, L08010601Jx0747 (电子科技大学青年基金)

Received 2007-09-17; Revised 2008-01-29; Accepted 2008-03-14

原则,以进一步降低网络传输能耗.模拟实验结果表明,与现有的几种 DTMSN(delay tolerant mobile sensor networks) 数据传输算法相比,SRAD 的网络寿命相对较长,且它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.

**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

随着传感器技术、嵌入式技术以及低功耗无线通信技术的发展,生产具备感应、无线通信以及信息处理能力的微型无线传感器已成为可能.这些廉价的、低功耗的、高度灵活的传感器节点相互协作共同组织成无线传感器网络.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>,目前,通用的数据信息收集方法是通过在一定的地理范围内放置大量的体积小、价格低廉、电池能量低以及功率低的传感器节点来形成一个相互连通的无线网状网络,其中每个节点都可以与一个或多个其他节点协作,将测量的环境参数或者收集的数据传输给汇聚点进行处理<sup>[2]</sup>.然而,这种数据收集方法在某些情形并不适用,例如,生物研究中关于记录野生动物生活习性数据的收集过程,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,或是流感病毒跟踪,为了防止流感病毒的扩散,需要定期收集高密度人群区域的流感病毒信息等.与一般应用相比,这些应用具有一些独特的性质:首先,数据的收集过程面向运动物体(人类或动物),虽然可以通过在特定的位置放置一些传感器节点来采集数据,但是为了保证数据的有效性和准确性,通常都是采取从运动物体直接获取数据的方法.因此,为每个运动物体配置一个传感器单元就成了很自然的前提.显然,物体的随机移动导致了某些传感器节点的非连通性;其次,这些应用允许一定的数据延迟.由于节点的间断连通性,DTMSN(delay tolerant mobile sensor networks) 中数据的传输延迟往往较高.另外,数据信息的收集过程应该是透明的,不对人类或动物的日常生活产生影响.例如,我们不能通过命令某些人做一些特殊的动作或移动到特定的位置来方便信息的收集和传输.

为了满足上述应用的需求,出现了延迟容忍的移动无线传感器网络(DTMSN)<sup>[3]</sup>.DTMSN 由两种节点组成:随机移动的传感器节点和汇聚点.前者绑定在运动物体上,用来收集数据信息并形成一个个间断连接的移动传感器网络(如图 1 所示,这个网络由 9 个随机分布的移动传感器节点  $S_1 \sim S_9$  和 2 个汇聚点  $H_1, H_2$  组成.此刻,只有  $S_1$  与  $S_3, S_6$  与  $S_7$  和  $S_8, S_5$  与  $H_1$  是连通的).基于传感器节点传输距离短的限制,它不可能直接把采集的数据传输到目的地.此外,一部分放置在特定位置或被某些运动物体携带着并随着物体的运动而运动的高端节点作为汇聚点(如图 1 中的  $H_1$  和  $H_2$ ),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.

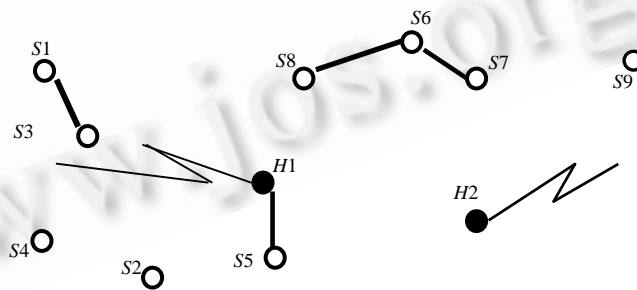


Fig.1 A connected graph of the DTMSN

图 1 DTMSN 网络的连通图

由于 DTMSN 网络中移动传感器间的连通性差,各个传感器节点之间要想形成一个相互连通的网状网络是非常困难的,即各个节点之间可能不存在端到端的连通路径.可见,传统的传感器网络数据传输算法在 DTMSN 环境下并不适用.在 DTMSN 的间断连通环境中,为了达到一定的数据传输成功率,进行数据的复制是必要的,而复制也必将增大系统的传输能耗.那么,如何有效地把传感器节点收集到的数据传递给汇聚点,以达到数据传输成功率、传输能耗及传输延迟之间的平衡,就成了 DTMSN 要解决的首要问题.鉴于以上因素,本文提出了一种

基于选择复制的动态数据传输策略 SRAD(selective replication-based adaptive data delivery scheme),其基本思想是,把消息动态地复制给更有可能与汇聚点通信的传感器节点,以达到尽量增大传输成功率和降低传输能耗的目的.SRAD 由数据传输和队列管理两个主要部分组成.前者首先通过 Random Waypoint 随机运动模型<sup>[4]</sup>计算出不同时刻各传感器节点的传输概率,即传感器节点把消息传递给汇聚点的可能性,而后根据此传输概率的大小选择下一跳节点并进行数据消息的复制传输.队列管理则利用消息的生存时间 ST(survival time)值决定队列中消息的重要程度和丢弃原则.仿真模拟实验结果表明,与现有的泛洪(flooding)算法、直接传递(direct transmission)算法、FAD(fault tolerance delivery scheme)策略相比,SRAD 的网络寿命相对较长,且它能够以较低的数据传输能耗和传输延迟达到较高的数据传输成功率.

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 SRAD 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)用于间断连通的网络传送数据.文献[5]给出了 DTN 的总体结构,作为网络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 是基于信息(message)交换的,它的数据单元可能是信息、分组或束(bundles).Burleigh 等人还提出了一个新的端到端覆盖层网络协议<sup>[6]</sup>,称为捆绑(bundling).

