

延迟容忍传感器网络中基于群组运动的事件传输*

吴磊¹, 王晓敏¹, 刘明¹⁺, 陈贵海², 龚海刚¹

¹(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

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

Group Mobility Adaptive Event Delivery Scheme for Delay Tolerant Mobile Sensor Networks

WU Lei¹, WANG Xiao-Min¹, LIU Ming¹⁺, CHEN Gui-Hai², GONG Hai-Gang¹

¹(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

²(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

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

Wu L, Wang XM, Liu M, Chen GH, Gong HG. Group mobility adaptive event delivery scheme for delay tolerant mobile sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(3): 629-647. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3971.htm>

Abstract: This paper proposes an efficient event delivery algorithm called distributed group mobility adaptive event delivery (GMED) for delay tolerant mobile sensor networks (DTMSN). GMED is designed to establish a group-based event delivery model by effectively finding and utilizing the groups generated by moving sensor nodes which then lead an improved performance: On one hand, Inter-Group delivery will be achieved by multi-replica delivery based on its delivery probability to the sink. On the other hand, Intra-Group delivery will be performed by single-replica delivery through established transmission paths because each node have stable neighbor sets inside group. Meanwhile, delivery prioritizing will be based on event priority in the queue. Furthermore, a redundant replica control mechanism is also introduced to optimize replica management and network overload. Simulation results have shown that GMED not only achieves a relatively long network lifetime, but also has a higher message delivery ratio at lower transmission overhead and delay than other DTMSN data delivering approaches.

Key words: DTMSN (delay tolerant mobile sensor networks); group mobility; opportunistic probability; transmission path

摘要: 提出了一种基于分布式群组移动的事件分类传输策略 GMED(distributed group mobility adaptive event delivery). 通过有效地发现和利用传感器节点在运动过程中形成的群组, 建立基于群组的事件分类传输模型, 改善数据传输性能. 其中, 群组的转发是依据各自与汇聚点的机会概率按照多副本方式进行的; 而群内的事件传输则是基于各成员的稳定邻居集建立传输路径, 并以单副本方式进行. 队列管理则根据事件的优先级决定递交的顺序和丢弃原则. 此外, 引入冗余副本控制机制, 优化副本管理, 降低网络负载. 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, GMED 能以较低的数据传输能耗和传输延迟获得较高的数据传

* 基金项目: 国家自然科学基金(61003229, 61170256, 61173172, 61103226); 四川省科技支撑计划项目(2009GZ0004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(ZYGX2010J111, ZYGX2010J074, ZYGX2011J102)

收稿时间: 2010-09-13; 定稿时间: 2010-11-17

输成功率,且网络寿命相对较长.

关键词: 延迟容忍传感器网络;群组运动;机会概率;传输路径

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

随着无线传感器网络的深入研究与应用,移动传感器网络正逐渐受到越来越多的关注和重视.与传统传感器网络不同的是,移动传感器网络利用中间移动节点机会性地存储转发报文,因此也称为机会网络(opportunistic network)^[1].由于网络更多地关注于收集数据的完整性和正确性,往往对延时的要求不高,故也称其为延迟容忍移动传感器网络 DTMSN(delay tolerant mobile sensor network)^[2].DTMSN 具有动态拓扑、间断连通并且能够容忍较高的数据延迟等特点,尤其适合网络呈间断连通和拓扑动态变化的场景应用.例如:把传感器附着在动物身上,收集它们的生活习性和迁徙特性^[3];人身携带微型传感器收集人群流感病毒的传播情况^[4]以及通过车载传感器收集城市环境和交通状况^[5]等.与一般应用相比,这些应用场景中,物体的随机或规律性运动可能导致节点之间的非连通性.故基于网络连通性假设的数据收集算法并不适用于 DTMSN 的环境.

另一方面,当前,针对网络间歇性连通的数据收集和路由算法多是基于节点互不相干的独立运动假设^[3,6-8],如随机行走模型(random walk model)^[9]和随机点模型(random waypoint model)^[9],这与许多实际场景下物体的运动模式不符.在现实的应用中,节点的运动往往呈现一种“群运动”行为特征^[10],并且带有一定的规律性.比如:城市场景中,车辆的运动是一种有目的的行为,而不是一种完全无规则的游走,这在一定条件下会导致车辆间形成一定的、有序的自组织结构.日常生活中,人的运动轨迹会受到职业、生活习惯以及时间等因素的影响,并且以不同的社交群体出现;类似的还有,战场环境下的部队行军、紧急抢险中的救援分队以及动物群落迁徙等.显然,在带有“群运动”特征的应用场景中,群内节点间的路由策略与不同群节点间的路由策略应该是有区别的.为了达到最好的网络设计性能,在研究网络协议和进行网络设计时应充分考虑节点自身的运动特性.此外,对传感器网络的数据收集技术的研究中,大多数都是围绕如何把数据无区分的汇集到单个或多个汇聚点进行的.而在实际应用中,传感器收集的数据信息种类是多种多样的,不同的接收者可能只对某种信息感兴趣,因此,如何在 DTMSN 环境下进行数据信息的收集处理面临着许多新的问题和挑战.

本文根据 DTMSN 的特点,考虑部队行军、搜索及救援等实际场景中节点的“群组运动”特征,结合 RRG^M^[11]模型,提出了一种基于分布式群组运动的分类事件传输策略 GMED(distributed group mobility adaptive event delivery).网络中的传感器节点依据它们的运动状态和相互接触时长形成若干群组(group),事件的发布与传输采用两级路由模式:(i) 不同群组根据各自对汇聚点的机会概率按照多副本方式进行;(ii) 群内的事件传输则基于成员节点的稳定邻居集合,建立传输路径并以单副本方式进行.其中,机会概率的计算借鉴了蚁群觅食原理,根据各汇聚点的广播信号强度信息,建立与维护群组与汇聚点的机会概率表,并以此为依据控制事件在网络中的转发,从而将事件传递从个体转发提升到群体转发,避免了群内节点之间可能出现的无效回传,有效地控制了网络的开销,同时也保证了传递的有效性.此外,GMED 引入冗余副本控制机制,优化副本管理、降低了网络负载.队列管理则根据估算的事件优先级来决定递交的优先顺序和丢弃原则,以提高网络传输性能.实验结果表明,在具有群运动特征的 DTMSN 环境下,GMED 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获得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网络模型进行描述.第 3 节给出 GMED 的详细描述.第 4 节进行模拟验证.最后总结全文.

1 相关工作

DTMSN 本质上是一种机会移动传感器网络.由于网络中同一时刻可能不存在从传感器节点到 sink 点的连通路,因此需要充分利用节点移动的通信机会,采用“carry-and-forward”的模式转发消息.近年来,研究人员针对 DTMSN 环境下的数据传输,提出了多种基于机会通信的转发机制^[4,6-8,12-26].

其中,最直接的传输机制包括直接传输^[6]、传染病由^[12].直接传输(direct transmission)网络开销小,但是传输

延时大、传输成功率低.而 Vahdat 等人提出的传染路由(epidemic routing)则由于在网络中盲目复制转发数据,导致资源消耗严重,其性能会严重降低.针对这两种极端情况,Spyropoulos 等人提出了基于效用与单副本的搜索聚焦路由协议^[13].该协议要求每个节点都记录上次接触以后的时间,该值可以包含相对位置信息,通过当前信息以及对未来连接的预测进行本地转发决策.尽管基于效用的单副本路由协议降低了资源的消耗,但却带来了较大的延迟.因此,Spyropoulos 对该协议进行扩展,提出了扩散等待(spray and wait)和扩散聚合(spray and focus)路由协议^[14].对于扩散等待路由协议,在扩散阶段,源节点将 L 个消息副本独立地分发给 L 个中继节点;在等待阶段, L 个中继节点执行直接传输,即仅将消息传输到目标节点.如果节点限制在较小的移动范围或者移动具有很强的关联性,则扩散等待路由协议的性能将会有所下降.为了克服这个问题,扩散聚合路由协议对其进行改进,即在聚合阶段使用了文献[13]中基于效用的路由协议,使消息转发给具有更高效用的节点.文献[15]针对机会网络中多种类型数据具有不同传输质量的需求,提出了一种自适应的数据收集机制,通过计算节点的转发概率和消息的重要因子,动态地为不同重要度的消息提供不同的传输质量,并有效控制了网络开销.朱金奇等人^[7]设计了一种基于选择复制的传输策略,节点根据自身的位置信息、sink 点的坐标以及速度矢量计算传输概率,实现消息的转发复制.然而,基于 GPS 的节点实时定位需要消耗大量的能量,影响了网络寿命;根据 sink 点坐标计算传输概率,使该算法无法适用于移动 sink 点的数据收集场景.Hass 等人在文献[8]中讨论了采用 SWIM 系统收集鲸的生物信息的场景,嵌入在鲸身上的传感器节点周期性产生感知数据,并将生成的数据消息拷贝给每个相遇的鲸传感器节点,当鲸游过部署在海面浮标上的 sink 节点附近时,将数据上传给 sink 节点.该机制实际上是传染转发式,如果节点的缓存足够大,这种机制的数据传输成功率就高,但网络开销很大.

