

## 延迟容忍传感器网络中面向发布/订阅系统的事件传输\*

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)

### Event Delivery in Publish/Subscribe System for Delay Tolerant 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. Event delivery in publish/subscribe system for delay tolerant sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(8):1954–1967. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3583.htm>**

**Abstract:** This paper proposes CET, a community based event transmitting protocol in publish/subscribe system for Delay Tolerant Sensor Networks (DTSN). The core idea of CET is that event transmitting is based on communities which are formed by sensors in the network according to their connectivity. CET consists of two key components data transmission and queue management. In data transmitting, not only events are transmitted to mobile subscribers as best as possible, some events in subscribers are also retransmitted to sensors in community, for enhancing the data delivery ratio. The queue management employs both the event survival time and the successful delivery time to decide whether the event should be transmitted or dropped for minimizing the transmission overhead. Simulation results have shown that the proposed CET achieves a higher event delivery ratio with the lower transmission overhead and event delivery delay than DG (direct gathering protocol).

**Key words:** DTSN (delay tolerant sensor network); event transmitting; publish/subscribe; community; queue management

**摘要:** 提出了一种延迟容忍无线传感器网络(delay tolerant sensor network,简称 DTSN)中基于团体的发布/订阅系统事件传输协议 CET(community-based event transmitting protocol).CET的核心思想是,网络中所有传感器节点依据它们的相互连通性形成若干个固定的团体(community),并基于这些团体进行事件的传输.CET协议由事件传输和队列管理两部分组成.在事件传输策略中,事件除了尽可能地传递给移动订阅者之外,移动订阅者保存的某些事件还回传给团体内的传感器节点以提高事件的传输成功率.队列管理则根据事件的成功传输次数和生存时间来共同决

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60703114, 60673154, 60903156 (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 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 2008-10-08; Accepted 2009-01-20

定存储队列中事件的重要程度和丢弃原则,以降低网络传输能耗.仿真分析表明,与直接收集 DG(direct gathering)相比,CET 能够以较低的事件传输能耗和传输延迟获得较高的事件传输成功率.

**关键词:** 延迟容忍无线传感器网络;事件传输;发布/订阅;团体;队列管理

**中图法分类号:** TP393

**文献标识码:** A

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.传感器节点能够收集周边信息,并以多跳的方式将数据传递到数据汇聚点(sink).在已有的传感器网络研究中,大多数都是假设在传感器节点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汇聚点的路径.然而实际环境并非如此,网络中传感器节点的随机部署、传感器节点的密度较低,传感器节点的随机运动或某些传感器节点能量耗尽等情况都可能导致网络并非是全连通的,网络的连通性可能随着时间而变化,此特点称为间断连通性(intermittent connectivity).间断连通性是延迟容忍网络(delay tolerant network,简称 DTN)的主要特点,而具有间断连通性的无线传感器网络则称为延迟容忍无线传感器网络(delay tolerant sensor network,简称 DTSN).

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>.当前绝大多数对 DTSN 数据收集技术的研究是针对如何把传感器的数据无区分地、尽可能地汇集到单个或多个汇聚点进行的<sup>[2,3]</sup>.而在实际应用中,每个传感器收集的数据信息种类都是多种多样的,由于数据的接收者可能只对其中某种或某几种信息感兴趣,因此这些数据需要进行分类传输.例如,在灾难救助现场,不同的救援队伍只需要有关各自救助范畴的数据信息.又如,在军事作战系统,不同的人员对不同的信息感兴趣.某个士兵可能只需要他周围敌军分布情况的数据,而指挥作战部门则需要了解整个战场部署状况的信息.再如生活中的病症监测,我们可以将传感器收集的不同种类病症数据分类传输给不同的监测机构以便及时进行处理.为了满足上述应用的需求,就需要设置一种高度灵活、动态的数据信息分发处理系统,而发布/订阅系统(publish/subscribe,简称 pub/sub)正是具有这样的数据分发处理能力.

发布/订阅系统是一种使分布式系统中的各参与者能以发布/订阅的方式进行交互的中间件系统.在 pub/sub 方式下,信息发布者以“事件”的形式将信息发布到 pub/sub 系统中;订阅者定义一个订阅条件,表示对系统中的某一特定种类的事件感兴趣;而 pub/sub 系统事件代理则保证将所发布的事件及时、可靠地传送到所有感兴趣的订阅者.

当前,学术界已经对发布/订阅系统路由算法做了广泛的研究<sup>[4,5]</sup>.这些研究都是基于骨干网络相互连通的前提而言的.然而,由于 DTSN 是间断连通的,并且一般的发布/订阅系统并没有考虑能量的问题,而传感器节点的能量又是有限的,所以传统的发布/订阅路由技术在 DTSN 环境下并不适用.

本文根据 DTSN 的特点给出了 DTSN 中发布/订阅系统的网络模型,进而提出了一种基于团体的发布/订阅系统事件传输协议(community-based event transmitting protocol,简称 CET).CET 由事件传输和队列管理两部分组成.在事件传输策略中,我们除了尽可能地把事件传递给移动订阅者之外,还将移动订阅者保存的某些事件回传给团体内的传感器节点,以提高事件的传输成功率.队列管理则根据事件的成功传输次数和生存时间来共同决定存储队列中事件的重要程度和丢弃原则,以降低网络传输能耗.仿真分析表明,CET 能够以较低的事件传输能耗和传输延迟获得较高的事件传输成功率.此外,本文采取选择性的事件回传及有效的队列管理机制,以提高传输成功率的同时尽量降低传感器节点的能量消耗,所以 CET 协议的能耗较低.可以说,CET 协议是专为移动或半移动的无线传感器网络设计的.

