

文章编号:1007-130X(2007)09-0079-05

无线传感器网络数据分发方案研究综述*

Research of Data Dissemination Algorithms for Wireless Sensor Networks

陶孜谨, 欧阳一星, 龚正虎, 卢泽新

TAO Zi-jin, OUYANG Yi-xing, GONG Zheng-hu, LU Ze-xin

(国防科技大学计算机学院, 湖南 长沙 410073)

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要:无线传感器网络是一种新型的自组织网络,有着广泛的应用前景。本文分析了无线传感器网络的特性、结构及应用领域,给出了传感器网络数据分发的定义和依赖的一些底层路由通讯机制。对于已有的一些传感器网络数据分发算法进行了分类,并具体给出了几种重要的数据分发算法的关键思想。最后,总结了今后能量高效的数据分发算法的设计研究思路。

Abstract: Wireless Sensor Networks (WSNs) is a new type of self-organising networks, it has a wide application foreground. This paper analyses the characteristics, structure and application domain of sensor networks, gives the definition of data dissemination of wireless sensor networks and the underlying routing and communication schemes. This paper categorizes the existing data dissemination algorithms of wireless sensor networks, and gives the key ideas of some classical data dissemination algorithms. Finally, this paper proposes the promising ideas for designing energy-efficient data dissemination algorithms.

关键词:传感器网络;节点;能量高效;数据为中心;数据分发;路由

Key words: sensor network; node; energy efficient; data-centric; data dissemination; routing

中图分类号: TP393

文献标识码: A

1 引言

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、低功耗的传感器节点共同组织成无线传感器网络,通过节点间的相互协作,将其监测和感应的多种环境信息(如温度、湿度等)传送到基站(Base Station)进行处理。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)具有广阔的应用前景,可以应用在国防军事、救灾、环境监测等各个领域。由于其巨大的应用价值,无线传感器网络已经引起了各国军事部门、工业界和学术机构的极大关注,并纷纷展开了该领域的研究工作。目前,由微型传感器节点组成的无线传感器网络已经成为一个研究热点。

在大规模布置的无线传感器网络中,节点通过飞机散布、人工布置等方式,大量部署在监测对象内部或者附近。这些节点通过自组织方式构成无线网络,以协作的方式感知、采集和处理网络覆盖区域中特定的信息,可以实现监测区域内任意地点的信息在任意时间的采集、处理和分析。这种以自组织形式构成的网络由三个主要部分组成^[1]:传感节点、终端节点(Sink)和观察对象。传感节点散布在观察区域内,采集及观察与对象相关的数据,并将协同处理后的数据传送到 Sink。Sink 可以通过因特网或通信卫星实现传感器网络与任务管理节点通信。

一个传感器节点由四个基本模块组成:传感器模块、处理器模块、传输模块和能量供应模块。传感器模块通常由两个附加模块组成:传感器和 AC/DC。模拟信号由观测传感器产生,这些信号被 AC/DC 转换成数字信号,并且反馈给处理器模块。处理器模块一般与一个存储模块一起管理

* 收稿日期:2006-07-12;修订日期:2006-12-06

基金项目:国家 973 计划资助项目(2003CB314802)

作者简介:陶孜谨(1973-),男,湖南长沙人,博士生,助理研究员,研究方向为计算机网络与通信、无线传感器网络;欧阳一星,工程师,研究方向为无线传感器网络;龚正虎,教授,博士生导师,研究方向为计算机网络与通信、网络协议工程;卢泽新,研究员,研究方向为计算机网络与通信、卫星网络和无线传感器网络。

通讯地址:410073 湖南省长沙市国防科技大学计算机学院 612 教研室;Tel:13874829021;E-mail:zjtao123@21cn.com

Address: Section 612, School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, P. R. China

这个传感器节点与其它节点联合执行信号传感任务。传输模块把节点同网络连接在一起。传感器节点最重要的部分就是能量供应模块,通常采用微型电池。由于应用的不同,传感器节点还存在一些附加模块。很多传感器网络的路由技术和感知任务需要准确地知道地理位置。所以,传感器节点一般要有定位系统。