DTN 技术近几年被引入无线传感器网络,根据节点移动性的不同,可以把相关研究工作大致分为 3 类:

(1) 传感器节点均静止.第 1 类延迟容忍的无线传感器网络 DTSN(delay tolerant sensor networks)是静止的,所有传感器节点和汇聚点全部固定不动.基于传感器节点传输距离有限及电池能量低的限制,各个节点之间松散地连接在一起,并且传感器节点脱离网络成为孤立节点的现象时有发生.文献[7]就是静态 DTSN 具体应用的一个实例,文中提出采用传感器网络来监控人类生活环境,并赋予用户通过 Internet 网络对此传感器网络进行控制的权限.文献[8]提到的 SENDT 工程,其目的是建立一个 proof-of-concept 的传感器网络,对湖水质量进行监测.由于需要定期关闭一些传感器节点以保存电池能量,因此各个节点之间就形成了一个间断连接的 DTSN 结构.

(2) 网络中具有一些易于管理的移动节点.在第 2 类 DTSN 中,可以采用一些移动节点来改善网络的连通性.例如,data mule 方法<sup>[9]</sup>用来聚集传感器数量稀少的网络中每个传感器节点采集到的数据信息.网络中存在一个在传感器部署区域随机移动的数据 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.由于传感器节点所需传输距离大为减小,因此,这种策略比静态的 DTSN 更能节省传感器的能量.

(3) 传感器节点是运动的,即 DTMSN,其中最关键的是如何设计 DTMSN 环境下的路由算法.最基本的路由算法(数据收集方法)称为直接传递<sup>[10]</sup>,基本思想是,传感器节点只与汇聚点发生通信,即只有当传感器节点运动到汇聚点的通信范围内时两者才进行消息传输.显然,这种策略的传输能耗非常低(因为 sensor 节点只与汇聚点通信),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往往较低,因此该算法的传输延迟大并且数据传输成功率也较低.针对上述问题,文献[11]提出了泛洪算法,令传感器节点把消息复制给它的通信范围内的所有节点,目的是使网络中所有节点均包含此消息的复本.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,则这种算法能够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.此外,ZebraNet<sup>[12]</sup>使用移动传感器监测斑马的生活习性.他根据历史纪录进行路由: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,当一个传感器节点与另一个传感器节点相遇后,只有当前者的历史级别小于后者时二者才发生数据传输.然而,这种简单的策略并不能保证所需的数据传输成功率.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络中分发满足一定数量的数据包的复本即可.然而在实际应用中,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.

除了上面提到的算法以外,相关的研究还包括文献[14,15].文献[14]提出的 RED(replication-based efficient data delivery)策略由数据传输和消息管理两部分组成.数据传输中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.消息管理则根据节点当前的传输概率值确定最佳的容错编码(erasure coding)参数以提高传输成功率.然而,RED 中最佳容错编码参数的计算值并不准确<sup>[10]</sup>,并且在网络中传输大量小的分片消息进一步加剧了网络的传输能耗.FAD 策略<sup>[15]</sup>是在 RED 策略的基础上形成的,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.然而,此机制的传输能耗仍然较大,并且它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.此外,DTN 技术也被广泛运用于自组织网络中<sup>[16-19]</sup>.

## 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,并且为简单起见,假设网络中唯一的汇聚点也部署在区域  $A$  内且固定不动.所有传感器节点和汇聚点的通信半径均为  $R$ .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,为简化计算,设模型中所有节点的运动速度相同,均为  $V$ .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  $D$ ,使用恒定速度  $V$  从  $S$  沿直线运动到  $D$ ,在  $D$  随机选取一个时间  $T_{\text{pause}}$  属于  $(T_{\text{min}}, T_{\text{max}})$  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 2 所示.
- 由于汇聚点静止,所以对于所有传感器节点来说,汇聚点的位置已知.
- 各个传感器节点均明确本节点此次运动(停止之前)的目的点  $D$ .
- 通过全球定位系统 GPS(global positioning system),各个传感器节点可获知任意时刻自己的当前位置.
- 在所有传感器节点部署完成后执行一种时间同步算法,让所有传感器节点保持时间同步.当然,这个算法不必太精确,比如说一些准同步算法,由于 DTN 网络中消息超时时间可能会比较长,比如几分钟、几小时甚至几天,因此同步的间隔可以大些,所以花费的同步开销可以假设较小.

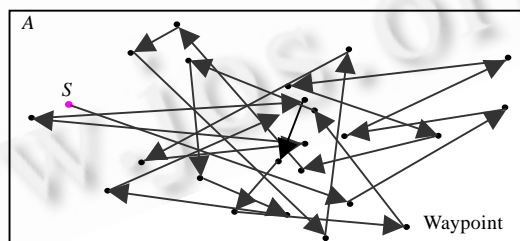


Fig.2 Traveling pattern of a moving node using the random waypoint mobility model

图 2 采用 Random Waypoint 运动模型的节点运动模式

### 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放置在随机运动的物体身上,因此网络的拓扑是动态的.2) 间断的连通性.DTMSN 的连通性差,某个传感器节点与其他传感器节点之间只是偶尔连接.3) 延迟容忍.由于传感器节点间的间断连通性,DTMSN 中数据的传输延迟往往较高,因此,应用能够容忍较大的数据延迟.