Princeton 大学的 ZebraNet 项目^[16]使用移动传感器监测斑马的生活习性:每个传感器节点均保存它把数据直接成功转发给汇聚点的历史级别,当传感器节点之间相遇后,由历史级别低者向高者传输数据.然而,由于节点与基站相遇的机会很少,故数据的传输可靠性很低.Wang 等人^[4]对其转发机制进行了改进,传感器节点的传输概率不仅在与基站相遇时增大,而且与传输概率高的其他节点相遇就会也增大.为了达到传输成功率和传输延迟/能耗的平衡,Wang 等人还建议了 FAD(fault tolerance delivery scheme)策略^[17,18].该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.另外,FAD 忽略了消息的存活时间,因此可能出现某些传输延迟已超过了网络延迟容忍限度的消息仍继续存留于网络中消耗网络资源的现象.此外,文献[19]所提出的 SCAR(sensor context-aware routing)机制依靠节点上下文信息定义传输概率,利用卡尔曼滤波预测节点上下文信息的变化,并用多属性效用理论估算其传输概率.而文献[20]中的 ProPHET 协议则是基于历史记录预测节点接触概率,中间节点收到消息后,根据网络的历史接触记录估计下一跳到目的节点的概率,进而有选择地转发数据包.尽管上述方法可以较好地控制网络开销,但在不同的网络环境中传输质量仍相差很大,缺乏灵活性.

另一方面,基于移动模型的路由算法则需要提取网络某些方面的特征对路由进行优化.比如在文献[21]中,Daly 等人基于社会网络(social network)具有小世界特性的基本思想,提出了基于社会网络分析技术的路由算法 SimBet,利用一些连通度较高的节点作为“桥”,以此辅助路由转发;文献[22]则提出了一个基于社会网络的分布式路由算法 Bubble,该算法主要利用具有高向心性的节点或与目标节点处于同一社区的节点来转发报文,提高报文转发的效率;Paolo 等人针对 DTN 中发布/订阅模式的应用,提出了 SocialCast^[23]路由框架,主要是利用社会网络模型和对移动模型的观察进行预测以识别最佳的中继.相关的研究还包括文献[24–26],文献[24,25]首先提出了一个在高维欧氏空间下形式化节点移动模式的方法,称为 MobySpace,然后利用该方法对实际的容迟网络进行建模,进而提出了基于 MobySpace 的路由算法;而文献[26]则针对节点周期性地运动并以一定概率相遇的 DTN 网络提出了一个机会路由算法 RCM.综上所述,深刻理解网络的基本性质,考虑应用场景、网络结构、性能需求和部署成本等因素,是正确、有效地设计路由传输策略的关键.

2 网络模型与问题分析

本节将具体介绍采用的网络模型和基本假设,在网络模型中引入群组概念,用于分析延迟容忍移动传感器

网络中的数据分类传输问题.

2.1 网络模型与假设

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.其中, A 被划分为若干大小相同的方格,令方格的边长为 D .同时, K 个汇聚点也部署在区域 A 内.设所有传感器节点的消息传输半径为 r ,汇聚点(sink)的消息广播半径为 R ,这里, $r \ll R$.此外,假设该传感器网络具有如下性质:

- 每个传感器节点都有各自唯一的编号.它们的运动规律符合文献[11]中的参考区域群组移动模型(RRGM).在该模型中,每个群与一个参考区域关联,群组节点向参考区域运动.当群内所有节点到达该参考区域后,模型会产生新的参考区域位置;

- 设汇聚点以基站或车载形式出现,因此位置可移动或随机确定.节点之间无交互,且有各自编号.此外,各汇聚点只对特定类型事件感兴趣,且事件只有一种类型属性.这里设移动汇聚点按照 RWP(random waypoint model)运动模型^[9]随机运动;

- 汇聚点具有较强能力,包括计算、存储、能量等.能够周期性地以较大功率发送 beacon 报文;

- 传感器节点没有装备 GPS,也不能通过测量的方法知道其具体位置,且发送和接收数据的能量衰减符合自由空间模型(free space);

- 传感器节点接收到邻居节点的广播包后,在链路/物理层可以探测到其功率大小,记录并上传网络层.

模型的第 1 项属性规定了传感器节点的移动特性,RRGM 作为一种典型的网络群组运动模型,适合于军事行动、搜索和救援行动的群组节点的运动模拟,近年来在移动网络研究中被广泛应用.需要注意的是:该模型中,凡群涉及到的参考区域均是指以 D 为边长的方格区域(如图 1 所示).此外,各群组均以随机产生的参考速度运动,而群内各节点则以一定范围内的随机偏移量做群内的相对运动.

第 2 项属性假设汇聚点数量可以不唯一,并且以静止的基站或移动的车辆出现,更接近网络的真实部署情况;同时,模拟实现了一定程度上的事件分类传输场景.注意:一个事件只能属于某种特定类型,被某一个汇聚点接收.

关于第 3 项属性的假设,使得汇聚点能以很高的发射功率工作,覆盖较大区域(即 $r \ll R$),且不受能量的限制.

第 4 项属性有利于节省节点成本和能量,同时也表明,在不考虑环境噪声的情况下,接收信号强度是一个随距离增加而递减的函数.

第 5 项属性则可以使节点获得相邻节点功率的变化率及方向,进而得到稳定邻居度量和本地运动度量.

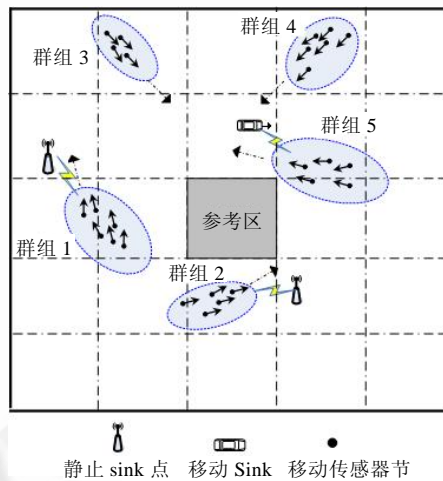


Fig.1 Traveling pattern of moving group using reference region group mobility model

图 1 采用 RRGM 运动模型的群运动

2.2 相关定义

定义 1(邻居节点). 节点 v_i 的邻居节点指的是在其通信范围内的所有节点.节点通过周期性的 hello 消息获知邻居节点存在的信息,并保存在邻居表(neighbors table)中.

这里,采用全向的、通信半径为 r 的理想圆周传输模型.为了确保对圆周区域内的邻居节点的有效检测,传感器节点均以固定功率广播 hello 消息,探测邻居节点的存在.

定义 2(稳定邻居节点). 节点 v_i 的邻居集合中,在一段时间内,能与 v_i 保持较稳定通信链路的邻居节点.例如图 2 中:邻居 v_j 与 v_i 相互靠近,因而之间能建立稳定链路;而邻居 v_k 正远离 v_i ,故之间缺乏稳定的通信链路.

根据假设可知,节点不能获知位置和运动速度,又因为 hello 探测消息是以固定功率广播,故可通过相邻节点对 hello 消息的接收功率的变化来判断节点间的相对移动.设 $Pr_{new}(i,j)$ 为当前时刻节点 v_i 接收到 v_j 的 hello 消息的接收功率, $Pr_{old}(i,j)$ 为上一时刻的接收功率.若 $Pr_{new}(i,j)/Pr_{old}(i,j) \geq 1$,则判断 v_i, v_j 之间相互靠近,两节点的稳定性强;反之,则两节点的稳定性较弱.

定义 3(边界节点). 节点的邻居集合中存在另一个群组的节点,该节点即为所属群组的边界节点.

定义 4(边界网关). 节点的稳定邻居集合中存在另一个群组的节点时,该节点即为所属群组的边界网关.

定义 5(头节点). 负责对整个群组进行组织和维护,并且负责群相对各 sink 节点的机会概率的计算和更新.

定义 6(机会概率). 节点所属群组与 sink 点建立通信链路的可能性.机会概率越大,则群组与相应 sink 节点建立通信链路的可能性就越大,事件被传递给该 sink 节点的几率也就越高.

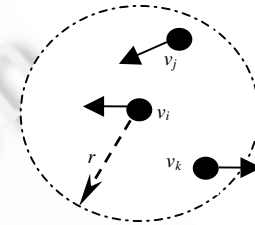


Fig.2 Node v_i 's neighbor

图 2 节点 v_i 的一跳邻域

2.3 问题分析

由于 DTMSN 中的节点移动,导致网络的拓扑动态变化,而节点的移动轨迹很难预测,因而数据的转发路径无法预先确定.在目前对 DTMSN 传输算法的研究中,大多数方法均是基于实体移动模型的场景,其单个节点的运动方式和状态独立于其他节点.然而,与其不同的是,群组移动模型侧重于描述群内节点的相对运动,强调节点作为群体之一有着共同的运动规律,因而更能反映现实世界中大规模实体之间的运动联系.此外,现有的方法大多侧重于基本的数据转发机制,并未考虑到不同类型数据因其作用不同而需要传输给不同的汇聚节点.

鉴于上述分析,再结合军事行动、搜索救援等带有群运动特点的应用场景,提出了一种基于参考区域群组移动模型,并且又满足多汇聚点事件分类收集要求的动态事件传输策略(GMED).在网络模型中,汇聚点可为静止的基站或运动的车辆或人,这些节点的能量一般较高且存储空间很大,他们保存有各自的编号,并且作为事件的接收者只对特定类型的事件感兴趣.各传感器节点采集数据信息,并充当发布者把这些数据组织成事件进行发送.所有的传感器节点共同负责事件的路由传输.需要注意的是,汇聚点只接收事件,并不参与事件的转发.在路由传输策略中,平均传输成功率是最主要的设计目标,在考虑传输成功率的同时还要兼顾事件的传输延迟和传输能耗,以达到三者之间的平衡.下一节将对 GMED 策略进行具体描述.

3 基于群运动的分类事件传输(GMED)的设计实现

3.1 基本思想

本文借鉴蚁群觅食原理^[27],利用一定程度上反映信道质量的接收信号强度指示值(RSSI)信息建立群到各汇聚点的机会概率,并结合信号强度的变化趋势以反映各群相对汇聚点的移动性.蚁群觅食时,虽不是直线向食物源运动,但却能根据食物的气味在周围环境的浓度变化,朝气味更浓的方向移动.根据第 2.1 节中对网络模型的假设,汇聚事件的基站或车辆不受能量的限制,能以较大功率周期性广播 beacon 消息,向信号覆盖区内的传感器节点宣告自己的存在.若将基站或移动车辆作为食物源,广播的消息作为散发出的气味,则各节点群可根据对汇聚点信号的强度变化估算机会概率路由,使各类数据包能够像蚁群追踪食物源一样,按照群组间的“carry-

and-forward”方式逐步向各类汇聚点汇集,如图 3 所示.

