

无线传感器网络多 sink 路由技术研究*

徐 晨, 曹 磊, 章国安, 顾金媛
(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226000)

摘 要: 在介绍无线传感器网络路由协议的独有特点后, 给出了传感器网络多 sink 路由协议的分类方法, 然后着重分析了当前较为有代表性的多 sink 路由协议, 在协议特点及其应用范围方面进行了研究与比较。最后, 总结了多 sink 路由协议的研究的关键点及其发展趋势。
关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 多 sink
中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)03-0816-08
doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.004

Overview of multiple sink routing protocols in wireless sensor networks

XU Chen CAO Lei ZHANG Guo'an GU Jin-yuan
(School of Electronic & Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226000, China)

Abstract: After introducing wireless sensor network routing the unique features of the agreement, this paper gave classification methods for the multi-sink sensor network routing protocol, and then focused on analysis of the current representative of the multi-sink routing protocols, the research and comparison on characteristic and their scope of application. Lastly, concluded the multi-sink routing protocols on the key points and its development trend.
Key words: wireless sensor networks; routing protocol; multiple sink

在无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs)^[1] 中, sink 节点又叫做网关节点, 网络中的传感器节点采集环境变量并将它们传送给 sink 节点, 然后, sink 节点通过无线方式接收各传感器节点的数据并以有线或无线的方式将数据传送给最终用户计算机。Sink 是将传感器网络与现有的远程通信基础设施 (PSIN, GSM, CDMA 等) 相互连接的无线装置, 也可看做是提取传感器网络信息的移动节点^[2]。

随着微机电、无线通信等关键支撑技术研究的持续发展, 无线传感器网络的研究也进一步得到深化, 无线传感器网络适用的领域也越发宽广。有人适时地提出多媒体无线传感器网络的概念, 以满足人们在传感器网络平台下对如图像、语音, 甚至视频数据信息传输的需求^[3]。传统传感器网络研究的重点是在能量严重受限的微型节点上如何实现简单的环境数据 (如光强、温度、湿度等) 采集、传输与处理, 此时整个网络数据速率较低, 用户对网络延时、误码率并不敏感, 但当传输的是多媒体信息时, 用户对传输的实时性、容错性等将提出更高的要求。传统的单 sink 网络过于依赖惟一的 sink 节点, 其实时性、可靠性等将不能满足此类应用的需要。

目前传感器网络的运用已经取得一定的进展, 但一般还是小规模、低密集度网络模式。随着无线传感器网络各项技术的成熟, 大规模、高密度网络布局将会成为可能, 这时单 sink 节点的网络结构在能耗均衡性、可靠性等方面存在着诸多的弊端, 显得难以满足传感器网路今后发展的需求。多 sink 节点网络架构无疑可以较好地解决上述问题, 它将越来越受到研究

人员的关注。
目前, 多 sink 传感器网络已经出现一些应用上的尝试。在 2008 年初, 中国南极考察队克服低温、高海拔和雪面极其松软的困难, 在 Dome A 地区成功安装上了由中国科学院遥感应用研究所研发的无线传感器网络, 为防止因通信故障造成的数据丢失, 系统设计为双基站 (sink) 系统, 节点所发出的数据一方面被通信系统接收后传回国内, 同时还被一台值守系统接收存储于本地, 待下次考察队到此时取回。在文献 [4] 提到还用于布设于水下无线传感器网络系统等。这些应用上的尝试为多 sink 节点结构网络的研究工作提供了宝贵的经验。

无线传感器网络路由技术

无线传感器网络路由协议负责在 sink 节点与非 sink 节点间可靠地传输数据信息。路由协议的分类方法有很多种, 根据路由协议采用的通信模式、路由结构、路由建立时机、状态维护、节点标志和投递方式等策略可将其分类为^[5-6]单路径路由协议和多路径路由协议、平面路由 (flat-based) 和层次路由 (hierarchical-based)、主动路由协议、按需路由协议、保证 QoS 和不保证 QoS 的路由协议以及整合了不止一种路由协议的混合路由协议等。
整体而言传感器网络在考虑其路由协议时, 一般要考虑以下这些限制因素^[6-7]:
a) 节点布设。传感器网络中, 节点的布设基本可以分为人工布设和随机布设两类。此时, 节点布设的密集度将直接影