此外,传感器节点的存储空间有限,此限制对 DTMSN 的性能影响重大.因为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,如何设计队列管理策略成为瓶颈。

为了满足上述特性,有效的 DTMSN 路由算法需要同时满足以下几个特点:1) 动态地选择下一时刻最有可能接近汇聚点的传感器节点作为消息的载体.如果下一跳节点选择不正确,则会导致节点能量消耗过快和网络性能的急剧下降.2) 设计恰当的消息和队列管理机制.合理的队列管理必然有利于提高整个网络的性能.在目前对 DTMSN 传输算法的研究中,已有工作并不能同时满足以上要求.例如,RED 算法和 FAD 算法均基于历史记录进行路由,而基于历史记录策略的有效程度取决于节点的运动状态(速度、方向).图 3 是一个由 8 个传感器节点和一个汇聚点组成的 DTMSN 示意图(括号中的内容表示基于历史记录计算出的传输概率值,箭头代表节点的运动方向),其中,位于同一圆内的节点可以相互通信,且节点 3 和节点 4 的传输概率最高.按照 RED 和 FAD 传输策略,认为这两个节点与汇聚点的通信频率最大,从而选择节点 3 和节点 4 成为下一跳路由节点.但由于此时两节点的运动方向均背离汇聚点,下一时刻其他节点把数据消息传递给这两个节点并不有效。

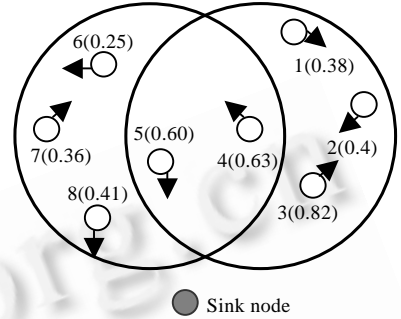


Fig.3 Illustration of next hop selection

图 3 下一跳节点选取示意图

为了解决上面的问题,本文提出了一种同时满足上述两个要求的动态数据传输策略 SRAD.在下一节里,我们将对 SRAD 策略进行具体的描述。

### 3 SRAD策略的设计实现

#### 3.1 数据传输

##### 3.1.1 根据运动模型计算节点的传输概率

传输概率表明传感器节点和汇聚点通信的可能性,数据传输就是根据传输概率进行的.令  $P_i$  表示传感器节点  $i$  的传输概率,可见,由于节点  $i$  的随机运动, $P_i$  的值是变化的,它取决于节点的运动方向、速度、与汇聚点的通信距离等因素.下面我们就根据上述 Random Waypoint 运动模型,以节点  $i$  为例,分 3 种情况定义任意时刻节点  $i$  的传输概率  $P_i$ :

- 1) 首先,节点  $i$  判断此刻自己所在的位置,若发现自己位于汇聚点的通信范围内,则表明此时节点  $i$  可以直接与汇聚点发生通信,因此置  $P_i=1$ .
- 2) 否则,查看节点  $i$  的当前位置和这次运动的目的点  $D$  的连线是否与汇聚点的通信范围相交(线段穿越圆),若相交,则置  $P_i=1$ .因为若节点  $i$  的当前位置和本次运动的目的点  $D$  的连线与圆相交,则表明节点  $i$  正朝着汇聚点运动,且马上就能和汇聚点发生直接通信。

显然,当圆心到线段所在直线的距离小于圆的半径且圆心与线段端点所连成的两线段长度均大于半径、所形成的两夹角均为锐角时,线段与圆相交.因此,我们有如下定理:

**定理 1.** 设节点  $i$  的当前位置为  $I$ ,汇聚点(设为点  $O$ )到线段  $ID$  所在直线的距离为  $l$ ,当且仅当同时满足  $\frac{x_1y_2 - x_2y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \leq R, \arcsin \frac{l}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} < 90^\circ, \arcsin \frac{l}{d} < 90^\circ, \sqrt{x_1^2 + y_1^2} > R, \sqrt{x_2^2 + y_2^2} > R$  时, $ID$  与汇聚点的通信范围相交,否则不相交.其中, $(x_1, y_1)$  为  $I$  点的当前坐标, $(x_2, y_2)$  为目的点  $D$  的坐标值。

证明:设汇聚点  $O$  所在位置为原点,则  $O$  的通信范围是面积为  $x^2+y^2 \leq R^2$  的圆.设  $I$  的当前坐标为  $(x_1, y_1)$ ,当前目的点  $D$  的坐标为  $(x_2, y_2)$ ,如图 4 所示,其中,  $x_2^2 + y_2^2 = d^2$ , 则线段  $ID$  所在的直线方程为

$$(y_1 - y_2)x - (x_1 - x_2)y + x_1x_2 - x_2y_1 = 0 \tag{1}$$

根据点到直线的距离公式计算  $l$ :

$$l = \frac{x_1y_2 - x_2y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \tag{2}$$

并且根据直角三角形的性质,有

$$\angle OID = \arcsin\left(\frac{l}{OI}\right) = \arcsin\frac{l}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \tag{3}$$

$$\angle ODI = \arcsin\left(\frac{l}{OD}\right) = \arcsin\frac{l}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} = \arcsin\frac{l}{d} \tag{4}$$

$$OI = \sqrt{(x_1 - 0)^2 + (y_1 - 0)^2} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \tag{5}$$

$$OD = \sqrt{(x_2 - 0)^2 + (y_2 - 0)^2} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \tag{6}$$