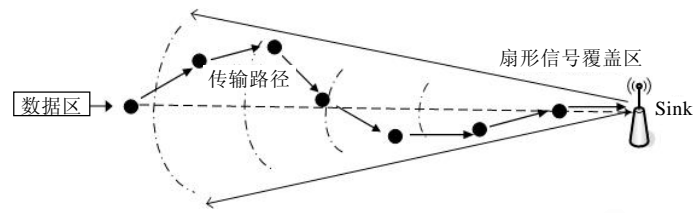


Fig.3 Illustration of packet forwarding

图 3 数据包传输示意图

群内的事件传输则根据各节点的稳定邻居集合,优化传输路径.另一方面,基于事件优先级的存储队列管理对于传输效率和传输延迟的影响非常大.同时引入了副本删除机制,降低了事件的冗余度,进而减少了传感器节点的能量消耗.下面将对 GMED 的各关键部分进行详细的讨论与分析.

3.2 群的建立与维护

在带有群组运动的环境中,单个节点的运动方式和状态依赖于群内其他节点,群内节点的运动相对稳定,并且强节点作为群组之一有着共同的运动规律.在 RRGMM 网络模型^[11]中,群的分解通过设定新目标点来实现.如果出现新的目标点,距离目标点最近的等待群将变为活动群,并向目标点运动;如果没有处于等待状态的群,则从距离目标最近的活动中随机选择一定数量的节点组成新的群,从而实现群的分解.当一个群到达目标点后,该群将变为等待群,与目标点范围内的其他等待群合并成新的群,并向距离最近的参考区域运动.部署在各个运动物体上的传感器节点应能适应这种拓扑变化,有效地对各群组进行维护.

3.2.1 头节点的竞争

设 v_i 为节点 i 的编号, G_i 为节点 v_i 所在的群.当群内的节点超过一个时,需要推选出头节点.在无线传感器网络中,由于头节点需要管理整个群并且负责计算到各汇聚点的机会概率,故其能耗远大于其他传感器节点.为了均衡节点的能量负载,头节点应在所有成员中轮换.设 E 为能量阈值, $E_{residual}^i$ 为节点 v_i 的剩余能量,群内满足 $E_{residual} > E$ 的节点均有资格竞争头节点,这里得到节点广播头节点申明消息 Head-Msg 的时刻,见公式(1):

$$t = k \times T \times E / E_{residual} \quad (1)$$

这里, k 是一个随机均匀分布在 $[0.9, 1]$ 之间的实数值, T 则是事先规定的头节点选择的持续时间,消息 Head-Msg 包括节点的 ID 和 $E_{residual}$.在完成群的设置后,开始竞争群组头,对于节点 v_i ,若满足 $E_{residual}^i > E$,根据公式(1)计算竞争群组头时刻 t ,若 v_i 在时刻 t 前未收到其他节点广播的 Head-Msg,则该节点向群内其他节点广播 Head-Msg 消息宣告自己成为头节点;若在时刻 t 前收到节点 v_j 的 Head-Msg,则退出竞争,并将 v_j 作为群组头.需要注意的是:当 v_j 与 v_i 的剩余能量接近时,在 $(t - \Delta t, t + \Delta t)$ 这段时间内,群内可能同时存在 v_j 与 v_i 的广播 Head-Msg,时隙 Δt 是指在最坏情况下群内所有节点能够收到广播 Head-Msg 的时间.此时, v_j 与 v_i 只需将自身剩余能量与收到的消息 Head-Msg 中记录的对方的剩余能量进行比较,将剩余能量最大的节点作为头节点.类似的,对于群内其他节点而言,将时隙 Δt 内收到的多个 Head-Msg 消息中剩余能量最大的节点作为本群组的头节点.此外,一旦头节点剩余能量值小于阈值 E ,它应立刻发送一个广播消息给群中其他节点,其他节点收到此广播消息后则重新竞争群组头(说明:由于头节点竞争过程中只有少量节点发送 Head-Msg 消息,使得协议的控制消息开销非常小).

3.2.2 群组的维护与更新

(1) 群组的合并

当群 G_a 的边界节点 v_i 检测到邻居节点集合中存在另一个群 G_b 的节点 v_j 时,节点 v_i 记录与邻居群组 G_b 的接触时长 t_{during} .令 t_{merge} 为时间合并阈值.根据定义 1,节点的 hello 消息的发送周期为 Δt ,则 $t_{during} = k \times \Delta t$.这里, k 表示节点 v_i 能连续检测到其邻居集合中存在群 G_b 的节点的周期数.具体的群合并步骤如下:

Step 1. 节点 i 检测到其邻居集合中存在另一群 G_b 的节点时,启动计数器,设 $k=0$;

- Step 2. 若每持续 Δt 时间的 hello 消息发送周期,节点 v_i 均能检测到群 G_b 的节点存在,则 $k=k+1$;
- Step 3. 令 $t_{during}=k \times \Delta t$,若 $t_{during} \geq t_{merge}$,则 v_i 向邻居集合中属于群 G_b 的节点发送合并请求报文 MergeQuest,群 G_b 的节点收到该消息后,判断自身记录的计数器是否满足 $k \times \Delta t \geq t_{merge}$,若为真,向节点 v_i 返回确认消息 Reply,同时将消息在所属群内广播;否则,发送拒绝合并消息 Reject;
- Step 4. 若节点 v_i 收到确认消息 Reply,则将合并消息在本群内广播;否则,计数器清零,转步骤 2;
- Step 5. 群 G_a 与 G_b 的其余节点收到合并消息后,启动群组头竞争流程,重新选择头节点;
- Step 6. 群 G_a 与 G_b 的头节点将保存的到各汇聚点的机会概率表发送至新的头节点进行合并。

注意:这里对邻居群组记录接触时长时,并不要求相邻节点是同一节点.例如: G_a 的节点 v_i 在第 1 个 Δt 周期内检测到邻居集合中存在 G_b 的节点 v_j ,启动计数器 k 计数;若在下一个 Δt 周期内,其邻居集合中只存在 G_b 的另一节点 v'_j ,计数器仍然继续计数.此外,若群 G_a 与 G_b 同时有多个节点向对方发起合并请求,合并流程仍然也只会将 G_a 与 G_b 合并成一个群.关于对机会概率表和其他基本信息的合并操作,第 3.3.1 节中有详细描述.

(2) 群组的分裂

群中的某些节点可能会脱离群进入另一群或单独成为一个新的群.群分裂的判断较为简单.成员节点会周期性地向头节点发送广播消息以宣告自己的存在,此外还会将当前从各汇聚点接收到的信号强度信息捎带在广播消息中发送.而头节点会将计算更新的机会概率表回传给群内所有成员节点.令 t_{split} 为分裂时间阈值.如果头节点在超过 t_{split} 的时间内还未收到成员节点的信号强度报告或广播消息,则认为该节点已脱离群,此时将此节点号从成员节点列表中删除.另一方面,若成员节点在超过 t_{split} 的时间内还未收到群组头节点的机会概率更新报文,则删除自身存储的群编号标记(即头节点标记),宣告脱离群.

3.3 基于群的事件发布与传输

在形成了群组模式的基础上,由于群组间是间断连通,而群内是一个相对稳定的连通子图,故事件的发布与传输考虑采用两级路由策略:

- 1) 首先根据产生的事件类型,确认当前事件的接收汇聚点编号;
- 2) 事件的发布与传输按照群组间的“carry-and-forward”方式根据群的机会概率传递;
- 3) 群内的事件传输则是基于群内节点的稳定邻居集,建立传输路径集进行;
- 4) 最后,若群与汇聚点直接建立通信链路,则各节点根据建立的传输路径集快速传递类型匹配事件到汇聚点.

3.3.1 群的机会概率路由的建立与维护

由网络模型的基本假设 3 可知,汇聚节点以较大功率周期性的发送 becaon 报文,该消息内容很少,只包含特定编号和事件类型匹配值,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.由于消息是以较高功率等级发射,网络中特定区域内(即以汇聚节点为圆心、 R 为半径)的所有传感器节点都将收到此广播消息,这里, $R \gg r$.由蚁群觅食原理可知,消息应尽量沿信号增强的方向传递.根据信号传播衰减原理,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相应汇聚点距离的变化.由于以“群”为单位的移动和分布体现了一定的个体运动特征,故群组成成功传输事件到汇聚点的概率依赖于各成员节点接收到的 becaon 报文的信号强度.这里的信号强度值 SIN 是基于 $RSSI$ 值的估算,具体转换公式为

$$SIN(d_k, v_i) = 10^{RSSI(d_k, v_i)/10} \quad (2)$$

其中, d_k 为汇聚点编号; $RSSI(d_k, v_i)$ 即移动传感器节点 v_i 接收汇聚点 d_k 的信号强度指示值,其单位为 dbm;而信号强度 SIN 的单位则为 mW.每当节点接收到相应汇聚点的广播信号时,会将信号强度指示值以及当前时间戳连同自身编号封装在数据包内,以 Epidemic 传染方式^[10]快速传递给头节点.头节点根据各节点的信号强度的变化估算群到各汇聚点的机会概率,再将更新后的机会概率值以传染式扩散方式在群内广播.这里,利用信号强度建立的机会概率一定程度上体现了信道质量,同时也不需要交换大量的报文.当头节点收到各成员对汇聚点 d_k 的信