## 1 相关工作

发布/订阅系统路由算法就是要解决如何在事件代理网络中寻找一条恰当的路径,使事件低成本、高效和可靠地到达各相关订阅者的问题<sup>[6]</sup>.针对不同的应用环境,目前对发布/订阅系统路由算法的研究分为以下几类:静态网络中的路由、基于传统移动网络的路由、基于 Ad hoc 网络的路由以及 DTN 中的发布/订阅路由.

静态网络路由算法的研究已经非常深入.在这些研究中,为了提高路由算法的效率,通常都是将事件代理网络的拓扑结构组织成层级结构或无环图结构,相应的路由算法基于这个给定的拓扑结构来选择合适的策略进

行高效的事件转发.在文献[7]提出的生成树转发算法中,整个系统的所有事件代理被预先组织成一个层级结构.当某事件代理收到其客户端发来的订阅请求时,订阅消息由当前节点逐级地向根节点发送.当某事件代理收到其客户发布的事件时,事件的传播采用“生成树转发”广播算法,即该事件由当前节点逐级向根节点发送,途中每个节点将其转发到对其感兴趣的各个子树.其缺点在于,由于每个事件都要被上传到根节点,因而根节点的负载较大,容易形成性能瓶颈.并且越上层的节点保存的订阅信息越多,处理负担就越重,从而造成各节点的负载不均匀.针对上述问题,文献[8]提出了基于逆向路径转发的路由算法,其中,订阅消息的传播采用“基于源转发”广播算法,事件消息的传播采用“逆向路径转发”广播算法.每个事件代理都预先知道一棵以自己为根的生成树,当它收到其客户的订阅请求后,就按这棵生成树将订阅消息转发给其他各事件代理.当每个事件代理收到其客户发布的事件时,就按照各订阅消息的逆向路径把该事件转发到其他事件代理.此协议的优点在于各事件代理的负载较为均衡;缺点在于网络中的每个节点都同时处在多棵事件分发树之中,其中包含的路由信息难以被其他节点所替代,一旦某节点失效,整个系统的路由重配工作将非常困难.上述两种算法在静态网络中运用得非常广泛.

随着移动终端的普及和移动计算的发展,发布/订阅系统已经被扩展到移动环境中,以支持移动环境下的应用.在传统的移动环境中,发布/订阅系统的各个事件代理均位于固定的有线网络中,而其客户端可以是手机等移动计算设备.事件代理相当于移动客户端对发布/订阅系统的接入点,移动客户端可能从某个事件代理处断开连接,经过一段时间后又重新连接到新的事件代理.在客户端移动过程中,发布/订阅系统要采取一定的策略保证事件不丢失且不重复地传输给订阅者.文献[9]提出了利用中介(central proxy)在移动客户端断连期间代表订阅者接收事件的策略.中介作为订阅者代理,能够用来注册对订阅者位置信息的兴趣,当移动的订阅者重连到系统时,它会首先与中介建立连接,并从中介获得自己断连期间的所有事件.然而此系统存在严重的安全问题,恶意的一方会利用中介来跟踪订阅者,在订阅者重连后发送假的通知.并且,中介成为算法性能瓶颈,使系统灵活性降低.文献[10]中提出了采用持久通告协议来支持发布/订阅系统中移动客户端的思想.其中,网络的每个事件代理均保存着各自接收事件的 ID 序号,并把这些事件按生存时间由小到大的顺序存储在队列中.当移动客户端与新的事件代理建立连接后,它将把自己最晚收到事件的 ID 序号发送给此事件代理,而事件代理将在整个系统中为此客户端搜寻下一个事件.另外,有些文献提出利用客户端的运动特点来解决发布/订阅系统中移动客户端的问题.如文献[11]提出了一种基于客户端目的地预测的事件递交协议,然而此协议忽略了客户端移动过程中事件的到达是连续不断的特性,如何解决此问题成为系统面临的严峻考验.文献[12]还考虑了发布者的移动问题并提出了 4 种策略来降低发布者的移动对系统性能的影响.此外,相关研究还包括文献[13,14].它们分别提出了不同的算法来加强高度动态的网络中事件传输的可靠性.

目前,移动 Ad Hoc 网络下的发布/订阅系统也得到了广泛的研究,典型路由算法之一是文献[15]提出的 Structure-less 策略.该算法令所有的移动节点充当事件代理节点,每个事件代理的订阅表中除了保存自己的订阅条件之外,还周期性地接收移动过程中邻居节点的订阅条件,并且各节点还时刻更新自己与其他节点相遇时间的动态信息.事件的转发则根据节点的订阅表和与其他节点的相遇时间信息有选择地进行,最终把事件传递给所有对其感兴趣的订阅者.然而此算法的事件传输延迟较大,而且,节点周期性地在全网范围内广播自己的订阅条件会造成大量的能量消耗和资源浪费.

此外,有关 DTN 中发布/订阅系统路由算法的研究甚少.文献[16]提出的基于团体的覆盖图策略是这方面的研究成果.该文献中提出了利用 SIMPLE 或 K-CLIQUE 算法把网络中的所有移动节点分为若干个相对固定的团体,并在每个团体中选取到所有其他节点的距离之和较短的若干节点担当本团体的代理节点,然后基于团体和代理节点进行事件传输的思想.由于算法中每个移动节点都要时刻执行团体发现算法以确定自己属于哪个团体,所以节点的能量消耗很快.此外,担当事件代理的节点除了执行团体发现算法以外,还要随时负责事件的传输,因而能量损耗非常迅速.然而,传感器节点的能量是有限的,所以此算法并不适用于延迟容忍无线传感器网络.