结论得证. □

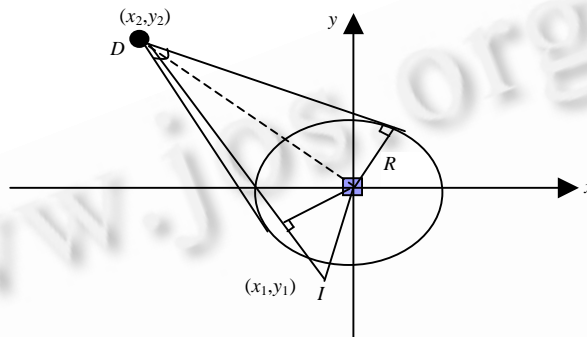


Fig.4 Sketch map of calculating the delivery probability

图 4 传输概率的计算示意图

3) 若上述两个条件均不满足,那么根据本文的运动模型,节点*i*一直朝着本次运动的目的地点*D*运动直到停止.可见,本次运动的目的地点*D*标志着当前传感器节点*i*的运动方向.同时,*D*离汇聚点越近,节点*i*与汇聚点的最终传输概率越高.因此,我们可以利用此次运动的目的地点*D*来计算当前时刻节点*i*的传输概率*P<sub>i</sub>*.具体做法是,令*P<sub>i</sub>*等于节点*i*本次运动的目的地点*D*把消息传送到汇聚点的概率,就把*P<sub>i</sub>*的计算问题转换为如何计算目的地点*D*和汇聚点的传输概率的问题.计算过程如下:

在 Random Waypoint 模型中,目的地点*D*是随意选取的.不失一般性,假设*D*和汇聚点的距离是*d*,如图 4 所示.当*d*≤*R*时,表明节点*i*的当前目的地点*D*位于汇聚点通信范围内,因此,

$$P_i = 1 \tag{7}$$

当*d*>*R*时,令

$$P_i = \frac{\theta}{360} \tag{8}$$

其中, $\theta$ 表示目的地点*D*与汇聚点通信范围两切线的夹角,称为通信角度.根据三角公式和直角三角形的性质,易知

$$\theta = 2\arcsin(R/d) \tag{9}$$

把公式(9)代入公式(8)得:

$$P_i = \frac{2\arcsin(R/d)}{360} \tag{10}$$

可见,已知传输半径*R*及当前目的地点*D*与汇聚点的距离*d*,就可以计算出节点当前的传输概率值*P<sub>i</sub>*,并且目的地点*D*离汇聚点越近,通信角度 $\theta$ 越大,相应传输概率*P<sub>i</sub>*的值也越大.

### 3.1.2 数据传输算法

数据消息的传输根据传输概率进行,我们同样考虑节点*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'*个其他传感器节点,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*P<sub>i</sub>*,然后,节点*i*直接把消息复制给

$Z'$ 中所有满足  $P_{\psi z} > P_i$  的子节点  $\psi z$ .具体算法如图 5 所示.

```

 $\Phi=0$ 
for  $z=1; z \leq Z'; z++$  do //identify receiving sensors
  if  $P_i < P_{\psi z}$  then
     $\Phi = \Phi \cup \psi z$ 
  end if
end for
for  $n=1; n \leq |\Phi|; n++$  do //| $\Phi$ | represents the number of nodes in  $\Phi$ 
  forward message ( $j, n$ ) //forward message  $j$  to all the  $\Phi$  sensor nodes
end for

```

Fig.5 Pseudo-Code of the routing algorithm

图 5 路由算法伪码

显然,上述算法会导致一个消息产生多个副本.如何有效地管理这些副本,则需依靠下面将要介绍的队列管理机制.

### 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其中自身产生的那部分消息的副本.因此,网络中就时刻产生并维持了大量的数据消息,导致了冗余的产生.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.本文采取的队列管理策略是根据消息的生存时间进行的,生存时间即消息在网络中的存活时间,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.

#### 3.2.1 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.下面我们同样以传感器节点  $i$  为例,令  $C_i$  代表节点  $i$  的本地计时器,  $\xi_i^j$  表示节点  $i$  的存储队列中消息  $j$  的生存时间值,用来计算消息的生存时间.

当消息初次产生时,此消息的生存时间被初始化为 0;当节点  $i$  将其存储队列中的任一消息  $j$  转发到其通信范围内的节点  $\psi z$  ( $\{\psi z | 1 \leq z \leq Z'\}$ ) 时,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,节点  $\psi z$  中消息  $j$  的初始生存时间保持当前值不变;对于需要重新放回到节点  $i$  中的消息  $j$ ,其重新入队时的生存时间同样保持刚才发送时刻的值不变.另外,对于节点  $i$  存储队列中的所有消息,从被节点  $i$  接收到被发送出去之前这段时间内,其生存时间要随着计时器的计时逐步增大.设节点存储队列最多能够容纳  $K$  个消息,整个算法流程如图 6 所示.

```

1.  $a[i] \leftarrow C_i$ ; //  $a[i]$  keep the current value of  $C_i$ 
2. if (Receiving a NEW_SELFGENERATE_MSG  $j$  from node  $i$ )
3.    $\xi_i^j = 0$ 
4. else
5. if (receiving a DATA_FOWARD_MSG  $j$  form node  $n$  to node  $i$ )
6.    $\xi_i^j = \xi_n^j$ 
7. else
8. if (receiving a SELF_BACK_MSG from node  $i$  to node  $i$ )
9.    $\xi_i^j = \xi_i^j$ 
10. endif
11. For ( $j=1; j \leq K; j++$ ) //  $j$  represent messages maintained by sensor  $i$ 
12.   while ( $j$  is in the queue of node  $i$ )
13.      $\xi_i^j = \xi_i^j ++$ 
14.   endwhile
15. endfor

```

Fig.6 Pseudo-Code of updating the survival time

图 6 生存时间更新伪代码

对于每个传感器节点,随着计时器的计时,时刻都要执行以上过程,根据消息的不同类型(初始产生、重新放回、其他节点传送来的消息或存在于本节点队列中的消息)进行生存时间的更新.总的来说,消息产生得越早,它的生存时间就越长.

### 3.2.2 队列管理的实现

每个传感器节点均有一个存储队列保存准备发送的数据消息.这些消息有3个来源(如图7所示):a) 当节点从自身的传感单元获取收集的数据时,将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,它可能在队列中保存发送出去的消息中属于自身产生的那部分消息的复本,因为网络并不能保证发送出去的消息最终能够被汇聚点接收.