号强度报告时,其机会概率 $P(d_k)$ 按照公式(3)进行更新,其具体计算的公式为

$$P_{new}(d_k) = P_{old}(d_k) + (1 - P_{old}(d_k)) P_{int} \sum_{j=1}^{N(G_i)} \left[\alpha \frac{SIN_{new}(d_k, v_j)}{SIN_r} + \mu(1 - \alpha) \left(\frac{SIN_{new}(d_k, v_j)}{SIN_{old}(d_k, v_j)} - 1 \right) \right] \frac{1}{N(G_i)} \quad (3)$$

其中, $P_{int} \in (0, 1)$ 是群相对汇聚点机会概率的初始化值. 需要注意的是, 这里假设 v_i 为头节点, G_i 为头节点 v_i 所属群组, $N(G_i)$ 为群的节点数, SIN_r 为传感器节点能够与汇聚点直接进行消息通信的最大半径 r 处的广播信号强度, $SIN_{new}(d_k, v_j)$ 为节点 v_j 检测到对汇聚点 d_k 的信号强度的当前值, $SIN_{old}(d_k, v_j)$ 则为记录的最近一次的信号强度值. 由第 3.1 节可知, 这里的数据传递路由借鉴了蚁群觅食原理, 各类事件根据不同基站的广播信号强度进行分类传输. 显然, 群的机会概率依赖于群内各节点检测到的广播信号强度. 这里, 我们采用群内各节点的平均影响度来实现对概率 $P(d_k)$ 的更新计算, 避免个别节点的偶然性影响.

首先归一化处理节点的当前信号强度: $SIN_{new}(d_k, v_j)/SIN_r$. 从公式(3)中可见, 若 $SIN_{new}(d_k, v_j)$ 越大, 则表示节点 v_j 距汇聚点 d_k 越近, 故其对群的机会概率增加的贡献度也越大. 另一方面, 群的机会概率也跟群内各节点的移动性有关, 这里采用 $SIN_{new}(d_k, v_j)/SIN_{old}(d_k, v_j)$ 来测算节点的移动对群组机会路由的影响:

- ① 若 $SIN_{new}(d_k, v_j)/SIN_{old}(d_k, v_j) > 1$, 则表示节点 v_j 向汇聚点 d_k 移动, 故, 其对机会概率的影响为正增长;
- ② 若 $SIN_{new}(d_k, v_j)/SIN_{old}(d_k, v_j) = 1$, 则表示两者之间的距离无变化, 故, 其对机会概率无影响;
- ③ 若 $SIN_{new}(d_k, v_j)/SIN_{old}(d_k, v_j) < 1$, 则表示节点 v_j 远离汇聚点 d_k , 故, 其对机会概率的影响为负增长.

此外, $\alpha \in (0, 1)$ 为预设的权重参数, 用来平衡节点当前位置与其即时移动性的不同影响程度. 需要特别注意的是, 我们引入了节点移动判断因子 μ , 其定义为

$$\mu = \begin{cases} 0, & \text{若 } t_{new} - t_{old} \geq T_{threshold} \\ 1, & \text{若 } t_{new} - t_{old} < T_{threshold} \end{cases} \quad (4)$$

其中, t_{new} 与 t_{old} 分别为节点当前记录信号强度的时刻和最近一次的记录时刻. 如果这两个时刻相隔太久, 则信号强度值 SIN 的变化不足以反映节点的移动方向, 所以当 $t_{new} - t_{old} \geq T_{threshold}$ 时, $\mu = 0$.

由于节点的移动性, 传感器节点在某一段时间内可能都不会接收到汇聚点 d_k 的 beacon 报文. 对群 G_i 而言, 若 $v_j \in G_i$, 节点 v_j 在一定的时间段内均未收到汇聚点 d_k 的广播信号, 则头节点根据一定的时隙相应的衰减对 d_k 的机会概率值, 正如食物的气味也会随时间的推移而减弱一样, 公式(5):

$$P_{new}(d_k) = P_{old}(d_k) \beta^{t_{age}/\Delta t_b} \quad (5)$$

这里, $\beta \in (0, 1)$ 是概率衰减因子, Δt_b 为衰减周期(设与汇聚点广播周期相同), t_{age} 是概率连续衰减的持续时间. 根据公式(5)可知, 在一个衰减周期内, 若头节点未接收到群内任何节点报告的关于 d_k 的信号强度, 则概率 $P(d_k)$ 按照公式(5)进行衰减, 并且随着衰减时间的持续增长, $P(d_k)$ 的衰减速度将加快. 这意味着, 整个群已经远离了汇聚点所在区域.

需要特别注意的是:

- 当群合并事件发生时, 例如: 令 G_i 与 G_j 分别为不同的两个群, $G_k = G_i \cup G_j$ 为合并后的群, 重新竞争产生的头节点会合并 G_i 与 G_j 的机会概率表, 具体合并形式如下:

$$P(G_k|d_k) = (P(G_i|d_k) + P(G_j|d_k))/2 \quad (6)$$

- 当某一个或几个节点离开群时, 脱离的节点将清空概率表重新建立, 而其余节点的机会概率表保持不变.

3.3.2 事件的转发策略

在本策略中, 根据网络模型假设, 汇聚点或静止或做布朗运动. 各传感器节点既能作为事件的产生者, 将收集到的消息传递给汇聚点, 又能作为事件的中继者, 参与事件的转发. 基于信号强度的启发式概率路由方式, 能使各群预先建立起到各汇聚点的机会概率表. 事件的转发就是基于机会概率进行的.

1. 群组间的转发

群组间的事件传递与转发如图 4 所示, v_i 为群 G_a 的边界节点(见定义 3), G_b 为邻接群, d 为事件汇聚点, 具体步骤是: 当群 G_a 通过边界节点 v_i 与 G_b 邻接时, 节点 v_i 与 G_b 的边界节点 v_j 交换各自的机会概率表. 例如, 对汇聚

点 d , 若 $P(G_a|d) < P(G_b|d)$, 表明群 G_b 有更大的可能将类型匹配的事件传递给汇聚点. 因而, 边界节点 v_i 将存储的匹配事件传递给节点 v_j . 若 v_i 为 G_a 的边界网关(见定义 4), 则可进一步作为群 G_a 的事件代理, 将群内其他节点的匹配事件通过 G_b 的边界节点 v_j 传递到群 G_b 内.

2. 群内的传输

当群内的其他节点需要将各类事件通过边界网关传递给相邻群时, 群内的事件传输是基于到边界网关的传输路径集进行的. 这里, 连接邻居群的边界网关节点可能有多个, 令 $\Sigma^{(1)} = \{v_i | 1 \leq i \leq N\}$ 代表边界网关集合. 传输路径的建立是基于群内各节点的稳定邻居集(见定义 2)进行的. 在网络模型中, 群内的节点相对运动较小, 故能够基于节点的稳定邻居集形成一个拓扑相对稳定的有向连通子图.

以集合 $\Sigma^{(1)}$ 中的所有节点作为第 1 层节点, 以集合 $\Sigma^{(1)}$ 内与这些节点相邻的稳定邻居节点作为第 2 层节点集合 $\Sigma^{(2)}$, 接着, 在剩余的节点中选择第 2 层节点的稳定邻居作为再下层节点集合, 依次往下建立 $\Sigma^{(k)}$ 与 $\Sigma^{(k+1)}$ 之间的传输路径集, 直到剩余的节点中无稳定邻居节点为止. 这里, 每个节点均会保存自己所在层次的标记. 假设网络模型中, 群组 G_2 的边界网关集合包含节点 v_3 和节点 v_5 , 那么以节点 v_3 和节点 v_5 作为第 1 层节点的传输路径集如图 5 所示.

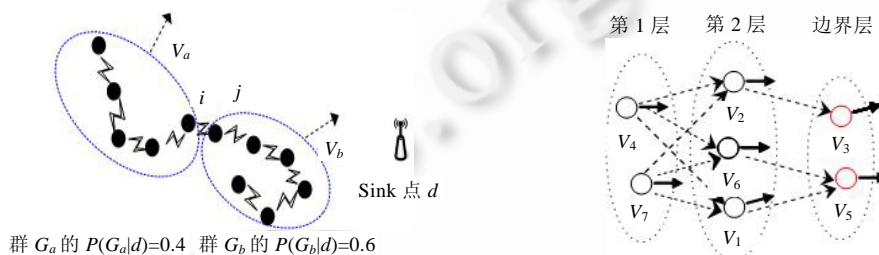


Fig.4 Select the next group to forward the packet Fig.5 Set of transmission path inside group
图 4 群组间的事件转发 图 5 群组内的传输路径集

事件的传输按此路径集进行, 具体步骤是: 完成传输路径集的建立后, 处于下层的传感器节点立刻按照传输路径集中的路径把自身收集的事件传输给上一层传感器节点, 上一层节点再把事件依次往上传送, 直到事件被传输到最上层节点为止(即边界网关). 另外, 由传输路径可见, 第 k 层集合 $\Sigma^{(k)}$ 的某个节点(例如节点 v_i)可能与上一层 $\Sigma^{(k-1)}$ 中的多个传感器节点建立了通信链路, 此时, 为了均衡各个节点的负载, 我们令节点 v_i 把它存储的事件依次轮循传输给它的上层链路. 此外, 由于节点间的相对运动, 上下层稳定邻居节点间的稳定链路可能转变为不稳定状态, 甚至链路断裂, 这里给出传输路径在节点 v_i 上的调整操作流程:

- (1) 首先, 根据传输路径集初始化建立一个有向连通子图(如图 5 所示), 其中, 节点 v_i 的出度与入度分别设置为与上层节点集合和下层节点集合建立的通信链路数;
- (2) 当 $v_i \in \Sigma^{(k)}$, 若其出度(v_i)=0, 即表示与上层 $\Sigma^{(k-1)}$ 节点集合不存在通信链路, 则将 v_i 从传输路径的节点集合中删除, $\Sigma^{(k)} = \Sigma^{(k)} - \{v_i\}$, 同时删除 v_i 与下层集合 $\Sigma^{(k+1)}$ 中存在的所有链路, 转步骤(3); 否则, 调整结束;
- (3) 判断 v_i 当前的稳定邻居集中是否存在传输路径集上的节点, 若不存在, 则 v_i 脱离传输路径, 流程结束; 否则, 若存在多个位于传输路径集上的节点, 则建立 v_i 与当前最上层邻居节点的传输路径链路, 若该邻居节点属于 $\Sigma^{(m)}$, 则 $\Sigma^{(m+1)} = \Sigma^{(m+1)} \cup \{v_i\}$; 调整流程结束.