## 2 网络模型和问题分析

本节将具体介绍所采用的网络模型和基本假设,在网格模型中引入“团体”概念,用于分析延迟容忍无线传感器网络中的发布/订阅问题,并在该模型下对 DTSN 的发布/订阅系统进行全面分析描述.

### 2.1 网络模型

本文假设系统区域为一个面积为  $M \times M$  且被划分成若干个大小、形状相同的格子的二维正方形区域,如图 1 所示.基于格子模型,我们对网络作如下假设:

- $N$  个传感器节点随机分布在系统区域内且全部静止不动,每个传感器节点都有各自唯一的编号;
- $P$  个移动节点在系统区域内按照 RWP(random waypoint)运动模型<sup>[17]</sup>随机运动.它们的存储空间和能量均无限大,对这些移动节点编号为  $1 \sim P$ .
- 每个传感器节点和移动节点只能与位于同一格子内的节点及相邻格子的节点相互直接通信(格子共享一个边或一个角时称为相邻),且所有的传感器节点均明确自己所在的格子位置.
- $P$  个移动节点之间无交互,即这些节点之间永不相遇.

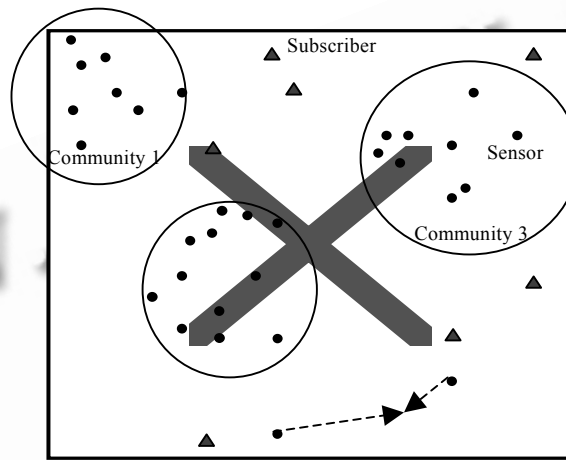


Fig.1 Illustration of the network model and communities

图 1 网络模型及团体示意图

**定义 1.** 在本文的延迟容忍无线传感器网络中,我们把每个连通的子区域称为一个团体.

由于传感器节点是随机分布的,受节点传输半径短的限制,整个网络并不是连通的,而是被划分成若干个固定的非连通子区域,即团体,如图 1 所示.可见,只有位于同一团体内的节点才能相互通信,即若没有移动节点相连接,两团体之间是不能交互的.设每个传感器节点均明确自己位于哪个团体内.此外,除了团体,网络中还同时存在着一些不属于任何团体的传感器节点,我们把它们称为孤立节点(loner node).

### 2.2 问题分析

延迟容忍无线传感器网络的发布/订阅系统同样是由事件的发布者、事件的订阅者和事件代理组成的.由网络模型可知,DTSN 的发布/订阅系统由两层构成.第 1 层是随机分布的静态传感器节点.它们用来采集数据信息,并充当发布者把这些数据组织成事件进行发送.第 2 层是按照 RWP 模型随机移动的节点.它们可以是人、车辆等.这些节点的能量一般较高且存储空间很大,它们保存有各自的订阅条件,在网络中作为事件的订阅者对特定的事件感兴趣.此外,为了提高事件的传输成功率,本文令所有的移动订阅者和团体内的传感器节点同时充当事件代理作用,共同负责事件的路由传输.

与大多数已有发布/订阅系统类似,DTSN 的发布/订阅系统要解决的关键问题也是如何使发布者发布的事

件尽可能地低成本、高效和可靠地到达各感兴趣的订阅者.在路由传输策略中,事件的平均传输成功率是最主要的设计目标,在考虑事件传输成功率的同时,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.为此,本文提出了 DTSN 中面向发布/订阅系统的事件传输协议 CET.我们在下一节中将对 CET 协议进行具体描述.

### 3 基于团体的发布/订阅系统事件传输协议(CET)的设计

#### 3.1 团体头的选择

**定义 2(团体头(community head)).** 在每个团体内,充当团体管理者的传感器节点称为团体头.在下文中将看到,团体头主要起到对团体中的事件进行调度和管理的作用.

在无线传感器网络中,由于团体头需要接收大量事件并调度安排事件的存放位置,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,团体头应在所有节点中轮换.我们考虑某团体,假设目前团体内有  $Z$  个传感器节点.完成团体的设置后,各个节点首先通过简单的握手消息分别了解各自的剩余能量信息,之后从中选取能量最高的节点担当团体头.另外,一旦担当头的节点剩余能量值变小,如小于某个值  $\theta$ ,它就应立刻发送一个广播消息给团体中所有传感器节点;其他传感器节点收到此广播消息后则重新进行消息握手过程,竞争团体头.

#### 3.2 基于团体的事件传输

##### 3.2.1 移动订阅者的事件收集

在本策略中,移动订阅者按照 RWP 模型随机连续运动.根据 RWP,每个移动节点都了解自己下一个目的点  $D$  的位置,并且通过全球定位系统 GPS(global positioning system),各个移动节点还可获知任意时刻自己的当前位置.利用这两个信息,任意移动节点均能计算出本节点本次运动过程经过的所有格子.下面我们就以移动订阅者  $i$  和团体  $N$  为例,利用节点  $i$  的运动路径,介绍移动订阅者的事件收集过程.