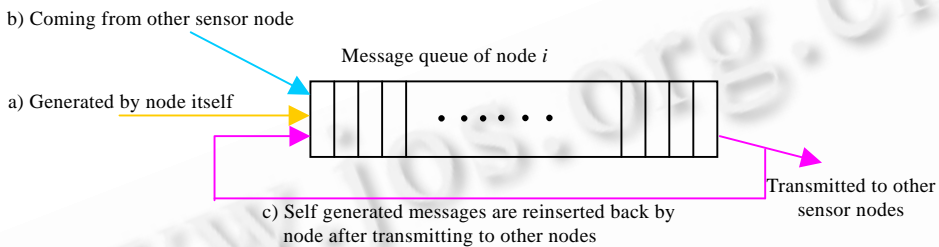


Fig.7 Source of messages in the queue

图7 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,以下两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时,我们把新到消息的生存时间与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 $\theta$ ),则立刻丢弃此消息.这样做的主要目的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.

## 4 模拟实验

我们模拟实现了 SRAD、FAD、直接传递算法和泛洪算法,从以下3个方面进行了性能比较:

- 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) 分析比较 SRAD 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.

模拟实验中,在分析各个算法的网络寿命时,我们采用了与文献[20]相同的无线通信模型及文献[21]的 GPS 通信模型.根据文献[20],当节点通信半径较小时,传感器节点发送和接收数据的能量衰减符合自由空间模型 (free space).此外,定义所有传感器节点的运动速度  $V$  均相同且在运动过程中保持恒定.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 50s 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.另外,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,节点除了继续接收自己产生的消息以外,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
Speed of sensor node $V$ (m/s)	3
Pause time $T_{pause}$ (s)	0~40
Maximum queue size of sensor	200 message
Size of each message (bite)	200
Message generation rate	0.02/s
Position of sink node	(100,100)
Initial energy of each node (J)	10
Number of dead nodes when network die	50
Energy for GPS communication per time (J)	0.25
GPS communication interval (s)	2.5
Maximum delay tolerant value (s)	7 200
Fault tolerance threshold of FAD	0.8
$\alpha$ of FAD	0.4
Timer expiration value $\Delta$	3

#### 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。可以看出,4 种算法中 SRAD 的传输成功率最高,达到 92.3%,远远高于其他 3 种算法,因此具有更好的监测质量,即能够提供更为精确的感知数和更多的环境信息。直接传递的传输成功率最低,因为这种策略下传感器节点只与汇聚点发生消息通信。若传感器节点不与汇聚点相遇,则节点的消息永远不会被汇聚点接收。另外,泛洪的传输成功率略大于直接传递算法,这是由队列管理策略引起的。具体来说,存储队列满后节点仍然继续接收自身产生的消息而丢弃原来入队的一些消息。这使得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够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。实验中我们还发现,FAD 的性能很不稳定,其中,定时器超时 $\Delta$ 和参数 $\alpha$ 的选取对 FAD 性能的好坏影响非常大。当取默认参数及超时 $\Delta=3$ 时,参数 $\alpha$ 的不同取值对传输成功率的影响如图 8 所示。不难看出,随着 $\alpha$ 的增大,FAD 的传输成功率呈逐步下降趋势。这主要因为 FAD 是基于历史纪录来计算传输概率的,若 $\alpha$ 较大,则每次发生消息传输后,节点传输概率的数值在原来的基础上增加较多,从而不能准确反映原历史纪录的状况,因此传输概率的计算准确率下降,进而导致传输成功率大为降低。同时还可以看出,当 $\alpha=0.1$ 时,FAD 的传输成功率最高,达到 75%,但仍远远低于 SRAD。此外,图 9 还给出了当 $\alpha$ 值固定, $R=10$ 时 $\Delta$ 值对 FAD 性能的影响。可以看出, $\Delta$ 值在一定范围时算法性能较好,当 $\Delta$ 值较大时,FAD 的性能急剧下降。这主要是由于若 $\Delta$ 值太大,当某传感器节点不发生消息通信时,此节点就会很久都不降低它的传输概率值,对其他传感器造成欺骗,其他传感器节点都将消息传给此节点,造成了误传,因此性能下降。相反,SRAD 稳定、控制开销小且性能好。

表 2 还显示了各种算法的平均传输延迟和平均传输能耗,后者即平均消息的副本数。可见,直接传递算法的传输能耗最低、传输延迟最长,因为传感器节点只与接收节点发生直接通信。泛洪算法的队列管理策略使其传输能耗较大、传输延迟稍低于直接传递算法。另外,SRAD 的传输延迟低于 FAD 算法,这是因为 SRAD 的下一跳节点的选择比 FAD 算法准确,因此消息转递较少的跳数就能被传输到接收节点。而在传感器节点随机运动情况下,基于历史纪录方法计算传输概率并不十分有效,致使消息被转递的跳数较多,传输延迟也相应增长。同时,有效的消息管理和队列管理机制还使得 SRAD 的传输能耗低于 FAD 和泛洪算法。

Table 2 Simulation results comparison with default parameters

表 2 默认参数下仿真结果的对比

	SRAD	FAD	Direct transmission	Flooding
Delivery ratio (%)	92.3	70.1	57.0	64.8
Average copies for each message	6.5	10.8	1	9.8
Average delay (s)	121.4	185.0	818.2	731