收稿日期: 2009-06-24 修回日期: 2009-08-31 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2007AA01Z330); 江苏省属高校自然科学重大基础研究资助项目 (07KJ51007); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (CX09 S_021 Z)
作者简介: 徐晨 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向为无线通信等 (c_b314062@hotmail.com); 曹磊 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络等; 章国安 (1965-), 男, 教授, 主要研究方向为移动通信等; 顾金媛 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线 mesh 网络等。
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响网络的自组,太密集容易引起无线通信冲突,太稀疏又难免会存在监测盲区,甚至部分节点无法接入整个网络。

b)能量消耗。传感器网络中节点供电一般是微型电池,电能非常有限。对于网络中每个具有感知、处理、通信能力的节点而言,每一项操作都要消耗一定的电能,而尤以通信消耗的能量最大。所以在设计一个路由算法时,要在满足应用要求的前提下,尽量简化算法,使整个网络获得最大的生存周期。

c)数据报告方式。传感器网络中数据报告方式一般分为时间驱动、事件驱动、询问驱动三种,或是它们的组合方式。时间驱动方式比较适合需要周期性监测的应用场合;事件驱动方式时,节点对由于特定突发事件导致的感知数据的变化作出快速的反应;询问驱动方式是对基站或者网络中的节点发出的询问信息作出回应的工作模式。很多路由算法使用了这三种方式中的两个甚至三个,以达到网络最佳工作性能。

d)节点/链路的同异构性。一般传感器网络问题中,都是认为网络中所有的节点具有相同的处理、通信能力以及相同的能量,但是当网络中的节点间不是完全相同时,这时就需要重新考虑路由算法。

e)一定的容错能力。无线通信本身易受环境的影响,加上传感器节点常工作在较恶劣的环境中,节点失效问题也较常见,所以要想布设的传感器网络可靠地运作,就必须要求网络具有一定的自动应对突发情况的能力。

f)扩展性。传感器网络的节点一般较多,节点失效、失效节点恢复正常工作的现象基本是难以避免的,这样就要求路由算法具有一定的可扩展性。另外,当需要在原有部署网络的基础上扩大或减小网络规模时,也要求网络能在较小改造代价下完成整个网络的升级工作。

g)传输媒质。无线传输一般具有信道衰落严重、误码率高等特性,传输速率最多几百 kbps。传输媒质是与 MAC 层的设计相关的,一般而言基于时分多址接入(TDMA)的方法比较节省能耗,如 CSMA。

h)连通性。网络连通性定义为网络中各个节点可以连接的邻节点数。传感器网络中,节点路由选择常常依赖于其邻节点信息,一个节点的邻节点数直接影响路由的选择。一般而言,网络连通度越大,路由算法的选择空间会变大,网络的健壮性也越好。

i)覆盖率。一般定义为网络可以正常监测的面积与整个目标区域面积的百分比。对于不同的路由算法,可能网络布设的初期覆盖率还是基本相同的,但随着各种路由在能耗、机制的不尽相同,网络的覆盖率将会发生变化,所以在选择路由算法时要考虑到这点。

j)数据融合。传感器网络主要有三种存储监测数据的方式,分别是本地存储(local storage)、外部存储(external storage)和数据中心存储(data-centric storage)^[89]。

k)安全性。传感器网络本身是无线通信方式,这种开放性的网络传输环境给网络带来了安全上的隐患。非法用户的接入不仅会影响网络的正常工作,也可能会导致系统数据的丢失与篡改,特别是现在基于无线传感器网络已经开始向无线抄电能表、水表以及煤气等民用领域推广,网络安全就会显得尤为重要,而安全的路由协议是其关键要解决的问题。

l)服务质量,即 QoS (quality of service)。QoS 的路由协议

是指在路由建立时,考虑时延、丢包率等 QoS 参数,即包含监测数据的准确度、实时性等。传感器网络是偏应用的网络,对于最终用户而言,并不关心整个网络的路由、数据融合等方面的具体过程,他们更关注数据的准确性与实时性,所以 QoS 越来越被研究人员所重视。