首先,团体内的各个传感器节点按照以下步骤来确定自己是否能与移动订阅者  $i$  直接通信:

- (1) 当订阅者  $i$  每经过一个格子区域时,就会发送广播消息给它通信范围内的所有邻居传感器节点,邻居传感器节点则返回自己所在团体的序号、所在格子的编号和自己的序号给订阅者  $i$ .
- (2) 若节点  $i$  发现自己首次与某团体  $N$  建立了连接(邻居节点返回了新的团体序号),则立刻告知自己本次运动过程经过的所有格子编号给邻居传感器节点中属于团体  $N$  的传感器节点,然后,这个节点再将此信息广播给团体  $N$  内的所有传感器节点.
- (3) 若节点  $i$  与团体  $N$  建立连接后,它的运动路径发生了改变,则同样执行上述路径通告过程,把新的路径信息广播给团体  $N$  内所有节点.
- (4) 收到路径通告后,团体  $N$  内的各个节点通过把自己所在格子位置与节点  $i$  的当前运动路径进行比较,明确自己是否能够与节点  $i$  直接通信,我们把团体  $N$  内能够与节点  $i$  本次运动直接通信的传感器节点的集合称为集合  $Z$ .

事件的传输基于集合  $Z$  进行.我们首先以集合  $Z$  中的所有节点作为第 1 层节点,以团体  $N$  内与这些节点相邻的所有传感器节点作为第 2 层节点;接着,在剩余节点中选择能够与第 2 层节点直接通信的传感器节点作为再下层节点,依次往下建立一个传输路径集,直到团体中的所有节点和传输路径均包含在这个传输路径集中为止.假设网络模型中团体 2 的集合  $Z$  包含节点 3 和节点 5,那么以节点 3 和节点 5 作为第 1 层节点的传输路径集如图 2 所示.

然后,事件的传输按此传输路径集进行,具体步骤如下: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(即事件最终被传输到能够与订阅者直接通信的节点).另外,由传输路径可知,底层的某个节点(例如节点  $m$ )可能与上一层的多个传感器节点建立了直接通信.此时,为了均衡各个节点的负载,我们令节点  $m$  把它存储的事件依次轮循传输给它的上一层节点.此外,一旦最上层的某个节点与移动订

阅者断开连接,以它为根的多余传输路径则立即被删除.图3显示了图2中节点7到节点3的事件传输过程,其中,事件的传输路径用虚线箭头表示.

网络中孤立传感器节点的事件收集过程比较简单,一旦移动节点在运动过程中与某孤立节点建立了连接,直接收集其存储队列中的事件即可.每收到一个新的事件,节点*i*(订阅者)就会把此事件与自己的订阅条件进行比较,若匹配,则立刻接收此事件.注意,匹配的事件在被节点接收后并不删除,因为可能还有其他订阅者对此事件感兴趣.

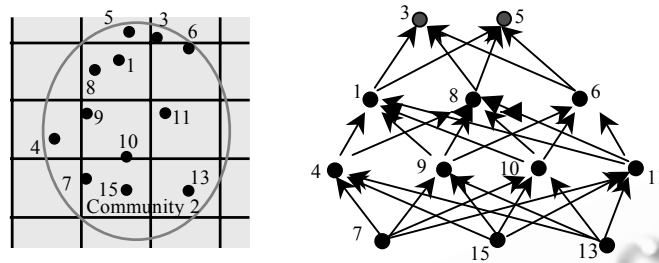


Fig.2 The set of routing path for community 2

图2 团体2的传输路径集

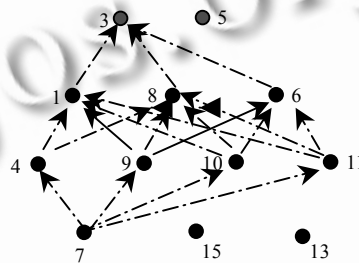


Fig.3 Event transmitting process from node 7 to node 3

图3 节点7到节点3的事件传输过程

### 3.2.2 事件的回传

由于网络中团体的覆盖范围较大,移动的订阅者在运动过程中与某个团体相遇的可能性也非常大.因此,我们可以令订阅者把它收集的某些事件再次回放到团体内,以便等其他移动订阅者访问此团体时能够迅速收集到这些事件.也就是说,令团体中的传感器节点和移动订阅者共同担当事件代理作用,以加快事件到达各相关订阅者的速度,尽量提高事件的传输成功率.下面我们分以下几个步骤,以团体*N*和移动节点*i*为例来定义回传的事件及其存放过程:

- (1) 首先,在每个团体的团体头都设置一个域,用来记录团体的大小(团体所占格子的数量).例如,若某团体占用了8个格子区域,其大小就为8.另外,我们在每个事件的头部都设置一个域,用来记录产生此事件的传感器节点所在的团体编号.
- (2) 移动节点*i*与团体*N*建立连接后,在节点*i*不接收团体事件的空闲时间内,节点*i*把其存储的事件中满足产生此事件的传感器节点所在团体的大小 $\leq$ 阈值 $\gamma$ 的事件回传给团体*N*内与节点*i*相邻的传感器节点,之后,回传过的事件被立即从*i*的队列中删除.定义上述回传策略的主要原因是,较小的团体和移动订阅者的相遇概率相对较小,致使其中的事件也较难被订阅者所接收.
- (3) 收到回传事件的传感器节点每收到一个回传事件就发送一个通知消息给团体头,再由团体头决定回传事件的最终存放位置.
- (4) 为了均衡团体中各节点的负载,我们以团体头为根,以团体头的所有邻居节点作为根节点的孩子节点,

依次往下随机建立一棵双向路由树,例如,团体 2 的路由树如图 4(a)所示.