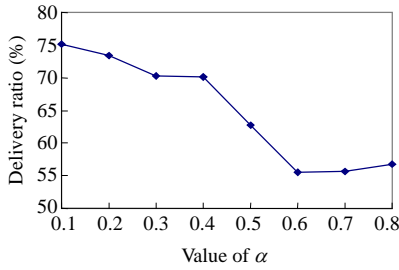


Fig.8 Delivery ratio vs. value of  $\alpha$   
图 8  $\alpha$ 取值对传输成功率的影响

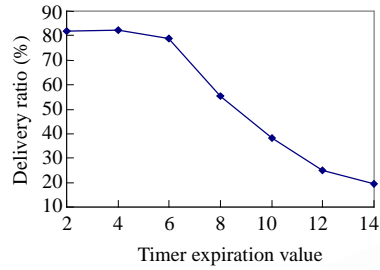


Fig.9 Delivery ratio vs. value of  $\Delta$   
图 9  $\Delta$ 值对传输成功率的影响

### 4.2 通信半径对性能的影响

本组实验主要研究在不同节点通信半径情况下,采用各种算法所能达到的平均传输成功率以及所需的平均能耗和平均延迟.在该组实验中,设定其他参数保持默认值恒定,模拟结果如图 10 所示.

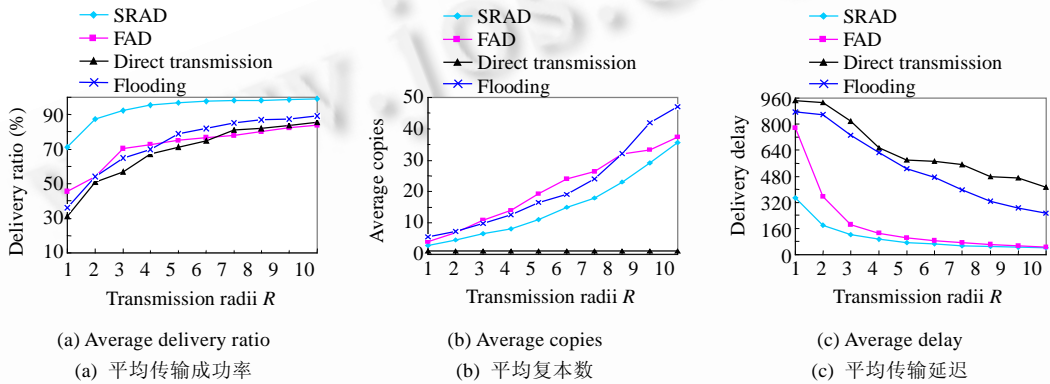


Fig.10 Impact of transmission radius  
图 10 通信半径的影响

从图 10(a)不难看出,SRAD 的消息传输成功率远远高于 FAD、直接传递以及泛洪算法,尤其当节点的通信半径较小时更是如此.当节点的通信半径较大时,各种算法的消息传输成功率都较高,这是因为节点通信半径大就意味着节点的通信范围较大,因此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就较大,从而增加了消息被转递的机率.此外,节点通信范围的扩大也提高了传感器节点与汇聚点的通信概率.我们知道,节点的传输能耗主要用于数据传输,因此网络中平均消息复本数越多,传感器能量就消耗得越快.图 10(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.此外,由于 SRAD 有效的队列和消息管理机制,SRAD 的平均消息复本数永远小于 FAD 和泛洪算法,说明 SRAD 的传输能耗低.图 10(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,因为通信半径增大会增大消息传输到汇聚点的概率.由于 SRAD 下一跳节点的选择最有效(更能与汇聚点发生通信),因此它的平均传输延迟最低.

### 4.3 节点密度对性能的影响

由于网络的拓扑结构与传感器节点的密度相关,本组实验主要研究不同节点密度情况下不同算法的性能.节点密度的变化通过改变节点的总数量  $N$  来实现,实验结果如图 11 所示.

从图 11(a)可以看出,采用 SRAD 可以显著提高 DTMSN 的传输成功率.并且随着节点密度的增大,4 种算法的传输成功率大体不变,可见它们的传输成功率与节点密度无关.考虑消息的平均复本数,图 11(b)显示随着节点密度的增大,SRAD, FAD 以及泛洪算法的平均消息复本数均有所上升.这是因为密度增大导致每个传感器节点邻居数量增多,从而引起满足传输条件的邻居数量的增多,进而引发了消息复本数的上升.另外,图 11(c)讨论

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,因此随着节点密度的增大,传输延迟变化不大.而节点密度增大有利于减少消息从数据源节点到汇聚点的跳数,因此降低了SRAD和FAD的传输延迟.同时我们还可以看出,随着节点密度增大,泛洪算法的平均传输延迟却有所上升.这主要因为节点密度小意味着每个传感器节点包含的邻居数量少,那么经过很长的时间节点的存储队列才被泛洪产生的消息复本填满.因此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较少,总的平均传输延迟较短.而当节点密度较大时,经过很短的时间存储队列就被消息复本填满,之后入队的节点自身产生的消息增多.由于这部分消息仅能被本节点传送给汇聚点,因此尽管节点密度的增大减少了消息复本传递到汇聚点的跳数,但总体来看传输延迟仍有所增长.