需要注意的是, 这里 v_i 仅与当前所属层次最高的稳定邻居建立传输路径, 目的是使 v_i 到边界网关的传输路径最短, 提高数据传输的效率. 此外, 由于该算法是分布式地部署在各个节点上运行, 若边界网关集合 $\Sigma^{(1)}$ 的所有节点均失去与邻居群组或汇聚点的通信链路, 即所有边界网关节点的出度为 0, 则 $\Sigma^{(1)}$ 为空, 并且删除了 $\Sigma^{(1)}$ 到下层节点集合 $\Sigma^{(2)}$ 所有路径, 进而导致 $\Sigma^{(2)}$ 中的所有节点出度为 0, 则集合 $\Sigma^{(2)}$ 也为空. 依此类推, 各层节点集合均为空, 最后传输路径集被完全撤消.

3.4 事件的缓存管理

在 DTMSN 的动态数据传输环境中,显然,多副本形式的传输能够提高事件的成功传输率,降低传输延迟.然而,大量冗余事件的存在也会消耗网络资源和能量.对事件的缓存管理包括节点队列的调度管理和事件删除机制两部分.需要注意的是:出于降低网络中冗余事件的考虑,多副本的事件传输主要基于不同节点群间的转发;而对于群内节点间的事件传输,则仍然是采用单副本方式通过传输路径集进行.

3.4.1 节点队列的管理

由于不能保证传输出去的事件最终能被汇聚点接收,当事件被转发到其他群的传感器节点后,本传感器节点仍会保存事件的副本.特别地,当转发事件的传感器非边界网关节点时,事件首先是在群内根据传输路径进行转发,若路径中断,则事件保存在当前转发节点的存储队列.因此,群内节点间的转发不需要保存事件副本,以保证群内无冗余事件产生.队列管理的目的就是恰当地分类传感器存储队列中的事件,以便决定各个事件传递的优先顺序以及丢弃原则.本文的队列调度管理策略是依据事件的优先权系数进行的.

(1) 事件优先权的计算

每个事件都关联一个优先权参数,用来表示其重要程度,优先权越高,该事件就越应该优先转发.假设每个事件的头部均包含一个域,存放事件的优先权值.显然,随着事件在群组间的转发,其在网络中的冗余度增加,传递到汇聚点的可靠性也就越高;反之,其单个事件副本在节点队列中的转发优先级就应降低,并且,其降低的速率不仅跟群组间的转发次数有关,也跟转发的机会概率有关.设 $q(F|G_a)$ 为事件 F 在群 G_a 内的优先系数,若该事件的接收汇聚点为 d ,当边界网关节点将事件传递到群 G_b ,事件 F 的优先权参数更新如下所示:

$$\begin{cases} q_{new}(F|G_b) = q_{old}(F|G_a) & (7) \\ q_{new}(F|G_a) = q_{old}(F|G_a) \frac{P(G_a|d)}{P(G_b|d)} & (8) \end{cases}$$

这里,由于事件是由群 G_a 传递到 G_b ,故 $P(G_a|d) < P(G_b|d)$,从式中可知:若 $P(G_b|d)$ 越大,则事件的传输成功率和可靠性越高,故其副本的优先系数下降得也越快.此外,若不同节点群间的转发次数越多,产生的事件副本就越多, $q(F|G_a)$ 的更新频率也就越快,相应地,其衰减也越快.我们规定,事件的初始优先权值为 q_{ini} .

(2) 队列的调度管理

每个传感器节点均有一个存储队列保存发送的事件,这些事件有 3 个来源:

- (a) 节点根据传感单元收集的数据产生的事件;
- (b) 节点收到其他的节点发送来的事件;
- (c) 节点转发事件到邻居群组后产生的事件副本.

队列的调度管理就是基于事件的当前优先权系数进行,系数大的事件优先发送.当事件到达传感器节点时,若节点的存储队列已满,就把新到事件的优先权系数和队尾事件的优先权系数进行比较,丢弃系数较小的事件.

3.4.2 冗余事件的删除机制

在事件的转发机制中,每个事件被复制成多个副本在网络中传输.当事件的一个副本到达相应的汇聚点后,该事件的其他副本仍然在网络中传输,浪费网络资源.因此,我们提出事件删除机制用于消除冗余、降低传感器的能耗并节约网络的带宽资源.这里的事件删除分为:(1) 被动删除;(2) 主动删除.

• 被动删除式

- (i) 首先,一旦某事件的优先权系数小于某个阈值 q_u ,则立刻丢弃此事件;
- (ii) 其次,若某事件的生存时间大于整个网络延迟容忍限度值 ω_s ,则立刻丢弃此事件.

分析说明:针对情况(i),优先权系数根据第 3.4.1 节中的公式(7)和公式(8)可知,随着事件副本数的增多,其单个副本的优先权系数衰减也就越快,即事件冗余度的增加会引起优先权系数的减小.显然,为了降低事件冗余度,当优先权系数小于预设阈值时,节点将删除事件副本.此外,根据第 3.3.2 节中的转发策略可知,事件副本的优先权系数之所以减小,也是由于事件的转发复制总是从低转发概率群向高转发概率群进行而引起的.故当优先权系数小于预设阈值时,也说明该事件副本要么已经被汇聚点接收,要么已被转发到更高概率群组中,故当前节

点可主动删除该事件冗余副本;至于情况(ii),这是由延迟网络本身的特性决定的.若当前事件副本的生存时间已超过了网络的最大容忍限度,则说明该事件副本已成为无效副本,节点可直接删除该事件.这里的事件生存时间采用与文献[7]中相同的方法计算.

- 主动删除式

汇聚点会记录最近一段时间内已接收事件的 ID,将其封装在确认数据包内发送给传感器节点.每个确认数据包关联一个有效时间,当超过该时间,则该数据包从网络中删除.这里,令汇聚点记录的时间段为 T_{ack} ,同时,将该数据包的有效生存时间设为网络的延迟容忍限度值 ω_r .传感器节点接收到确认数据包时,首先扫描缓存队列,删除所有被标记接收的事件副本.当节点缓存有确认数据包时,若到达的新事件被确认已接收,则删除该事件副本.确认数据的传输具体分为两种情况:

- (i) 在汇聚点信号覆盖范围内,汇聚点将封装的确认数据包直接广播发送给范围内的所有节点群;
- (ii) 在汇聚点信号覆盖范围外,确认数据包将会基于群组的机会概率,由高概率群组向低概率群组转发.

一般来说,确认数据总是沿着与事件传递相反的方向在网络中扩散.一旦数据包转发到群内,则以 Epidemic routing^[12]方式在群内进行扩散.

对于情况(i),由于汇聚点能够周期性地以较大功率进行广播,在其信号覆盖区内的节点可在短时间内迅速删除已被汇聚点接收到的事件副本;而对于超出其信号覆盖区的传感器节点,可通过群组之间的相遇进行扩散;针对情况(ii),这里为了控制确认消息的扩散范围,可预设一个扩散阈值,若群组的机会概率大于该阈值,确认消息方可进行扩散转发.显然,扩散阈值越大,确认消息越被限制在转发概率较高的群组中,而概率较高的群组往往距汇聚点也越近,这就有效地限制了消息的扩散的范围.

需要注意的是:由于确认数据包仅包含接收事件 ID,其长度很小,可采用捎带的方式在汇聚点以及传感器节点之间交换,故开销很小.

4 模拟实验

基于第 2 节的网络模型,我们模拟实现了 GMED、FAD^[18]、直接传递算法 DT(direct transimission)^[6]和 Epidemic routing^[12]算法,主要从以下 3 个方面进行了性能分析:

- (1) 从平均传输成功率、平均传输能耗和平均传输延迟进行性能比较;
- (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 GMED 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.

其中,传输成功率是指在规定的仿真时间内,汇聚点接收到的事件数量与网络中实际产生的事件的比率;延迟是指事件从传感器节点发出到被汇聚点接收所经历的时间;由于传感器节点的能量消耗主要用于事件传送,因此,平均传输能耗则以事件的平均副本数加以度量.此外,我们假设当网络中一半数量的节点能量耗尽时网络死亡.需要强调的是,对于 Epidemic 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事件.在直接收集协议中,当且仅当汇聚点在传感器节点的通信范围内时才收集这个节点产生的匹配事件,而 FAD 则是采用改进的基于历史记录的方法计算传输概率,同时根据事件的错误容忍(fault tolerance)值进行队列管理.

4.1 模拟环境

实验是基于 NS-2.33 仿真平台设计实现的.在实验中,为了模拟事件的分类传输,设定 10 个汇聚点.其中,60%为静止的基站,随机部署在网络中;剩余的 40%为移动的车载形式,按照 Random Waypoint 模型作随机运动.汇聚节点从 1~10 进行编号,并且每 5s 广播一次,当其以最大发射功率等级广播时,发射半径为 100m.同时,令传感器节点的 hello 消息广播周期也为 5s.此外,汇聚点记录最近 30s 内到达的匹配事件的 ID,并在下一次的广播中捎带发送.定义传感器节点产生的每个事件的头部均包含类型属性值 {Type=x},其中,x 是属于 [1,10]的任意整数,分别与汇聚节点编号相匹配.