- (5) 团体头收到通知消息后立刻沿着路由树发送回复消息给发送节点,命令此节点沿着路由树的传输路径把回传的事件依次存放.回传事件按照到达团体的先后顺序被最终依次存放在根节点、根节点的左子节点、以左子节点为根的所有节点、根节点的第 2 个子节点、以第 2 个子节点为根的所有子节点...根节点的最右子节点、以最右子节点为根的所有节点,直到遍历完团体内所有节点后循环往复.一旦没有外部事件到达,就立即终止此过程.团体 2 中回传事件的具体存放过程如图 4(b)所示.

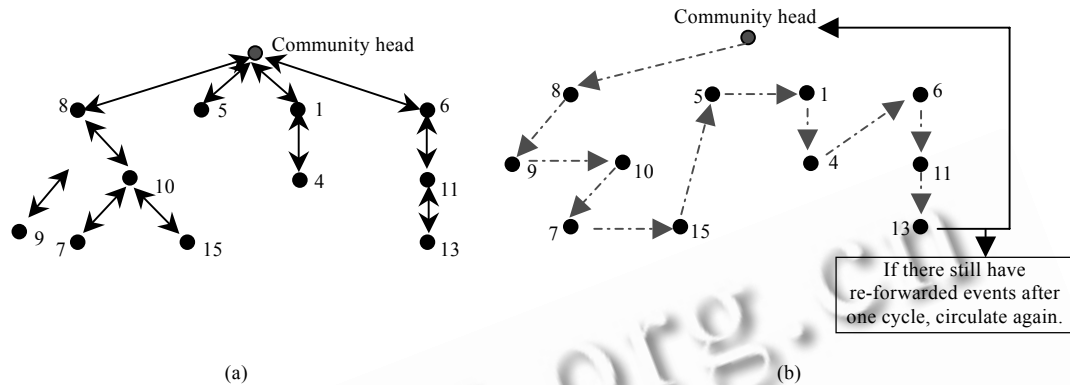


Fig.4 Storage process of retransmission event

图 4 回传事件的存放过程

### 3.3 队列管理

在 DTSN 发布/订阅系统的动态数据传输环境中,由于我们不能保证传输出去的事件最终能够被所有的订阅者接收,当事件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事件的副本.因此,网络中就时刻维持了大量的事件,导致了冗余的产生.队列管理的目的是恰当地分类传感器存储队列中的事件,以便决定当某个节点遇到其他节点时队列中各个事件传递的优先顺序以及事件的丢弃原则,队列管理对于事件传输效率和传输延迟的影响非常大.本文的队列管理策略是依据事件的成功传输次数和生存时间 (survival time) 共同进行的,成功传输次数即事件被移动订阅者成功接收的次数,生存时间即事件在网络中的存活时间,我们运用这两个值来共同表示网络中各个事件的冗余程度和重要性.

#### (1) 计算事件的生存事件

首先假设每个事件的头部均包含一个域,存放事件的生存时间值.下面我们任一节点  $j$  为例,令  $C_j$  代表节点  $j$  的本地计时器,  $\xi_j^m$  表示节点  $j$  的存储队列中事件  $m$  的生存时间值,以计算事件的生存时间.

当某事件初次产生时,此事件的生存时间被初始化为 0;当节点  $j$  将其存储队列中的任一事件  $m$  传输到下一跳节点  $n$  时,由于传输距离较短,我们可以假设事件的传输时间忽略不计,因此节点  $n$  中事件  $m$  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  $j$  中的消息,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  $j$  存储队列中的所有事件,从被节点  $j$  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容纳  $K$  个事件,整个算法流程如图 5 所示.

#### (2) 事件的成功传输次数

事件成功传输次数的计算比较简单,假设每个事件的头部均包含一个域,存放事件的成功传输次数值.初始时,每个事件的成功传输次数被初始化为 0.为了简化设计,每当一个事件被其源节点成功转发一次,我们就认为此事件能够被移动订阅者成功接收,把它的成功传输次数加 1.另外,回传的事件被当作本传感器节点自身产生的事件处理.

## (3) 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要发送的事件,这些事件来源如下:

- (1) 当节点从自身的传感单元获取数据时,就会根据这些数据产生事件,插入到自己的存储队列中.
- (2) 当节点收到其他节点发送来的事件时,就会接收这些事件并把它们插入到队列中.
- (3) 当本节点把事件发送到其他传感器节点后,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.
- (4) 传感器节点还可能接收到来自移动订阅者的回传事件,并把这些事件最终存放到自己的存储队列中.

队列管理是基于事件的成功传输次数和生存时间共同进行的.具体来说,队列中的各个事件按照成功传输次数由小到大的顺序进行排列,成功传输次数小的事件排在前面并得到优先发送权.例如,成功传输次数最小的事件被放在队列头部并得到最先发送权.而对于成功传输次数相同的事件,则按照它们的生存时间值进行排列,生存时间越短的事件的排列顺序越靠前,如图 6 所示(括号中的数字前者表示事件的成功传输次数,后者表示其生存时间).此外,以下两种场合发生事件丢弃现象:首先,一旦某事件的成功传输次数大于某个值(例如 $\alpha$ ),则立刻丢弃此事件;其次,队列中的事件在生存时间的更新过程中,一旦发现某事件的生存时间大于整个网络延迟容忍限度值(例如 $\beta$ ),则立刻丢弃此事件.定义这两种事件丢弃策略的目的主要是为了降低传感器的能耗并节约网络的带宽资源,因为成功传输次数较大或生存时间较长的事件很可能已经被传输到所有感兴趣的订阅者.另外,若事件到达时传感器的队列已满,则此传感器节点不再接收任何事件.

```

1.   $a[j] \leftarrow C_j$ ; //  $a[j]$  keep the current value of  $C_j$ 
2.  if (Receiving a NEW_SELFGENERATE_EVE  $m$  from node  $j$ )
3.       $\xi_j^m = 0$ 
4.  else
5.      if (receiving a DATA_FORWARD_EVE  $m$  form adjacent node  $n$  to node  $j$ )
6.           $\xi_j^m = \xi_n^m$ 
7.      else
8.          if (receiving a SELF_BACK_MSG from node  $j$  to node  $j$ )
9.               $\xi_j^m = \xi_j^m$ 
10.         end if
11.     For ( $m=1; m \leq K; m++$ ) //  $m$  represent events maintained by sensor  $j$ 
12.         while ( $m$  is in the queue of node  $j$ )
13.              $\xi_j^m = \xi_j^m + 1$ 
14.         end while
15.     end for