无线传感器网络多 sink 路由协议分析

目前,单 sink 传感器网络路由研究已经取得了很多喜人的成果,但它们也难免存在一些弊端,主要有以下几方面:

a)单 sink 节点传感器网络无法处理 sink 节点的失效问题, sink 节点的失效会带来整个网络的瘫痪,即整个网络的可靠性较差。

b)所有数据都必须沿着惟一 sink 节点方向的路径进行单跳或多跳传送,这样势必会造成 sink 节点附近的节点能量消耗过快,严重影响到传感器网络的使用寿命,即网络能耗严重失衡^[10-11]。

c)文献[11]还认为单 sink 节点网络一般只考虑了到达 sink 节点的跳数或者该路径上进行数据传送时的总体能量消耗,其选择结果一般是最短路径,而对于路径上节点的通信能力(能量剩余情况)考虑不够。

d)文献[12]考虑到 sink 节点移动将导致网络能耗过大与通信冲突问题。

e)单 sink 网络中,当网络拓扑结构较复杂时数据融合变得过于复杂^[13],合理地增加网络中的 sink 节点数将大大简化数据融合的复杂度。

f)不同的用户(sink)可能需要不同的环境变量(温度、湿度、光强等)或者不同格式(图像、声音、视频等)的数据信息,如何有效地控制网络中的数据流,这些问题都可以考虑在网络中布设多 sink 节点的方法来解决。

另外,LEACH^[14]协议、PEGASIS^[15]协议分簇后,簇头节点跟 sink 节点是一跳直接通信的,单 sink 节点必将要求距其较远的簇头节点大功率通信,这样不仅需要消耗过多的节点能源,且长距离传输所带来的干扰问题也是不能忽视的。这时可以利用多 sink 的分散性,网络中的簇头节点只须将数据传送给较近的 sink 节点便可较好地解决这个问题。在一些基于地理位置的路由协议(GPSR、TPGF)中,普遍存在的路由 hole 问题,有望在多 sink 节点网络结构下得到有效解决。

由此可见,多 sink 架构具有稳定性、有效性、健壮性、便于管理、能耗更均衡等优点,多 sink 节点传感器网络路由极具研究价值。

多 sink 路由协议的分类

目前,多 sink 路由协议的研究工作还处于起步阶段,更没有统一的分类标准,除了一般传感器网络路由协议分类方法外,可以考虑以下一些分类方法:

a)根据 sink 节点固定地点布设或者随机布设,可将多 sink 路由协议分为固定位置布设多 sink 路由协议与随机布设多 sink 路由协议^[16]。由于 sink 节点数目有限,为了便于维护,也可以考虑采用人工固定放置的方式来布设 sink 节点。图 1 即为 sink 节点由人工指定位置布设。

b)传感器网络中, sink 节点可以运动也可以静止,可以根据 sink 运动与否将多 sink 路由协议分为动态多 sink 路由协议与静

止多 sink路由协议。图 2即为动态多 sink传感器网络结构。

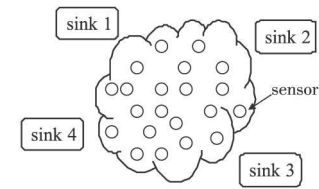


图1 固定位置布置多sink节点的传感器网络结构

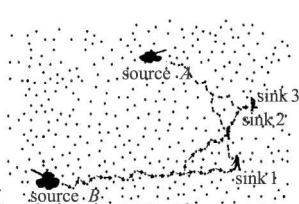


图2 动态多sink传感器网络结构

c)根据源节点是否跟固定 sink进行相互间数据通信,可以分为固定对象多 sink路由协议与动态对象多 sink路由协议。文献[17]中就是动态对象多 sink路由协议,该种路由协议与固定对象多 sink路由协议相比具有更好的组网灵活性,网络健壮性也较好,但组网操作过程较复杂。而对于基于地理位置的多 sink路由策略而言^[12],则基本是固定对象多 sink路由协议。