实验中,在分析网络寿命时,采用与文献[28]相同的无线通信模型.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,初始化设定 20 个群组,每群 20 个节点.这里,群参考速度 v_0 与移动 sink 点速度 v_s 均为 $1 \sim v_{\max}$ 之间的随机值,群内节点则以速度 $v=v_0(1+\lambda)$ 向参考区域运动,参考区域是边长 D 为 50m 的方格区域, $-0.2 \leq \lambda \leq 0.2$ 为群内节点的速度随机偏移量.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.整个模拟持续时间为 2h.考虑到模型运行的稳定性,只统计从 1000s~7000s 期间的仿真数据结果.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	Parameter	Default value
Network size (m ²)	500×500	Number of events successfully transferred per sec	20
Number of grids	10×10	Maximum delay tolerant value (s)	24 00 s
High power-level transmission radii of sink R (m)	100	E_{elec}, E_{fs}	50 nJ/bit, 10 pJ/bit/m ²
Transmission radii R (m)	3	E_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
Number of sensor node	400	Time threshold value of merge/split (s)	30
Speed of group /mobile sink node V_{\max} (m/s)	1~5	Value of $T_{threshold}$ (s)	15
Pause time t_{pause} (s)	0~120	Threshold value E (J)	2 J
Maximum queue size of sensor	200 events	Fault tolerance threshold of FAD	0.85
Size of each event (bite)	250	Value of α/β	0.6/0.9
Size of broadcast message (bite)	20	Value of q_{im}/q_u	0.95/0.5
Initial energy of each sensor node (J)	10		

4.2 性能对比

默认参数下算法的性能比较见表 2.综合 3 项性能指标可以看出,GMED 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平均传输延迟,而且对网络平均传输能耗(即事件的平均副本数)控制得很好.直接传递策略(DT)由于只在遇到汇聚点时才向其递交队列中的事件,因此从表 2 中可看出,它具有非常低的平均传输能耗(副本数恒为 1),但却造成了非常大的延迟和较低的传输成功率.传染式扩散(epidemic routing)规定移动节点相遇时成对交换对方未有的消息.从理论上分析,这种基于传染病模型的转发扩散应该有很好的传输和延时性能,但在节点存储空间有限的情况下,容易导致缓存溢出和消息丢弃.此时,由节点自身产生的事件通常只能由本节点传输给汇聚点,相当于直接传递的效果,而仅有传染扩散的事件副本能被不同传感器节点传输到汇聚点.因此,尽管 Epidemic routing 的总体传输性能略优于直接传递,但却远低于 GMED.

Table 2 Simulation results comparison with default parameters

表 2 默认参数下模拟结果的对比

	GMED	FAD	Direct transmission	Epidemic
Delivery ratio (%)	86.6	71.8	57.6	66.9
Average copies for each message	5.5	10.6	1.0	13.2
Average delay (s)	681.5	896.4	1 946.5	1 626.8

从表 2 还可以看出,GMED 与 FAD 策略相比,在延时、通信负载和成功传输率方面均有明显优势.这是因为 FAD 对节点传输概率值的计算仅是基于此前消息传输的历史记录,并未考虑节点运动的状态和特征,不能很好地反映节点当前将事件成功递交给汇聚点的实际能力;相反,GMED 结合了节点的群运动特征,采用汇聚点广播信号强度信息估算传输概率,并且把节点按群为单位组织起来,避免了群内节点之间的无效回传,在提高传输成功率和延时性能的同时,也有效控制了网络负载.另外,由于 FAD 的队列管理没有考虑事件的最大生存期,因此可能会有超出延迟容忍限度的事件继续存留于网络中消耗网络带宽和能量;而 GMED 采用事件生存期和冗余删除机制来管理存储队列,清除网络中过于陈旧的事件,减少了不必要的网络开销.

为了验证在复杂场景下算法对多汇聚点随机移动变化的敏感性,我们控制汇聚点总数不变,将移动 sink 节点数量从 0 逐渐增加到 10,图 6 显示了 4 种算法事件传输成功率的变化趋势.不难看出,GMED 能够很好地适应

sink 节点的随机变化,始终保持较高的传输成功率.此外,直接传递 DT 和 Epidemic 算法的传输成功率也均有一定程度的提高,这是因为随着移动 sink 节点的增加,相当于提升了汇聚点的整体移动性,进而使节点与汇聚点相遇的概率增大,提高了算法的传输成功率.然而,随着 sink 节点位移随机性的增强,偶然性的因素将在短期内对传输概率产生较大影响,这就使依赖于历史记录估算传输概率的 FAD 的成功递交率显著降低.

图 7 则显示了网络初始阶段 4 种策略的传输成功率变化情况,可以看出,直接传递策略的传输成功率随时间线性增长.这是因为节点遇到汇聚点的概率随时间线性增长,而只有当节点遇到汇聚点时才将事件进行提交.此外,GMED 策略的成功传输率始终高于 FAD,且在最初 800s 内,其增长的速度大于 FAD;之后,两种策略均渐趋于稳定.这是由于在 FAD 初始时,传感器节点的传输概率计算是一个从汇聚点逐步扩散开来的过程,因而需要较长时间;而 GMED 中的传输概率是基于汇聚点的广播信号强度的估算,其适应过程相对较短.图 7 还显示,Epidemic 的曲线与其他 3 种策略有很大不同,它在初期快速达到一个峰值,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,大量的传染式扩散消息使网络中多数节点的队列快速地被填满;此后,由于不再接收扩散消息,只有本身产生的新事件入队列,使得事件的传输性能趋向于直接传输策略.

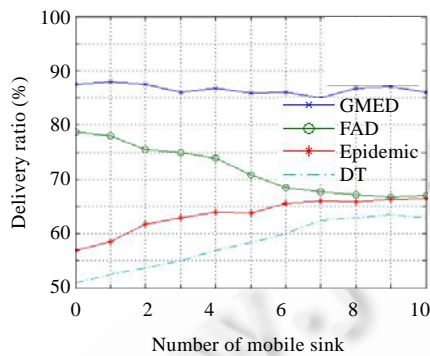


Fig.6 Delivery ratio vs number of mobile sink
图 6 移动 sink 节点数目对传输成功率的影响

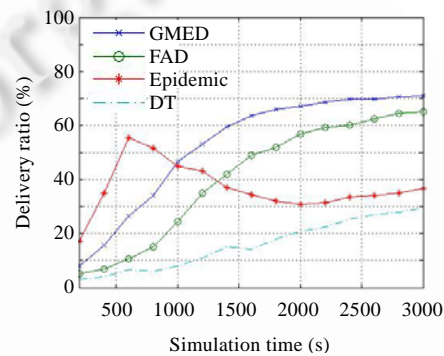


Fig.7 Delivery ratio vs time elapse
图 7 初始阶段传输成功率随时间的变化

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对 4 种算法的性能影响.节点密度的变化通过改变节点的总数来实现,实验结果如图 8(a)~8(c)所示.需要注意的是:随着节点总数的增加,节点的群组数和群内节点密度显然也会增加.初始时刻,我们均设定群组内节点的规模为 20 个.

从图 8(a)可以看出,随着节点密度的增大,网络的连通性相应得到增强,因而 GMED 与 FAD 的成功传输率得到一定程度的提高;DT 因为不与其他节点发生消息传递,因此提交率大体不变;Epidemic 算法因为在节点队列满后与直接传递的性质相近,因此其提交率也对节点密度的变化不敏感.

图 8(b)显示,随着节点密度的增大,FAD 和 Epidemic 算法的平均事件复本数均有明显上升.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,进而引发了事件复本数的上升.其中,Epidemic 算法由于按照传染式方式进行扩散,其副本数增加最快.需要注意的是:由于 GMED 是以“群组”为单位进行多副本的转发,群内始终以单副本传输,而群的规模会随着合并与分裂动态地变化,故尽管节点的增加会引起群组数的相应变化,但副本数总体增加幅度较小.

图 8(c)则展示了节点密度与平均传输延迟的关系:因为 DT 中传感器节点只与汇聚点发生通信,因此点密度的变化对其无影响;而在 Epidemic 算法中,节点密度的增加会使事件队列被填满的时间缩短,进而使传输延迟接近 DT;而网络连通性的增强也使事件能够更快速地向汇聚点传递,因此降低了 GMED 和 FAD 的传输延迟.