```

Fig.5 Pseudo-Code of updating the survival time

图 5 生存时间更新伪代码

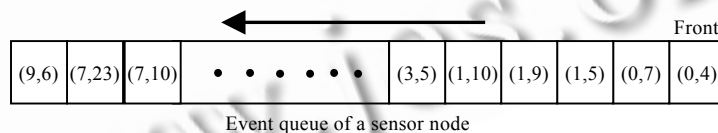


Fig.6 Sequence of events in the memory queue of sensor

图 6 传感器队列中的事件排序

## 4 仿真实验

基于第 2 节的网络模型,我们模拟实现了 CET 和直接收集 DG(direct gathering)两种事件传输协议.在直接收集协议中,当且仅当移动订阅者运动到某个传感器节点的通信范围内时才收集这个节点产生的事件,且队列的管理采取新产生的事件排序优先的原则.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(即事件的平均副本数)和平均传输延迟 3 个方面进行性能比较;
- (2) 研究不同的实验参数对两种协议性能产生的影响;
- (3) 分析比较 CET 和 DG 的网络寿命,从整体能耗方面进行协议分析.

#### 4.1 仿真环境

在模拟实验中,我们定义传感器节点产生的每个事件的头部均包含以下属性值:  $\{A_1=x_1, A_2=x_2\}$ , 其中,  $A_1, A_2$  为属性的名称,  $x_1, x_2$  是属于  $[0, 10]$  的任意整数. 而每个订阅者的订阅条件则定义为“ $A_1 < x_1$  且  $A_2 < x_2$ ”, 其中,  $x_1, x_2$  同样是属于  $[0, 10]$  区间的任意整数值. 另外, 事件平均传输成功率的计算采用了文献[18]的计算方法. 根据文献[18], 假设整个仿真过程中所有的发布者共发布了  $k$  个事件, 定义为  $n_1, n_2, \dots, n_k$ . 对于事件  $n_i$ , 设网络中对它感兴趣的订阅者数量为  $A_i$ , 并且接收到此事件的感兴趣订阅者数量为  $B_i$ . 此时, 网络的平均事件传输成功率定义为

$$\frac{\sum_{i=1}^k B_i}{\sum_{i=1}^k A_i}.$$

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, 整个模拟持续时间为 2 小时, 并定义在模拟阶段的最后 200s, 传感器节点不再产生任何事件. 其他网络参数以及相应的缺省值见表 1. 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 grids	15×15
Number of sensor node	100
Number of subscribe node	10
Initial energy of each sensor node (J)	10J
Size of each event (bite)	250bits
Number of events successfully transferred per second	20
$E_{elec}$	50nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10pJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{mp}$	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>
Speed of subscribe node $V$ (m/s)	0~5
Pause time $T_{pause}$ (s)	0~120
Maximum queue size of sensor	200 events
Value of $\alpha$	20
Maximum delay tolerant value $\beta$ (s)	2000s
Threshold value $\theta$ (J)	5
Value of $\gamma$	4

#### 4.2 性能对比

默认参数下协议的性能比较见表 2. 可以看出, 两种协议中 CET 的传输成功率较高, 达到了 91%, 远远高于 DG 协议, 因此具有更好的监测质量. 这是因为当移动订阅者和团体相遇时, 我们采取了有效的事件收集策略以尽可能地收集团体内所有传感器节点产生的事件, 并且事件的回传策略也保证了事件的可靠传输, 因此事件的传输成功率较高. 而直接收集协议的传输成功率低, 只达到了 47%, 这是因为在直接收集协议中, 当且仅当移动订阅者运动到某个传感器节点的通信范围内时, 这个传感器节点产生的数据才能被收集到, 而那些不能与订阅者相遇的传感器节点的数据则永远不能被接收.

Table 2 Simulation results comparison with default parameters

表 2 默认参数下仿真结果比较

	Delivery ratio (%)	Average copies for each event	Average delay (s)
CET	91.0	5.5	193.8
DG	47.0	75.9	615.5

表 2 还显示了两种协议的平均传输延迟和平均传输能耗,后者即事件的平均副本数.可见,DG 协议的平均传输延迟较大.这是因为传感器节点只与移动订阅者发生直接通信,造成事件的传输速度慢;而 CET 协议由于采取了有效的事件收集协议,使事件能够尽快地到达订阅者,因此与 DG 协议相比,在很大程度上减小了事件的平均传输延迟.另外,CET 协议采取事件的成功传输次数和生存时间机制来管理传感器节点的存储队列,最大成功传输次数和最大生存时间的设置清除了网络中多余的事件副本.因此,与 DG 策略相比,CET 协议的网络平均副本数大为降低.

另外,实验发现,CET 协议中事件的最大成功传输次数  $\alpha$  的选取对协议的性能有较大的影响.默认参数下, $\alpha$  的变化对 CET 协议传输成功率的影响如图 7 所示.可见,随着  $\alpha$  的增大,CET 协议的平均传输成功率逐步增大.这是因为当  $\alpha$  取值较小时,事件被成功传输较少的次数就被传感器节点丢弃,造成了一部分事件在被订阅者接收之前已经被丢弃掉了,从而导致事件的平均传输成功率相对较低;相反,当  $\alpha$  的值设置较大时,事件在网络中的存活时间较长,从而能够有更多的机会被传输到移动的订阅者,因此传输成功率较高.