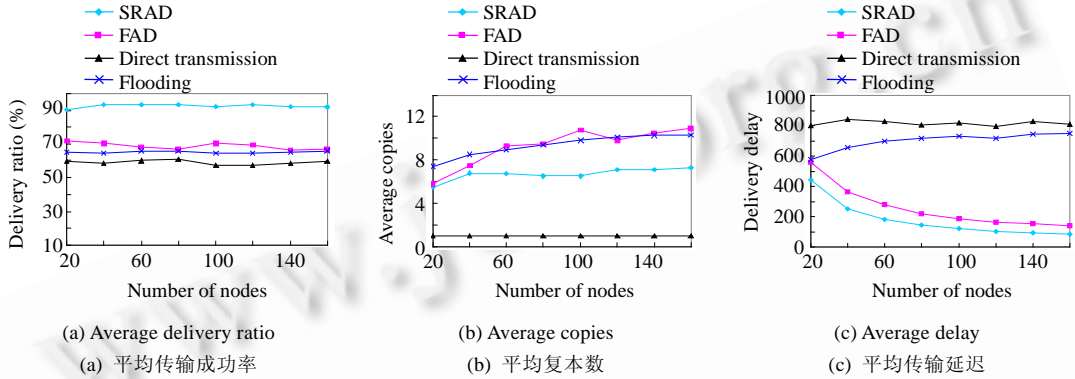


Fig.11 Impact of node density

图 11 节点密度的影响

4.4 节点运动速度对性能的影响

网络的性能与传感器节点的运动速度紧密相关,因此本组实验研究其他默认参数固定、改变节点的运动速度对 4 种算法性能的影响,实验结果如图 12 所示.

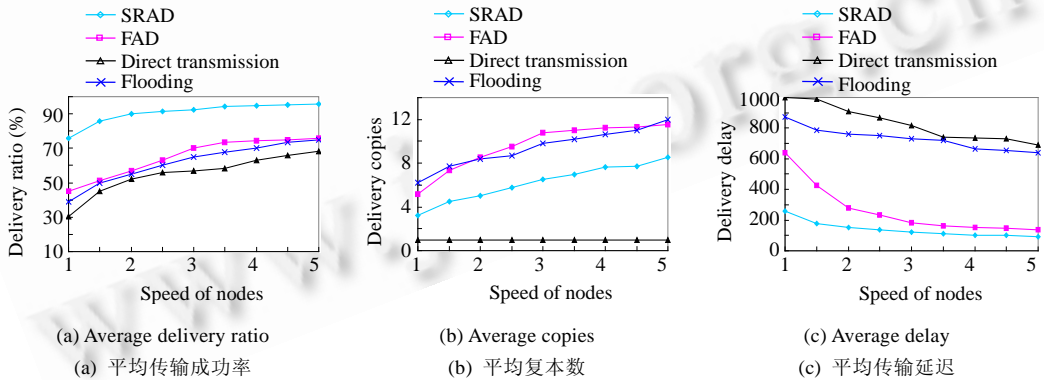


Fig.12 Impact of node moving speed

图 12 节点运动速度的影响

从图 12(a)可以看出,SRAD 可以达到最高的传输成功率.当传感器节点运动速度加快时,4 种算法的传输成功率均逐渐上升,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复本数及平均传输延迟都有一定的影响(如图 12(b)所示);节点运动速度加快还引起了 SRAD,FAD 和泛洪算法传输能耗的增加,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复本数增加而造成的.从图 12(c)可以看出,随着节点运动速度的加快,4 种算法的平均传输

延迟均降低,这是因为节点运动速度加快后,消息能够通过较少的跳数传输到汇聚点.

4.5 存储队列长度对性能的影响

本组实验主要研究采用不同长度的存储队列情况下,各种算法的性能.存储队列长度表示节点所能容纳的最大消息数量,实验结果如图 13 所示.

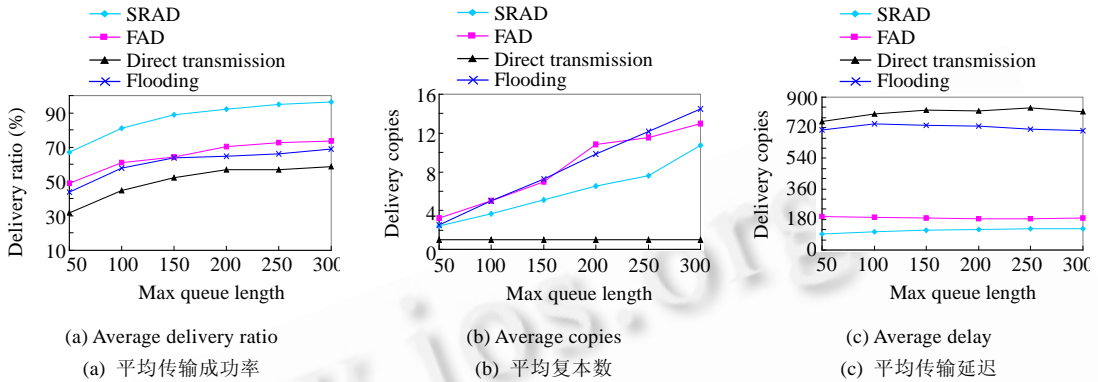


Fig.13 Impact of queue length

图 13 队列长度的影响

从图 13(a)可以看出,随着节点存储队列长度的增加,4 种算法的传输成功率均呈现增大的趋势.这是由于存储队列的增长使节点所能容纳的消息增多,消息在被丢弃之前能够在存储队列中存放更长时间,从而更利于把消息传输到汇聚点.实验中我们还发现,存储队列长度对泛洪算法的性能影响最大,当队列长度达到 8 000 时,泛洪算法能够达到 98.9%的平均传输成功率.当存储队列长度较短时,SRAD 的传输成功率就非常高,这说明 SRAD 的性能较好.图 13(b)表明了节点存储队列长度的增加还使 SRAD,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长度的增加使节点能够容纳的消息数量增大所引起的.但 SRAD 始终能够有效地控制消息复本的数量,使它远远低于泛洪和 FAD 算法产生的消息复本.图 13(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影响.

4.6 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.实验结果如表 3 和图 14 所示.