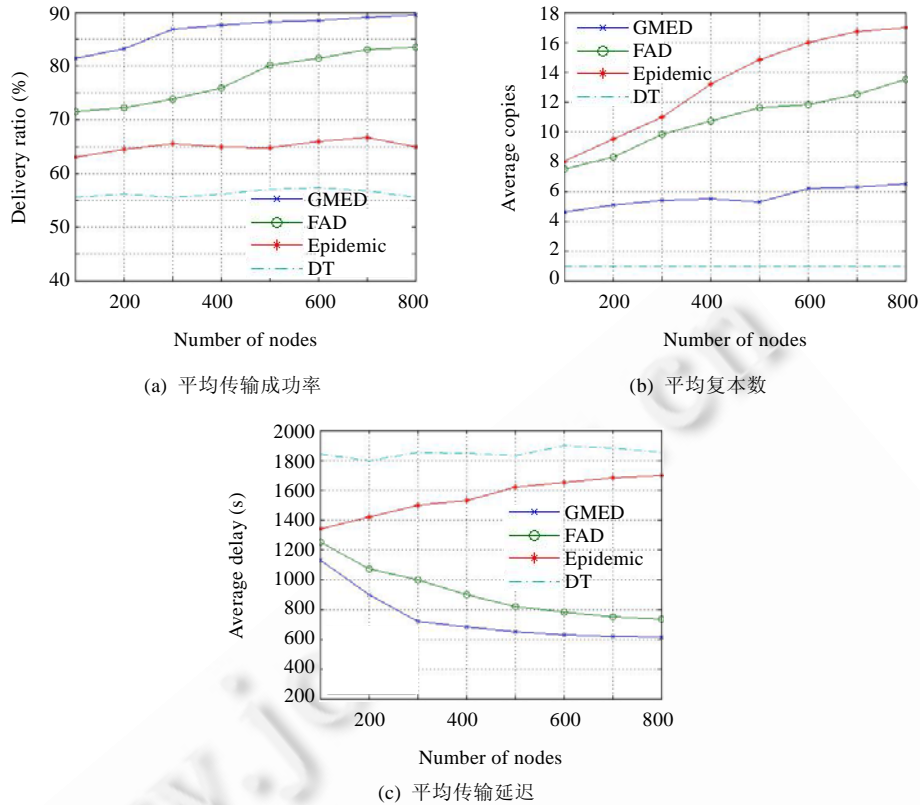


Fig.8 Impact of node density

图 8 节点密度的影响

4.4 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:节点的速度依赖于所属群的参考速度,做正负 20% 的随机偏移.这里,群参考速度是 $1 \sim v_{\max}$ 之间的某随机值,我们将 v_{\max} 的值从 1~10 逐渐增大,实验结果如图 9(a)~9(c)所示.

图 9(a)中,当群组的参考速度加快时,4 种算法的传输成功率均有所提高.这是因为群的参考速度加快,导致节点运动速度加快,这意味着节点(群组)与其他节点(群组)或汇聚点相遇的机率增大.

此外,节点(群组)的运动速度对网络平均副本数及平均传输延迟都具有一定的影响,如图 9(b)所示,节点(群组)运动速度的加快,使 GMED, FAD 和 Epidemic 算法的传输能耗有所增加,这同样是节点(群组)与其他传感器节点(群组)相遇的可能性增大,引起平均消息副本数增加造成的,但由于 GMED 在群内采用单副本传输,因而始终将副本的增加控制在较低的水平.

从图 9(c)还可以看出,随着节点运动速度的加快,使最后一跳节点(群组)到达汇聚点的时间缩短,4 种算法的平均传输延迟均有所降低.

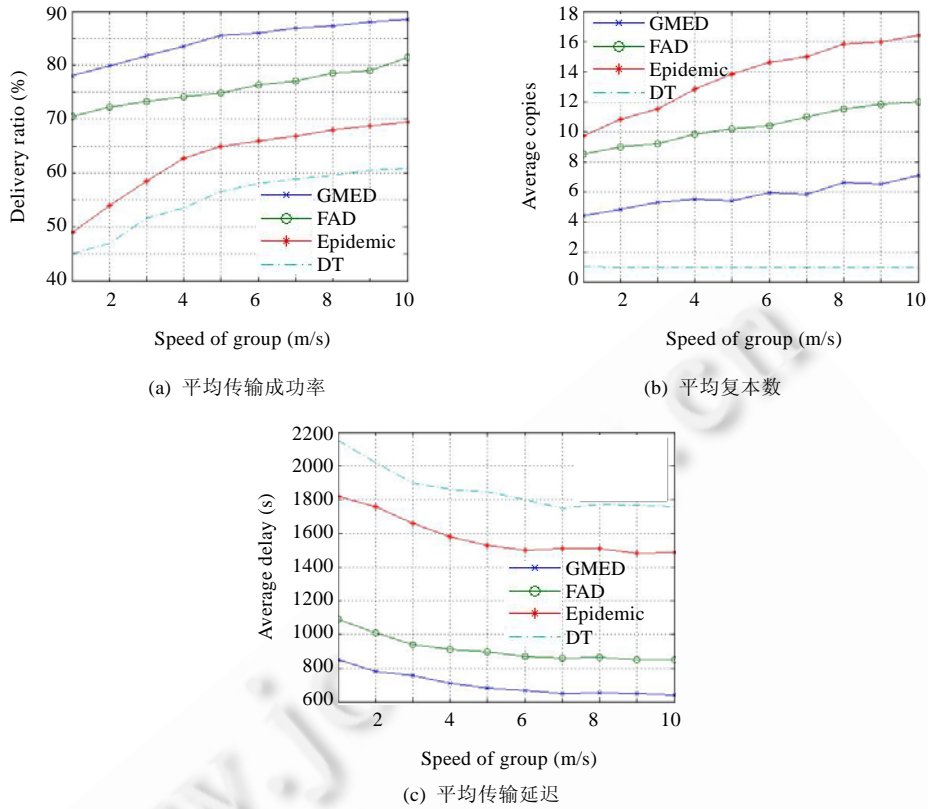


Fig.9 Impact of movement speed
图9 节点运动速度的影响

4.5 通信半径对性能的影响

本组实验主要研究不同节点通信半径的情况下,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(a)~10(c)所示.

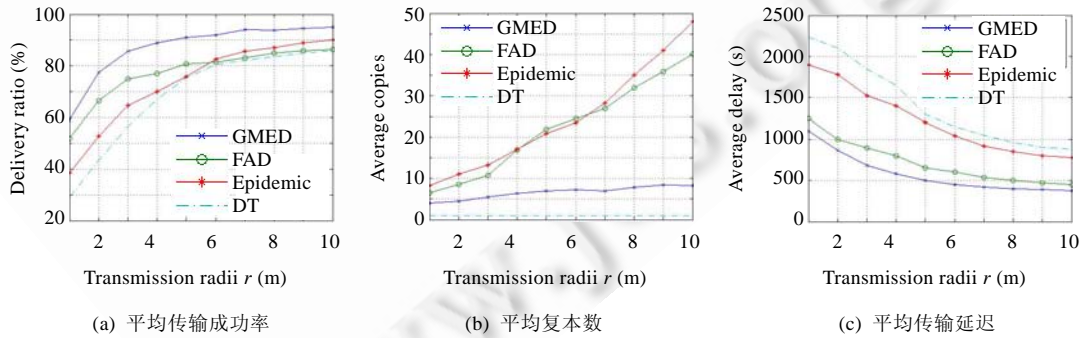


Fig.10 Impact of transmission range
图10 通信半径的影响

从图 10(a)不难看出,随着通信半径的增大,各种算法的传输成功率均逐步提高,这是因为传感器节点通信范围变大,那么其在自身的通信范围内遇到邻居节点的可能性就大,既增加了事件被传递的机率,也增加了与汇聚点的通信可能性.其中,GMED 的事件传输成功率始终高于其他 3 种算法,说明了两级路由策略的有效性.而在

图 10(b)中,FAD 和 Epidemic 算法的平均副本数均随着通信半径的增大而增多,这同样是由于节点通信范围的变大提高了节点间的转发频率,导致了事件副本数的增多.而对于 GMED 而言,节点通信半径的增加固然能够引起不同节点群相遇频率的提高,进而增加转发的事件副本数,但通信半径的增加也会增大单个群组的通信覆盖范围,间接扩大了群内的节点规模,抑制了多副本的产生,故其副本数影响较小.DT 算法因为传感器节点只与汇聚点发生直接通信,故副本数为 1.图 10(c)则显示,随着通信半径的增大,各算法平均传输延迟均逐渐减小,这是因为通信半径的增大会间接增加事件传输到汇聚点的概率,而其中又因为 GMED 下一跳节点的选择最有效,因此它的平均传输延迟最低.

4.6 存储队列长度对性能的影响

本组实验主要研究存储队列长度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事件数,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.实验结果如图 11(a)~图 11(c)所示.

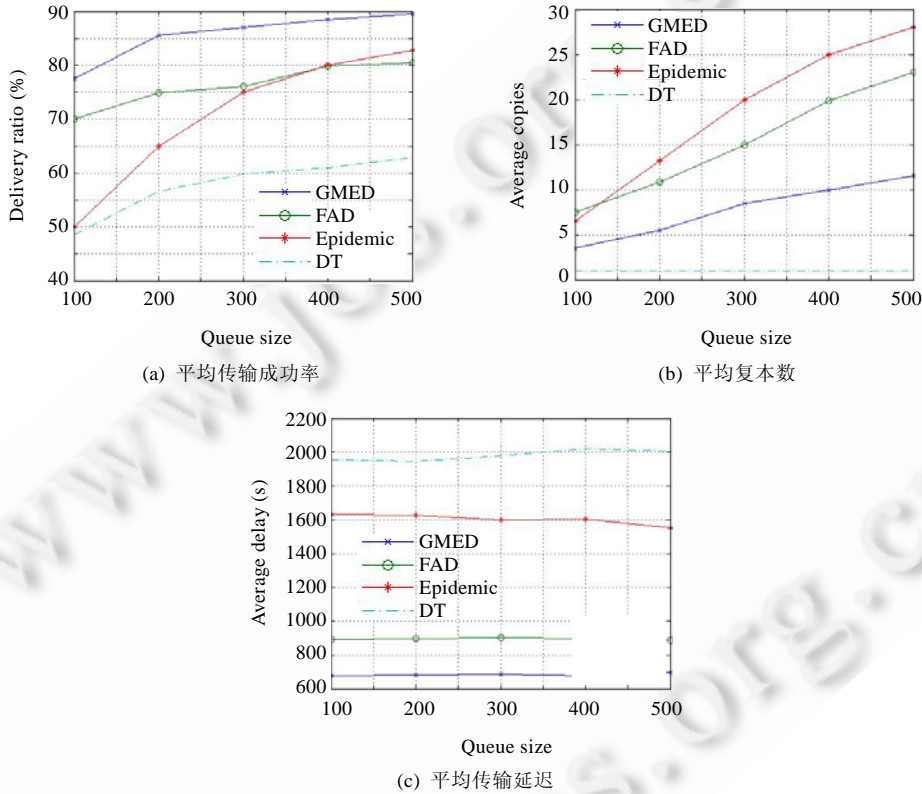


Fig.11 Impact of queue length

图 11 存储队列长度的影响

从图 11(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.其中,尤以 Epidemic 算法的增长最为明显.这是因为存储队列的增长使节点所能容纳的事件增多,事件在被丢弃之前有更大的可能性传输到汇聚点,故 4 种算法的递交率均增大;而 Epidemic 算法由于采用无区别的传染式扩散,在队列未满之前会保持较高的成功递交率,因而受存储队列长度的影响最为显著.图 11(b)表明,节点存储队列的增长,还使 GMED,FAD 以及 Epidemic 算法产生更多的事件副本,但由于 GMED 有效的缓存管理机制,使其副本数始终低于其他两种方法.图 11(c)则说明,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.