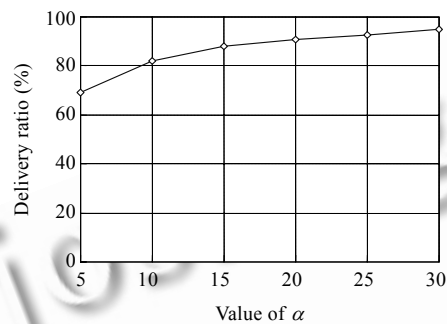


Fig.7  $\alpha$  vs. data delivery ratio

图 7  $\alpha$ 取值对传输成功率的影响

#### 4.3 订阅者运动速度对性能的影响

本组实验研究其他默认参数固定、改变订阅者的运动速度对两种协议性能的影响,实验结果如图 8 所示.需要说明的是,订阅者的运动速度是  $1 \sim V_{\max}$  之间的某个随机值.我们在实验中对  $V_{\max}$  的值作了修改,使其从 1 到 11 逐渐增大.

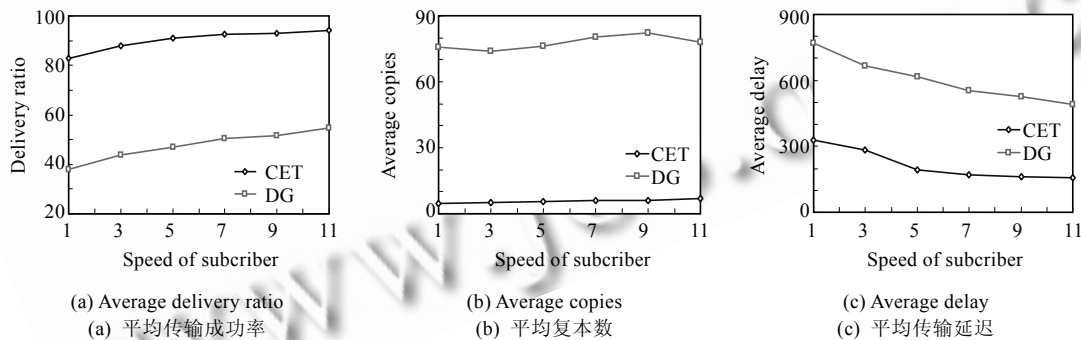


Fig.8 Impact of subscriber's moving speed

图 8 订阅者运动速度的影响

从图 8(a)可以看出,无论移动订阅者的速度如何变化,CET 协议的事件平均传输成功率都高于 DG 协议.当移动订阅者的运动速度加快时,两种协议的传输成功率均有所上升,这是因为订阅者运动速度加快意味着移动订阅者与团体和团体内传感器节点相遇的几率增大,从而增大了事件被订阅者接收的可能性.此外,订阅者的运

动速度对网络平均复本数及平均传输延迟都具有一定的影响.如图 8(b)所示,订阅者运动速度加快引起了 CET 传输能耗的增加,这同样是由于订阅者与其他传感器节点相遇的可能性增大引起平均事件复本数增加所造成的.另外,图 8(b)还显示,订阅者的运动速度对 DG 协议的复本数没有显著影响.从图 8(c)还可以看出,随着移动订阅者运动速度加快,两种协议的平均传输延迟均降低,这是因为订阅者运动速度加快后,事件能够以较快的速度被感兴趣的订阅者接收.

#### 4.4 节点的密度对性能的影响

本组实验主要研究不同传感器节点密度情况下,不同协议的性能.节点密度的变化通过改变节点的总数量  $N$  来实现,我们将节点的总数量从 40 逐渐增长到 140,实验结果如图 9 所示.

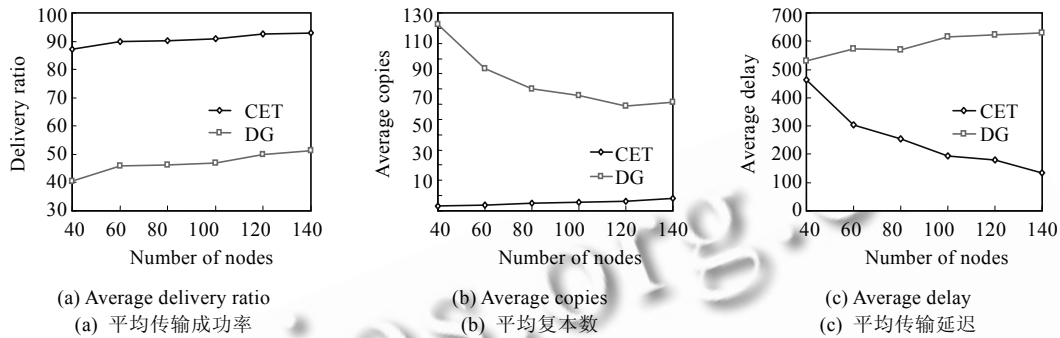


Fig.9 Impact of sensor node density

图 9 传感器节点密度的影响

从图 9(a)可以看出,随着传感器节点密度的增大,CET 和 DG 协议的平均传输成功率均有非常轻微的提高,并且 CET 协议的平均传输成功率始终远远高于 DG 协议.考虑事件的平均复本数,图 9(b)显示,随着节点密度的增大,CET 协议的平均复本数有所增长而 DG 协议的平均复本数却呈现下降的趋势,这是因为采用 CET 协议,节点数量的增多导致每个订阅者和团体相遇时收集到的事件总数量增加,从而导致满足回传条件的事件数量增加的缘故.而在 DG 协议中,节点数量的增加造成网络中更多的传感器节点不能与订阅者相遇,这些节点产生的事件也不能被及时收集,因此网络中的平均复本数减少.此外,图 9(c)还讨论了节点的密度与传输延迟的关系,因为平均复本数的增加增大了事件传输到订阅者的概率,因此随着平均复本数的增加,CET 协议的平均传输延迟减小,相反,DG 协议的事件平均传输延迟却呈现逐渐增大的趋势.