d)依据传感器节点是否异构或同构,将其分为节点同构多 sink路由协议与节点异构多 sink路由协议。同构即所有感知节点具有相同的初始能量、通信射程以及环境变量(温度、湿度、声波等)感知能力,即感知能力相同。在异构多 sink网络中,各个 sink节点可以只负责接收处理自己感兴趣的感知数据,使网络的管理得以简化,但是组网过程相对会变得复杂。

e) Sink节点间的通信方式可以有无线方式,也可以是无线方式。有线方式将简化 sink节点间的通信过程的复杂度,提高通信的可靠性,但无线方式将使 sink节点的布设更具灵活性。

f)数据融合方式,也可分为三种基本数据融合方式,即本地存储、外部存储和数据中心存储,如图3所示。但这里要注意的是传送到多个 sink节点的数据,如何适时、适地(节点)进行数据融合操作。

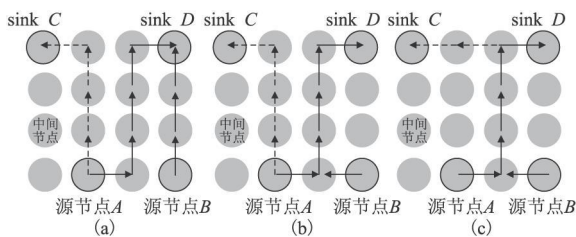


图3 多sink传感器网络数据融合方式

另外在多 sink节点传感器网络中,路由考虑的重点还是各个 sink间的协作,所以在路由分类时考虑最多的还是这种协作之间的差别。

多节点网络设计问题

文献[18]认为网络拓扑设计问题包括数据源终端与目的终端的布设位置、最大通信量要求、时延要求、可靠性要求、网络设备的成本等,并讨论了集中器布设问题(concentrator location problem)、终端配置问题(terminal assignment problem)、枢纽布置图问题(terminal layout problem,即强迫最小生成树问题)、分布式网络拓扑布置图问题(distributed network topological layout problem),还有骨干节点布设问题(backbone node location problem)。

文献[19]指出 PLP(Plant location problem)^[20]、CIP(concentrator location problem)^[18-21]等所针对问题与含有多 sink传感器网络节点布设的问题存在一些差异。例如, sink节点布设

的变化性, sink节点与感知节点之间是通过多跳的方式进行通信的以及 sink节点的能力是指其数据处理能力而不是其作为集中器时可用的端口数。文中还将大规模传感器网络中分簇问题以及 sink节点的布设问题统称为多 sink传感器网络设计问题。 sink节点的布设数目、布设位置都将直接关系着网络的生存周期,每个 sink节点周围的节点由于要作为中间路由节点,一般能耗较大,它们能正常工作时间的长短直接关系着整个网络的生命周期。但是网络布设前,网络设计者一般会先根据成本、覆盖度等因素确定所要布设的 sink节点数。文献[19]将在知道 sink节点数之后,如何部署 sink节点位置的问题称为 CIB问题(best sink location),描述了传感器网络所需最小操作时间,最后用时间约束来考虑多 sink节点布设问题。文献[22]则将网络分为树结构,考虑各个节点在树结构中的级别以及每个节点的子节点数来构建多 sink节点的网络拓扑。总之如何实现各个 sink节点间的互相协调是关键。

实际应用中,要根据具体应用环境来设计合适的传感器网络,比如军事应用中,就比较适合随机布撒 sink节点的网络布设方式;而像森林环境监测等网络布设面积较大的应用中,各个 sink节点固定布设于整个布设网络的边缘地带则比较适合。总而言之,与单 sink节点网络初始化组网是由单个 sink来控制的且路由整体方向固定不同的是,多 sink路由一般需要整个网络中的多个 sink节点互相协调,以完成单 sink无法有效实现的网络应用场合。

典型多路由协议分析

1) MRMS协议^[16]