因为传感器节点是难以接触的,所以传感器网络的生命周期决定于节点电源的生命周期。因为大小的局限性,能量仍然是一种供应不足的资源。

2 数据分发方案

传感器网络是一种以数据为核心的网络^[1]。对于观察者来说,传感器网络的核心是感知数据,而不是网络硬件。观察者感兴趣的是传感器产生的数据,而不是传感器本身。观察者不会提出这样的查询:从A节点到B节点的连接是如何实现的,他们经常会提出如下的查询:网络覆盖区域中哪些地区的温度高于70℃。在传感器网络中,传感器节点不需要地址之类的标识。观察者不会提出查询:地址为27的传感器的温度是多少,他们感兴趣的查询是:某个地理位置的温度是多少。综上所述,传感器网络是一种以数据为中心的网络。

以数据为中心的路由采用基于元数据标识的、以数据为中心的通信方式,在传感器网络上行之有效的。以数据为中心的路由实际上已不再是简单意义上的分组路由,它建立在泛洪路由之上,还实现了局部数据的融合和广域数据的提取。为了和传统网络的路由算法区分,在无线传感器网络中,将这种建立在分组路由之上,实现监测范围内的分布式数据的收集和处理的方法,称为数据分发算法。

数据分发算法的目的是对监测范围内的分布式数据进行聚合处理。它与物理和链路等基础层无关,与它紧密联系的有如下几方面^[2]:

(1)简单分组路由:数据分发算法建立在简单分组路由上,包括泛洪/受限泛洪路由和基于位置信息的路由算法。

(2)局部数据融合:传感器网络中局部范围内的节点往往监测的数据相似,通过局部数据融合可使不同节点所携带的多个数据在局部范围内融合成新的数据,从而减少网络中的数据通信量。数据分发算法一般包含了局部数据融合的信息处理手段。

(3)广域数据提取:数据分发算法与简单的分组路由最大的不同在于,它要完成在整个网络中提取所需数据的过程。数据分发算法一般采用基于元数据标识的、以数据为中心的通信方式,包含查询分组在网络中的分发和数据分组向终端节点发送两个过程。

(4)任务和查询处理:任务和查询的处理建立在数据分发算法之上,为用户下达查询和任务指令。例如,处理分布式的传感器网络数据的TinyDB^[3]就是在数据分发算法之上进行复杂的任务和查询处理的系统。

对于不同的应用传感器网络可采用不同方式组网,因此不同应用所适用的数据分发方案也不同。当节点监测到一个事件时,节点能采取三种行为:将监测数据发送到网络外部存储;将监测数据在本地存储;将监测数据存储至内部

网络某处。按照这三种不同的数据存储方式,将目前常用的适用于无线传感器网络的数据分发方案分为三类^[2]:基于外部存储的数据分发方案、基于局部存储的数据分发方案以及基于以数据为中心存储的数据分发方案。

2.1 数据分发方案的路由基础

传感器的数据分发算法建立在已有的路由协议基础上,通过这些协议把数据分发到指定节点或位置。这些协议可以大致分为四类:泛洪式路由协议、层次式路由协议、以数据为中心的路由协议以及基于位置信息的路由协议。

(1)泛洪式路由协议^[4]:这种协议是一种古老的协议。它不需要维护网络的拓扑结构和路由计算,接收到消息的节点以广播形式转发数据包给所有的邻节点。对于自组织的传感器网络,泛洪式路由是一种较直接的实现方法,但容易带来消息的“内爆”(Implosion)和“重叠”(Overlap),而且它没有考虑能源方面的限制,具有“资源盲点”(Resource Blindness)的缺点。

为了解决泛洪模型的缺陷,有些算法提出构造一个有限的区域,并使泛洪在这个受限域内进行,从而减少泛洪时报文转发的盲目性,降低能耗,这种路由技术为受限泛洪路由。例如,GEAR算法和TTDD算法中构造出一定的矩形区域,使查询分组泛洪局限在这个矩形区域中。受限泛洪限制了泛洪的区域,降低了传统泛洪的能耗,但是它无法完全消除分组转发时的无目的性。