Table 3 Network life with default parameters

表 3 默认参数下的网络寿命

	SRASD	FAD	Flooding	Direct transmission
Network lifetime (day)	1.967	1.954	0.51	577

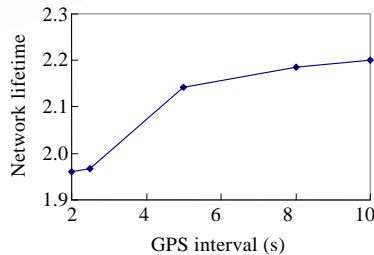


Fig.14 Network life as the GPS time interval in SRAD

图 14 GPS 时间间隔和 SRAD 网络寿命的关系

从表 3 可以看出,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除了自己产生

的消息以外不再接收和发送任何其他节点的数据消息,因此节点的能量消耗极小.泛洪算法的网络寿命最短,这是由于节点处于泛洪状态时产生的消息副本数太多造成的,而过多的数据消息需要消耗大量的传感器能量.此外我们还可以看到,SRAD 的网络寿命略大于 FAD,这是因为 SRAD 中数据消息的平均副本数小于 FAD,虽然 SRAD 需要额外的 GPS 通信开销来确定节点的位置,但由于数据消息通信所需能耗的降低,总的来说,SRAD 的网络寿命还略大于 FAD.

图 14 显示了采用 SRAD 策略的网络寿命与 GPS 定位时间间隔(即多长时间获取一次位置信息)的关系.可以看出,随着定位间隔的增大,网络寿命逐步延长.这是因为 GPS 定位时间间隔越长,整个网络消耗的 GPS 通信定位能量越小.此外,虽然 GPS 定位间隔对网络寿命存在影响,但若把 GPS 定位间隔控制在一定时间范围内,它对网络的其他性能值的影响就不是很大.这是因为在采用 RWP 随机运动模型时,一定时间内节点都在朝着一个特定的方向运动(仿真发现节点的平均运动时间约为 34.67s),这样,虽然在确定下一跳节点时各个节点位置信息不够准确,但由于节点的运动方向不变,此时判断下一时刻各个节点与汇聚点的位置关系基本上还是准确的.

## 5 结 论

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 所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.为了有效地收集 DTMSN 网络中的数据,本文提出了一种基于选择复制的动态数据传输策略 SRAD.与已有工作相比,SRAD 的主要贡献表现在于以下几个方面:

- (1) 提出了一种有效的动态路由机制,始终选择与汇聚点通信概率较大的传感器节点作为下一跳传输节点.因此,SRAD 的传输成功率比 FAD 高,平均传输延迟也比 FAD 要低.
- (2) SRAD 引入有效的队列管理机制,可以有效地丢弃网络中的一些过时消息,从而节省了网络带宽和传感器的能量.

大量的模拟实验验证了 SRAD 的优异性能,与现有的几种 DTMSN 数据传输算法相比,SRAD 的数据传输成功率高,传输能耗低且性能好.

## References:

- [1] 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>
- [2] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102–114.
- [3] Leguay J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space. In: Guerin R, ed. *Proc. of the ACM Workshop on Delay Tolerant Networking and Related Topics (SIGCOMM 2005)*. New York: ACM Press, 2005. 276–283.
- [4] 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.
- [5] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. In: Feldmann A, ed. *Proc. of the ACM Conf. on Computer Communications (SIGCOMM 2003)*. New York: ACM Press, 2003. 27–34.
- [6] 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.
- [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). 2006. <http://down.dsg.cs.tcd.ie/sendt/>
- [9] Shah RC, 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*. Anchorage: IEEE Computer Society Press, 2003. 30–41.
- [10] Wang Y, Wu HY. 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] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report, CS-200006, Durham: Duke University, 2000.
- [12] Juang P, Oki H, Wang Y, Martonosi M, Peh LS, Rubenstein D. 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 ZJ. 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 HY. 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 Press, 2006. 485-489.
- [15] Wang Y, Wu HY, 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] LeBrun J, Chuah CN, Ghosal D, Zhang M. Knowledge-Based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In: Uddenfeldt J, ed. Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC). Stockholm: IEEE Press, 2005. 1-5.
- [17] Zhao WR, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In: Murai J, ed. Proc. of the 5th ACM Int'l Symp. on Mobile ad hoc networking and computing (Mobihoc). New York: ACM Press, 2004. 187-198.
- [18] Neely MJ, Modiano E. Capacity and delay tradeoffs for ad-hoc mobile networks. IEEE Trans. on Information Theory, 2005,51(6): 1917-1937.
- [19] Mukhtar O, Ott J. Backup and bypass: Introducing DTN-based ad-hoc networking to mobile phones. In: Conti M, ed. Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: From Theory to Reality. New York: ACM Press, 2006. 107-109.
- [20] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.
- [21] Huang JH, Jiang L, Kamthe A, Ledbetter J, Mishra S, Cerpa A, Han R. SenSearch: GPS and witness assisted tracking for delay tolerant sensor networks. Technical Report, TR-2006-001, University of California, 2006.

#### 附中文参考文献:

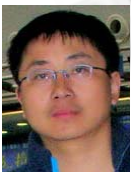
- [1] 刘明, 龚海刚, 毛莺池, 陈力军, 谢立. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议. 软件学报, 2005, 16(12): 2106-2116. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>



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



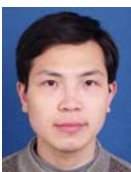
陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为分布式与并行计算.



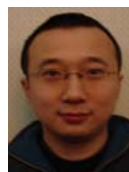
刘明(1973—),男,博士,副教授,主要研究领域为移动计算,传感器网络技术.



许富龙(1980—),男,博士生,主要研究领域为移动计算.



龚海刚(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络.



宋超(1981—),男,博士,主要研究领域为无线传感器网络,延迟容忍网络.