#### 4.5 节点的通信范围对性能的影响

本组实验主要研究在节点通信范围不同的情况下,采用两种协议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,节点的通信范围通过改变系统区域中网格的数量来实现.实验中,我们将系统区域网格的总数量从  $10 \times 10$  逐渐增大到  $30 \times 30$ .显然,网格数量越多,节点的通信范围越小.模拟结果如图 10 所示.

从图 10(a)不难看出,随着节点通信范围扩大,两种协议的平均传输成功率均有所上升.这是因为节点的通信范围扩大意味着每个传感器节点的邻居数量增多,从而导致网络中团体的总数量减小而每个团体的覆盖范围扩大,当移动订阅者与团体相遇时就能收集到更多传感器节点产生的事件.此外,订阅者通信范围的扩大也增大了订阅者与某些传感器节点直接通信的概率.图 10(b)表明,节点通信范围的扩大也增加了网络中事件的平均复本数.但无论节点的通信范围如何变化,由于 CET 协议有效的队列管理机制,CET 协议的平均复本数都小于 DG 协议.图 10(c)显示,随着节点通信范围的扩大,两种协议的传输延迟均逐渐减小,因为通信范围扩大会增大事件传输到订阅者的概率.由于 CET 协议的事件收集策略更加有效,因此它的平均传输延迟较低.

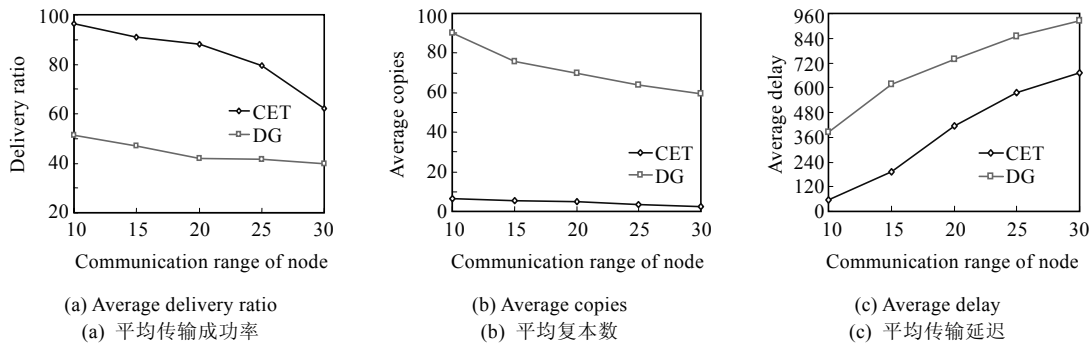


Fig.10 Impact of node transmission range

图 10 节点通信范围的影响

#### 4.6 网络寿命分析

本组实验主要研究 CET 和 DG 的网络寿命,并从总体能耗方面对协议进行分析.假设每个传感器的初始能量为 10J,且传感器节点每发送或接收特定长度事件的能量消耗采用文献[19]中的能耗模型.根据文献[19],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).我们只考虑发送和接收事件所消耗的能量.当网络的一个传感器节点能量耗尽时网络即死亡.实验结果见表 3.

Table 3 Network life with default parameters

表 3 默认参数下的网络寿命

	CET	DG
Network lifetime (day)	2.57	6.04
Delivery ratio (%)	91.0	47.0

从表 3 可以看出,两种协议中 CET 协议的网络寿命要低于 DG 协议.这主要由于采用 CET 协议时,每当移动订阅者和团体相遇时,传感器节点之间以及传感器和订阅者之间就可能相互传递大量的事件,以保证事件的传输成功率,因此节点的能耗较高.而在 DG 协议中,只有当订阅者运动到传感器节点的通信范围内时,二者才进行事件的传输,传感器节点之间并不交互,因此与 CET 协议相比,传感器节点的能耗要小.表 3 还显示,虽然 CET 协议的网络寿命低于 DG 协议,但它的事件传输成功率却远远高于 DG 协议.

## 5 结 论

与传统传感器网络相比,延迟容忍无线传感器网络 DTSN 具有的独特性质使得如何有效地进行 DTSN 中数据的分类收集和处理面临着许多困难和挑战.为此,本文引入发布/订阅通信模型,并提出了一种有效的事件传输协议 CET.与已有工作相比,CET 的主要贡献在于以下几个方面:

- (1) 提出根据传感器节点的相互连通性使网络中所有的传感器节点形成若干个团体,并基于团体进行数据分类传输的思想.
- (2) 提出一种有效的事件传输协议,当订阅者和团体相遇时,令移动订阅者尽量收集团体中的事件.另外,移动订阅者保存的某些特定事件还回传给团体,以尽可能地增大事件的传输成功率.
- (3) CET 协议引入有效的队列管理机制,使得在尽可能地增大传输成功率的同时,有效地控制了事件副本数量,降低了网络传输能耗,延长网络寿命.

大量的模拟实验结果表明 CET 协议具有优异的性能.与 DG 协议相比,CET 协议有效地平衡了事件的传输能耗和事件的传输成功率.CET 传输成功率较高且传输延迟较小.