(2)层次式路由协议^[5,6]:它的基本思想是将传感节点分簇,簇内通讯由簇头节点来完成,簇头节点进行数据聚集和合成,减少传输信息量,最后簇头节点把聚集的数据传送给终端节点。这种方式能满足传感器网络的可扩展性,有效地维持传感节点的能量消耗,从而延长网络生命周期。该类型的协议主要包括LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy,简称LEACH)、TEEN(Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol,简称TEEN)以及APTEEN(Adaptive Periodic TEEN,简称AP-TEEN)等。

层次式路由比泛洪路由更能满足网络的可扩展性,并能有效维持传感节点的能量消耗。但是,这种方式简单,沿用了无线Ad Hoc网络的路由思想,忽略了传感器网络“无网络标识”的特点,不能很好地应用于无线传感器网络。

(3)以数据为中心的路由协议^[7~9]:它提出对传感器网络中的数据用特定的描述方式命名,数据传送基于数据查询并依赖数据命名,所有的数据通信都限制在局部范围内。这种方式的通信不再依赖特定的节点,而是依赖于网络中的数据,从而减少了网络中大量传送的重复冗余数据,降低了不必要的开销,从而延长网络生命周期。该类型的协议主要有SPIN、定向扩散(Directed Diffusion,简称DD)、GRAB(Gradient Broadcast)以及流言路由等。同时,根据数据流的启动过程又可将协议分为事件驱动型、查询驱动型和混合驱动型。

以数据为中心的路由方式使通信不再依赖特定的节点,而是依赖于网络中的数据,从而减少了网络中大量的重复冗余数据,减少了不必要的通信开销,从而延长了网络寿命。但是,这种方式需要将查询分组在整个网络中泛洪,以达到所有可能的监测节点,从而带来大量查询发布的通信

开销。

(4) 基于位置信息的路由协议^[10~12]：它利用节点的位置信息,把查询或者数据转发给需要的地域,从而缩减数据的传送范围。实际上许多传感器网络的路由协议都假设节点的位置信息为已知,所以可以方便地利用节点的位置信息将节点分为不同的域(Region)。基于域进行数据传送能缩减传送范围、缓和中间节点,从而延长网络生命周期。该协议类型主要包括 GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing,简称 GPSR)和 GEAR(Geographical Energy Aware Routing,简称 GEAR)等。

2.2 基于外部存储的数据分发方案

基于外部存储的数据分发方案(简称 ES 方案)的中心思想是:源节点一旦监测到事件,便将监测数据直接发送至网络外部节点进行存储。需要获取数据时直接在外部节点上对存储的数据进行查询。

2.3 基于局部存储的数据分发方案

基于局部存储的数据分发方案(简称 LS 方案)中源节点一旦监测到事件,便直接存储数据至本地存储点。终端节点需要数据时产生一定的查询分组,并将查询分组在整个网络中泛洪直至到达所有存储点,存储点根据查询分组将匹配数据返回至终端节点。DD^[7,8]、TTDD^[13]、SPMS^[14]等数据分发算法和大部分以数据为中心的路由算法均采用 LS 方案。基于 TinyOS 传感器的数据库查询处理系统 TinyDB 就是一种基于局部存储的数据分发系统,它提供了一种简单的类似 SQL 的接口来获取想要的数据库。

2.4 以数据为中心存储的数据分发方案

一旦源节点监测到事件便将相关数据存储至特定节点,这种方式是以数据为中心存储的数据分发方案(简称 DCS 方案)^[15]的基本思想。GHT^[15]、R-DCS^[16]是基于 DCS 方案的数据分发算法。这种方案根据监测事件元数据的某属性值(如类型)选择特定的存储点,将所有同类数据发送并存储至该存储点。需要此类数据的查询分组采用类似的元数据标识,从而能发送至同一存储点,存储点根据查询分组将匹配数据返回至终端节点,完成数据的获取。

图 1 反映了 DCS 方案的数据存取原理。假设节点 A 和节点 B 监测事件元数据的关键属性值为 K,且 K 的存储节点是 C,那么 A 和 B 将监测数据直接发送并存储至节点 C。终端节点 S 需要获取属性为 K 的事件信息时,可根据一定的规则到存储节点 C 上直接获取匹配数据。