4.7 网络寿命分析

本组实验主要研究 4 种算法的网络寿命及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[21]的能量模型计算.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 DT 算法的网络寿命最长,这是因为 DT 算法中传感器节点只在遇到汇聚点时才发生事件递交,因此节点的能量消耗极小.而 Epidemic 算法尽管在开始阶段事件大量的扩散消耗了较多的能量,但当节点存储队列被事件副本迅速填满后,其传输模式开始与 DT 算法类似,故网络寿命相对 GMED 与 FAD 较长.我们也通过实验将 Epidemic 算法的队列长度增长至 2 000,此时由于事件在节点间的大量复制,网络寿命迅速缩短至 1.8 天.此外,通过实验我们也看出,GMED 的网络寿命明显比 FAD 长,虽然 GMED 中涉及到一些节点与汇聚点以及节点与头节点间的消息报文的收发,但由于这些报文长度很短,因此接收消耗的能量很少,只占其自身全部能量的 1%左右,因此对网络寿命造成的影响很小.而 GMED 在群内以单副本传输的方式有效地控制了能量消耗,并且引入的冗余事件删除机制也使网络的负载降低,延长了网络寿命.

Table 3 Network life with default parameters

表 3 默认参数下 4 种算法的网络寿命

	GMED	FAD	Epidemic	Direct transmission
Network lifetime (day)	4.37	2.85	59	989

5 结论及下一步工作

延迟容忍移动传感器网络 DTMSN 具有节点移动性、间歇连通性,并且能够容忍适当的延迟.如何在 DTMSN 环境下进行数据的分类收集,面临着许多新的问题和挑战.本文提出了一种基于群移动的事件分类传输策略 GMED,与已有工作相比,GMED 的主要贡献在于以下几个方面:

- (1) 针对多 sink 节点及移动 sink 节点的事件分类收集场景,结合节点的群运动行为特征,提出了一种以群组为单位进行事件分类传输的两级路由方案,有效地控制了网络的开销,同时也保证了传递的有效性;
- (2) 由蚁群觅食行为受到启发,以汇聚点信号强度信息及其短期内的变化趋势为依据,对节点群的机会概率进行估算,从而较准确地控制事件在不同节点群间的转发,保证了事件的成功传输率;
- (3) 引入有效的缓存管理机制,使得在提高传输成功率的同时有效地控制了事件副本数量,降低了网络传输能耗,延长了网络寿命.

大量的模拟实验证明了 GMED 的优异性能.与现有的几种 DTMSN 数据传输算法相比,GMED 有效地平衡了事件的传输能耗和传输成功率,并且其传输成功率较高而传输延迟较小.然而,群组节点的运动特性与特定任务紧密关联,在不同的应用场景下,移动模型的不同对网络拓扑和协议性能影响很大.下一步,我们将对现有算法在不同移动模型下做性能评估和比较分析;同时,针对不同的节点行为特征改进我们的传输策略.

References:

- [1] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. Journal of Software, 2009,20(1):124-137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [2] Wang Y, Lin F, Wu HY. Poster: Efficient data transmission in delay fault tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN). In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2005). Boston: IEEE Press, 2005. 1-2.
- [3] Zhang HY, Fan WH, Wang L, Zhou DX. Real-Time and reliable greedy geographical routing for mobile wireless sensor networks. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(5):713-722 (in Chinese with English abstract).
- [4] Wang Y, Wu HY. DFT-MSN: The delay fault tolerant mobile sensor network for pervasive information gathering. In: Proc. of the IEEE the 25th Int'l Conf. Computer Communications (INFOCOM 2006). Barcelona: IEEE Computer Society, 2006. 1-12.

- [5] Hull B, Bchkovsky V, Zhang Y, Chen K, Goraczko M, Miu A, Shih E, Balakrishnan H, Madden S. CarTel: A distributed mobile sensor computing system. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: ACM Press, 2006. 125–138.
- [6] 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(9):1021–1034. [doi: 10.1109/TMC.2007.1006]
- [7] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3323.htm> [doi: 10.3724/SP.J1001.2009.03323]
- [8] 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: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003). Annapolis: ACM Press, 2003. 233–244. [doi: 10.1145/778415.778443]
- [9] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. Wireless Communications & Mobile Computing: Special Issue on Mobile ad hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002,2(5):483–502. [doi: 10.1002/wcm.72]
- [10] Peng H, Shen LC, Bu YL, Wan L. Group mobility model for ad hoc networks. Journal of Software, 2008,19(11):2994–3010 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2994.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02999]
- [11] Ng JM, Zhang Y. Reference region group mobility model for ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Wireless and Optical Communications Networks. 2005. 290–294. [doi: 10.1109/WOCN.2005.1436036]
- [12] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report, Vol.CS-200006, Durham: Duke University, 2000.
- [13] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The single-copy case. IEEE/ACM Trans. on Network, 2008,16(1):63–76. [doi: 10.1109/TNET.2007.897962]
- [14] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra CS. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case. IEEE/ACM Trans. on Network, 2008,16(1):77–90. [doi: 10.1109/TNET.2007.897964]
- [15] Sun LM, Xiong YP, Ma J. Adaptive data gathering mechanism in opportunistic mobile sensor networks. Journal on Communications, 2008,29(11):187–193 (in Chinese with English abstract).
- [16] Juang P, Oki H, Wang Y. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet. ACM Operating System Review, 2002,37(10):96–107. [doi: 10.1145/605397.605408]
- [17] Wang Y, Wu HY, Dang H. Analytic study of delay/fault-tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN's). In: Proc. of the 10th IEEE Int'l Symp. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMom 2009). San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2009. 1–9.
- [18] Wu HY, Wang Y, Dang H, Lin F. Analytic, simulation, and empirical evaluation of delay/fault-tolerant mobile sensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2007,6(9):3287–3296. [doi: 10.1109/TWC.2007.06046]
- [19] Pasztor B, Musolesi M, Mascolo C. Opportunistic mobile sensor data collection with SCAR. In: Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS 2007). Pisa: IEEE Computer Society Press, 2007. 1–12. [doi: 10.1109/MOBHOC.2007.4428679]
- [20] Song LB, Kotz DF. Evaluating opportunistic routing protocols with large realistic contact traces. In: Proc. of the 2nd ACM Workshop on Challenged Networks (CHANTS 2007). Montreal: ACM Press, 2007. 35–42. [doi: 10.1145/1287791.1287799]
- [21] Daly EM, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs. In: Proc of the 8th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2007). Montreal: ACM Press, 2007. 32–40. [doi: 10.1145/1288107.1288113]
- [22] Pan H, Crowcroft J, Yoneki E. Bubble rap: Social-based forwarding in delay tolerant networks. In: Proc of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2008). Hong Kong: ACM Press, 2008. 241–250. [doi: 10.1109/TMC.2010.246]
- [23] Costa P, Mascolo C, Musolesi M, Picco GP. Socially-Aware routing for publish-subscribe in delay-tolerant mobile ad hoc networks. IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 2008,26(5):748–760. [doi: 10.1109/JSAC.2008.080602]

- [24] Leguay J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space. In: Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM Press, 2005. 276–283. [doi: 10.1145/1080139.1080146]
- [25] Leguay J, Fimur T, Conan V. Evaluating mobility pattern space routing for DTNs. In: Proc of the 25th Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2006). Piscataway: IEEE Computer Society, 2006. 1–10. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.299]
- [26] Cong L, Jie W. Routing in a cyclic MobiSpace. In: Proc of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2008). Hong Kong: ACM Press, 2008. 351–360. [doi: 10.1145/1374618.1374665]
- [27] Dorigomd E, Dorigo M, Theraulaz G.. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. New York: Oxford University Press, 1999.
- [28] 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. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]

附中文参考文献:

- [1] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 刘燕. 机会网络. 软件学报, 2009, 20(1): 124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [3] 张衡阳, 樊玮虹, 王玲, 周东翔. 一种实时可靠的移动无线传感器网络贪婪地理路由协议. 计算机研究与发展, 2009, 46(5): 713–722.
- [7] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 陈贵海, 许富龙, 宋超. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输. 软件学报, 2009, 20(8): 2227–2240. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3323.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03323]
- [10] 彭辉, 沈林成, 卜彦龙, 王林. 一种 Ad Hoc 网络群组移动模型. 软件学报, 2008, 19(11): 2994–3010. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2999.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02999]
- [15] 孙利民, 熊永平, 马建. 机会移动传感器网络中的自适应数据收集机制. 通信学报, 2008, 29(11): 187–193.



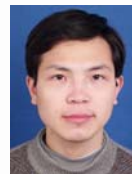
吴磊(1978—),男,四川成都人,博士生,主要研究领域为移动计算,无线自组网络.



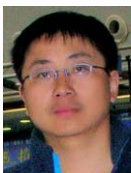
陈贵海(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式,并行计算.



王晓敏(1978—),女,博士生,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.



龚海刚(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络.



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.