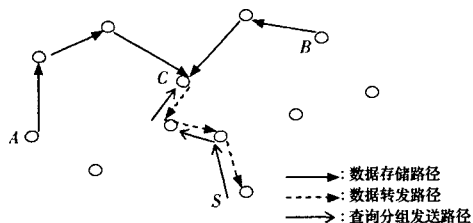


图 1 DCS 方案的数据存取原理

2.5 三种数据分发方案的性能分析比较

ES 的数据存储通信代价高,查询代价低,总通信代价一般比 LS 高,但其优点是:查询响应快,存储数据的节点可以事前进行一些数据分析,方便查询。

LS 数据存储的通信代价小,而查询的开销大,如果不是基于位置的查询(例如 TTDD 中提到的查询,根据节点的位置进行查询)则需要泛洪。例如,要查温度超过 70℃ 的节点(位置),那么 ES 就很快;而 LS 则需要泛洪,代价也高。DCS 方式有时也不能解决这个问题,除非事前就把温度超过 70℃ 作为一个事件存起来。

如前所述,对于不同的应用,无线传感器网络有不同的组织方式,缺乏确定的、统一的模型。为比较以上三种数据分发方案的性能,可采用简化的无线传感器网络分析模型,简单估算三种数据分发方案的性能。

分析模型假设传感器网络由 n 个节点组成,目的是监测 T 类不同事件。对于不同的路由方式,通信的代价一般采用 \sqrt{n} 表示, $D_{total}\sqrt{n}$ 代表产生的所有监测数据的分组, Q 代表查询的命令, D_q 代表查询返回的数据分组,并简单假设所有分组的大小相等。

用总通信量和热点通信量作为性能分析的评估指标。由于存储点或终端节点的邻节点是整个传感器网络中负载最大点,故对这些节点上通信量的评估可作为热点通信量。对于 DCS 方案,热点通信量取决于存储的通信量和查询的数量,如果查询的数量大,则查询点成为热点;如果数据存储量大,则数据存储点成为热点。评估结果如表 1 所示。

表 1 三种数据分发方案的比较

方案名称	总通信量	热点通信量
ES	$D_{total}\sqrt{n}$	D_{total}
LS	$Qn + D_q\sqrt{n}$	$Q + D_q$
DCS	$Q\sqrt{n} + D_{total}\sqrt{n} + D_q\sqrt{n}$	$\text{Max}(\frac{1}{T}(Q + D_{total}), (Q + D_q))$

由表 1 可知:如果所有其他参数固定不变,则当网络规模很大,即 n 很大时,LS 方案总通信量最大,它与 ES 方案总通信量的比值为 $\frac{Q\sqrt{n} + D_q}{D_{total}}$ 。DCS 方案的总通信量恒大于 ES 方案,且两者之比为 $1 + \frac{Q + D_q}{D_{total}}$ 。若监测数据量大,则该比值不大(假设每次查询至少会返回一个数据,则该比值的最大值为 3,最小值近似于 1);若监测数据量远大于查询数据量,即 $D_{total} \gg \text{Max}[Q, D_q]$,则 LS 方案和 DCS 方案的热点通信量远小于 ES 方案。若仅从总通信量和热点通信量来看:

(1) 若监测数据量与查询数据量相似,即 $D_{total} = \text{Max}[Q, D_q]$,则 ES 最优。

(2) 网络规模中等,监测数据量远大于查询数据量,同时监测数据量大于系统查询规模,即 $(D_{total} \gg \text{Max}[Q, D_q]) \wedge (D_{total} > Q\sqrt{n})$,则 LS 方案最优。

(3) 网络规模大,监测数据量远大于查询数据量,同时监测数据量小于系统查询规模,即 $(D_{total} \gg \text{Max}[Q, D_q]) \wedge D_{total} \leq Q\sqrt{n}$,则 DCS 方案最优。

3 一些重要的数据分发算法

3.1 DD

定向扩散^[7,8]算法的主要思想是对网络中的数据用一

组属性对命名,基于数据进行通信。DD采用查询驱动数据传送模式。当Sink节点对某事件发出查询命令时就开始一个新的定向扩散过程,由查询扩散、初始梯度建立和数据传送三个阶段构成(见图2)。

在查询扩散阶段,Sink节点采用和目标数据相似的一组属性对(对象的名称,数据发送间隔时间,持续时间,位置区域)来命名它发出的查询信息,并将查询信息通过广播逐级扩散,收到查询信息的节点缓存信息,并进行局部数据融合,最终查询信息遍历全网,找到所有匹配的目标数据,如图2a所示。

初始梯度建立阶段实际上和查询扩散阶段是同时进行的,当节点从邻接节点接收到查询信息时,若当前查询缓存没有相同查询记录,则加入新记录,记录中包含了邻接节点指定的数据发送率,也就是“梯度”,如图2b所示。

在数据传送阶段,Sink节点会对最先收到新数据的邻接点发送一个加强选择信息(发送具有更大的梯度)的查询信息),接收到加强选择的邻接点同样加强选择它的最先收到新数据的邻接点,将这个带“梯度”值的查询信息进行扩散,这样最后会形成一条“梯度”值最大的路径。目标数据能沿这条加强路径以较高的数据发送率来传送数据,而其他数据发送率停留在较低水平的节点组成的路径可以作为备选路径,以增加网络可靠性,如图2c所示。

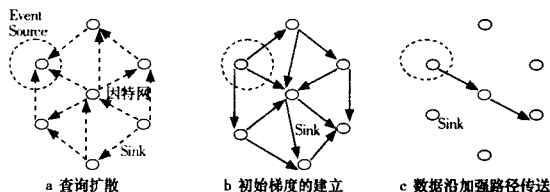


图2 Directed Diffusion 协议三个阶段

DD采用邻接点间通信的方式来避免维护全局拓扑,采用查询驱动数据传送模式和局数据聚集以减少网络数据流,因此是一种高能源有效性的协议。它的缺点是:在需要连续数据传送的应用中(环境监测等)不能很好地应用;数据命名只能针对于特定的应用预先进行;初始查询的扩散开销大。

3.2 TTDD

TTDD^[13]算法是一种基于LS方案的数据分发算法。为了避免传统LS方案中查询分组泛洪带来的额外开销,TTDD利用传感器节点对位置信息的可知性和节点处于静态的特点,根据网络的覆盖范围,建立并维持一种虚拟网络结构,由网络交叉点进行分组转发,并将查询分组泛洪控制在网络单元范围内。同时,TTDD算法还引入“两层代理”机制来支持终端节点的移动。TTDD算法建立在Greedy^[17]路由选择算法之上。

网络有效期结束后,网络结构失效。若源节点监控范围内仍有目标,则源节点将定期分发控制分组以维持虚拟网络结构。同时,TTDD采用邻节点备份的方式来避免节点失效导致的网络结构丢失。

3.3 SPMS

SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation,简称SPIN)^[9,18]要通过与其邻居握手来得知它已包含

哪些数据且需要哪些数据。在SPIN中的节点使用High-Level Data Descriptors(叫元数据(Meta-Data))来检验一个节点是否需要数据,从而减少了多余的数据传递。文献[14]提出了SPMS(Shortest Path Minded SPIN,简称SPMS),它减少了能量开销和SPIN中端到端的延时,它的实现是因为传感器节点可以在多个能量级下工作,并且一旦开始元数据的协商,协议的其余部分以及数据的传输都可以最低的能量等级在多跳方式进行。SPMS可能在目标节点和源节点之间增加了潜在的数据。但是,这并不存在太大问题,减少了能量的传输等级使得MAC层对于共享无线信道的竞争降低到一个很低的等级,因此减少了MAC层的后退(Backoff)延迟,使得SPMS的整个延迟降低。SPMS对于节点和链路的失效有一定的弹性,因为数据通过中间节点进行交换,中间节点对这些数据进行缓存以容忍源节点或其他中间节点失效。

文献[14]中通过理论分析表明,SPMS减少了能量开销且减少了延时,并通过仿真证明了在静态和动态、失效和不失效的情况下,SPMS相对SPIN都有改善。仿真结果表明,在静态情况下,SPMS减少了10倍的延时,能量消耗平均减少30%。即使移动带来了额外开销,在能量方面,SPMS相对SPIN节省了5%~21%。

3.4 GHT

GHT^[15]算法是一种基于DCS方案的数据分发算法,它沿用了以数据为中心的路由算法的基本思想,即查询分组和监测数据都采用元数据标识,通过分配不同的属性值来表示不同的任务或监测事件。基于DCS方案的数据分发算法中,特定监测事件存取点的选择至关重要。GHT算法根据元数据中特定的属性值来确定存取点,使同一类型监测事件的监测数据保存至同一存取点,而不再是直接在监测节点上保存。

GHT算法的核心步骤是建立哈希函数 $H(K)$ ^[19~21],将数据分组和查询分组元数据标识中的特定属性值关键字 K (如事件类型属性值)哈希映射到一定的地理位置,并选择该地理位置附近的节点为存取点。GHT算法支持存和取两种相关操作: $Put(K,V)$ 基于监测数据属性值的关键字为 K 的监测数据 V ; $Get(K)$ 获取属性值关键字为 K 的监测数据。特定的 K 值通过 $Put()$ 操作或 $Get()$ 操作都将映射到相同的地理位置,从而使对 $K-V$ 对存取或取都在同一存储点上进行。GHT算法建立在GPSR^[10,11,22]路由选择算法之上。

3.5 R-DCS

文献[16]提出了在DCS方案中复制控制信息和数据信息,作为减少数据获取流量并增加对于节点失效的鲁棒性的主要机制。文献[16]把同种类型数据存储至网络中某种类型的几个复制节点中的一个,而与之相关的控制和总结信息存储在网络中地理位置分布的监视(Monitoring Nodes)节点上。对于某种事件类型,通过增加其数据的存储节点数量,而且在几个节点中保存数据信息和控制信息,发现既减少了储存数据的平均开销,又减少了查询数据的平均开销。在大量传感器节点和大量查询信息的情况下,文献[16]证明了R-DCS(Resilient Data-Centric Storage,简

称 R-DCS)方案优于现有的方案。在文献[16]中还证明了当传感器网络中传感器节点不可靠且经历随机失效时,R-DCS 方案发送的消息数目并没有随着节点失效率的增加而显著增加。在这种情况下,R-DCS 也仍然保证了查询的高成功率,因此在节点失效时实现了很好的性能下降曲线。

3.6 ARI

研究人员提出了一种基于索引(Index-Based)^[23]的数据分发方案,它把一个事件的感知数据存储在监测节点或监测节点的邻居节点(这些节点被称作存储节点)。存储节点仅当收到来自 Sink 的查询分组时,才返回数据至 Sink,它是基于查询驱动的。索引信息被存储至索引点,它基于存储数据的事件类型,从而对于不同事件的查询将会路由至不同的索引点。基于索引的数据分发方案优于现有的数据分发方案,因为它不仅避免了不必要的传递监测数据的开销,而且不必要在整个网络中泛洪控制信息。毋庸置疑,保持索引信息带来了额外的开销。但是,文献[23]证明 ARI 提高了整个系统的性能。

基于索引的数据分发方案最大的挑战就是,即便是从 Sink 节点收到大量查询信息也不过载的情况下,如何在网络中保持索引信息。为了达到这个目的,研究人员提出了一种基于环的结构,并将其命名为可适应性基于环索引的算法 ARI(Adaptive Ring-based Index,简称 ARI)。在 ARI 中,对于某一特定事件的索引节点是一系列排列在该事件类型的索引中心的节点。索引中心事先由哈希函数选出。通过哈希函数,一种事件类型可能映射到监测区域中的一个或多个位置,对于同一事件类型的索引节点通过中间节点连接起来,构成了索引环(Index Ring)。为了负载均衡和优化系统性能,一个索引环中索引点的数量和位置可适应性地改变。

六种数据分发方案对比如表 2 所示。

表 2 六种数据分发方案对比

方案	能量效率	路由方式	查询成功率	延迟	Sink 移动性支持	坚固性
DD	一般	泛洪,源路由	高	初始较高,而后低	较好	好
TTDD	一般	地理路由	较高	网格初始建立时高,而后低	好	较好
SPMS	高	邻居通信	高	低	好	一般
GHT	较高	地理路由	较高	较低	好	较好
R-DCS	较高	地理路由	高	较低	好	好
ARI	高	地理路由	较高	较低	好	较好

4 未来的研究方向

现有无线传感器网络的最大瓶颈是能量的有限性,因此如何节约能量、设计能量高效算法是传感器网络各层协议追求的重点。对于数据分发算法而言,笔者认为,未来的传感器网络数据分发算法有以下一些研究思路:

(1)充分利用计算机网络中的一些最新技术。例如,P2P 网络中支持邻近性(Locality)的动态 Hash 表(DHT)技术、网络分簇(Clustering)技术、数据库中的元数据提取技术能够更进一步减少基于地理 Hash 表的数据分发算法的数据传输数量。

(2)充分结合传感器网络的一些最新的能量高效的 MAC 层通讯技术和路由技术。例如,S-MAC 能够比原 IEEE 802.11 节约大量的能量;而如 MTE^[24]、PEGASIS^[25]、GEAR^[12]等能量高效的路由算法能够极大地降低数据在多跳传输过程的能量消耗。因此,如何有机结合这些路由协议和 MAC 层协议是数据分发算法要重点考虑的问题。

(3)充分利用拓扑信息。由于传感器的定位技术不断发展,传感器的位置不断精确,而为了节约能量,要求传感器在部署(Deployment)和调度(Scheduling)上更进一步精确并保持适度冗余。因此,如何利用各传感器的拓扑信息、覆盖信息、调度信息而使得数据分发的报文数量和发生距离变短是一个重要的研究方向。

(4)除了考虑网络的总能耗外,还要考虑网络的负载均衡性,即各节点的能耗,避免热点区域或热点节点,因为传感器网络的生存时间定义为第一个失效节点的出现时间,所以要尽量让数据的收发等高能耗操作尽量均衡分布到各节点。

5 结束语

无线传感器网络的核心是能量的有限性,而无线传感器网络的数据分发算法除了考虑数据投递的有效性和成功率之外,最重点考虑的就是能量高效性。现有的一些好的数据分发算法与用户的需求紧密结合,充分利用能量高效的底层通讯技术,有效减少了数据通讯量。在此基础上,一些好的数据分发算法还考虑了数据存储和访问的鲁棒性。本文在探讨了一些好的数据分发算法的同时,还给出了未来的一些研究方向,希望能起到抛砖引玉的作用。

参考文献:

- [1] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717-1727.
- [2] Shenker S,Ratnasamy S,Karp B,et al. Data-Centric Storage in Sensornets[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,2003,33(1):137-142.
- [3] Madden S,Franklin M J,Hellerstein J M. TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review,2002,36(S1):131-146.
- [4] Hedetniemi S,Liestman A. A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks[J]. Networks,1988,18(4):319-349.
- [5] Heinzelman W R,Chandrakasan A P,Balakrishnan H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[A]. Proc of the 33rd Hawaii Int'l Conf on System Sciences[C]. 2000. 3005-3014.
- [6] Gupta G,Younis M. Load-Balanced Clustering of Wireless Sensor Networks[A]. Proc of the 2nd ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking & Computing[C]. 2003.
- [7] Intanagonwiwat C,Govindan R,Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication[A]. Proc of MobiCOM '00[C]. 2000.
- [8] Estrin D,et al. Directed Diffusion for Wireless Sensor Net-

(下转第 105 页)

讨论了RMB、DMB、FDMB、EDFB四种反向调度算法和RMF和EDFF两种正向调度算法对容错调度算法的影响。经过在BCE算法中模拟分析,EDFF算法较RMF算法具有更高的调度性能,而在EDFF正向调度算法下,四种反向调度算法在BCE算法中性能相近。综合考虑调度性能和算法复杂度,RMB、DMB更加适用于软件容错调度模型。

参考文献:

- [1] Al-Omari R, Somani A K, Manimaran G. Efficient Overloading Techniques for Primary-Backup Scheduling in Real-Time Systems[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2004, 64(5): 629-648.
- [2] George Marconi de Araujo Lima. Fault-Tolerance in Fixed-Priority Hard Real-Time Distributed Systems, [Ph D Thesis] [D]. University of York, 2003.
- [3] Han C C, Shin K G, Wu J. A Fault-Tolerant Scheduling Algorithm for Real-Time Periodic Tasks with Possible Software Faults[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2003, 52(3): 362-372.
- [4] 韩建军, 李庆华, Essa A A. 基于软件容错的动态实时调度算法[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(2): 315-321.
- [5] 李庆华, 韩建军, Essa A A, 等. 硬实时系统中基于软件容错的动态调度算法[J]. *软件学报*, 2005, 16(1): 101-107.
- [6] Liu C L, Layland J W. Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard Real-Time Environment[J]. *Journal of the ACM*, 1973, 20(1): 46-61.
- (上接第 83 页)
- working[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2003, 11(1): 2-16.
- [9] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive Protocol for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks [A]. *Proc of Mobicom'99*[C]. 1999.
- [10] Karp B. Greedy Perimeter State Routing. Invited Seminar at USC/ISI[Z]. 1998.
- [11] Karp B, Kung H T. GPSR; Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks[A]. *Proc of the 6th Annual ACM/IEEE Int'l Conf on Mobile Computing and Networking*[C]. 2000.
- [12] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[R]. Technical Report UCLA-CSD TR-01-0023, Department of Computer Science, UCLA, 2001.
- [13] Luo Haiyun, Ye Fan, Cheng Jerry, et al. TTDD: A Twotier Data Dissemination Model for Largescale Wireless Sensor Networks[A]. *Proc of the 8th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking*[C]. 2002. 148-159.
- [14] Khanna G, Bagchi S, Wu Y S. Fault Tolerant Energy Aware Data Dissemination Protocol in Sensor Networks[A]. *Proceedings of the 2004 Int'l Conf on Dependable Systems and Networks*[C]. 2004. 795-804.
- [15] RatNasamy S, Karp B, Yin L, et al. GHT: A Geographic Hash Table for Data-Centric Storage[A]. *Proc of the ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*[C]. 2002.
- [16] Ghose A, Grossklags J, Chuang J. Resilient Data-Centric Storage in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks[A]. *Proc of the 4th Int'l Conf on Mobile Data Management*[C]. 2003. 45-62.
- [17] Finn G G. Routing and Addressing Problems in Large Metropolitan-Scale Internetworks[R]. Technical Report ISI/RR-87-180, Information Sciences Institute, 1987.
- [18] Kulik J, Heinzelman W, Balakrishnan H. Negotiation Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks[J]. *ACM Wireless Networks*, 2002, 8(2-3): 169-185.
- [19] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A Scalable Content-Addressable Network[A]. *Proc of ACM SIGCOMM'01*[C]. 2001. 161-172.
- [20] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications[A]. *Proc of ACM SIGCOMM '01*[C]. 2001.
- [21] Zhao B Y, Kubiawicz J, Joseph A. Tapestry: An Infrastructure for Fault-Tolerant Wide-Area Location and Routing[R]. Technical Report UCB/CSD-01-1141, EECS Department, University of California at Berkeley, 2001.
- [22] Karp B. Geographic Routing for Wireless Networks; [Ph D Dissertation] [D]. Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2000.
- [23] Zhang Wensheng, Cao Guohong, La Porta Tom. Data Dissemination with Ring-Based Index for Wireless Sensor Networks[A]. *Proc of the 11th IEEE Int'l Conf on Network Protocols*[C]. 2003. 305-314.
- [24] Doshi S, Brown T X. Minimum Energy Routing Schemes for a Wireless Ad Hoc Network[A]. *Proc of IEEE INFOCOM'02*[C]. 2002.
- [25] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems[EB/OL]. <http://www.cs.wayne.edu/~loren/csc8220-info/menu.html>, 2006-10.
- [26] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [27] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 392-422.
- [28] Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. *Elsevier Ad Hoc Network Journal*, 2003, 3(3): 325-349.
- [29] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1291.