Chen Yuequan等人提出 MRMS(multipath routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes)多 sink节点路由协议。针对传输路径选择、高能效的动态分簇维持以及路径切换问题,提出了一种新的基于邻节点间距离到相应 sink的跳数以及节点剩余能量信息的路径开销度量算法。该协议主要分为三个部分:

a)拓扑发现。拓扑构建算法是参考 ToD is^[23] 拓扑发现算法,再综合考虑邻节点的距离到相应 sink的跳数以及节点剩余能量信息,所提出的高能效的拓扑构建算法。ToD is算法首先找到一批级别较高的节点(distinguished nodes),再利用所有邻节点信息大致构建网络的拓扑。只有这些级别较高的节点才回应拓扑发现探测信息,这样就有效减少了网络中的信息重叠现象。最后将形成以监视节点为根的树状网络结构。

b)分簇维持。此阶段簇内节点轮流作为簇头。在此过程中,每个簇内只须维护当前跳数以及相应 sink节点,这就意味着簇头节点无须维护簇内子节点信息,大大简化了分簇维护负担。

c)路径重新选择。当原先的数据传输路径能耗过多(超过门限值)以后,就重新选择传输路径甚至接收数据的 sink节点。

通过实验,该协议相较于直接洪泛、Voronoi算法以及 ToD is算法,分别延长网络生存时间约 3.2 以及 0.3 倍。MRMS 协议针对大规模布设传感器网络,而分层的网络架构也更适合于此类网络。可以预见,多 sink层次性网络架构是未来大规模传感器网络的发展方向。

2) TIDD-MS协议^[12]

Ye Far等人考虑到 sink节点移动将导致网络能耗过大与通信冲突问题,提出双重数据分发(two-tier data dissemination

TIDD)方法来解决高效的多个移动 sink节点数据传输的问题,且此方法具有较好的可升级性。在 TIDD中,每个可能的数据资源节点事先建立一个格栅,这种格栅结构保证了移动的 sink节点能通过不断地发出洪泛询问,持续地接收到其所在格栅的数据信息。当传感器节点静止且位置已知的情况下,采用格栅的方法将会使整个网络维持低的数据交叠(overhead)即节点先后收到监控同一区域的多个节点发送的几乎相同的数据。

TIDD基本思路为:在宽阔的目标区域布设密集度较高的传感器节点,这些无线射程有限的节点以多跳方式进行组网;每个节点通过 GPS或节点定位技术^[24-25]获知其自身位置。此时,移动的 sink节点一般不知道其自身位置;当有一个行为触发(时间、事件或查询)时,在其周围的节点协同处理该信号,最后选择其中一个节点作为资源节点发送数据报告; sink节点通过发送询问信息去收集感知数据。此时,在目标区域周围的 sink节点可能不止一个,数目还可能不断变化。

TIDD基本步骤如下:

a)格栅构建。一个资源节点首先将目标平面区域划分为一个写单元格栅,每个格栅都是长和宽为 a 的正方形,其自身位于格栅的交叉点。源节点将要传送的数据信息告知其他所有可以延伸到的格栅交叉点,这时这些交叉点又可称为格栅中的资源分发点。此时,对于一个位置为 $L_s = (x_s, y_s)$ 源节点而言,资源分发点的坐标则为 $L_p = (x_i, y_i)$ 。其中:

$$\{x_i = x_s + i \cdot a, y_i = y_s + j \cdot a, i, j = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\} \quad (1)$$

接着,每个源节点不断将自身的位置信息 L_s 与单元格的边长 a 告知其相邻的四个格栅交叉点。数据传输的方式是采用基于地理位置的贪婪前向算法。最后数据被输出给距离 L_p 最近的邻节点。

b)双重数据询问与分发。TIDD基于虚拟格栅结构,当 sink节点需要数据时,向本地区域广播询问信息,最终 sink节点获知邻近数据分发点。为了控制 sink节点质询信息的盲目传播,还规定了最大传播半径。最终该邻近数据分发节点,通过中间数据分发点建立 sink节点与资源节点间的连接。一旦资源节点收到邻近数据分发点传输的 sink节点的质询信息,便将要传输的数据发送给该数据分发点。

TIDD的网络数据重叠量与网络规模、sink节点数目以及传感器节点的移动速率成反比,且与面向 sink数据传输方式(SODD)^[26-27]相比,格栅结构大大简化了数据传输的处理过程。但是格栅的维持过程复杂,能耗问题也是不容忽视的问题。

3) Voronoi scoping协议^[28]

Henri Dubois-Ferrière等人认为多 sink传感器网络中如何限制每个 sink所发出的询问信息是个关键问题,于是用一个简单实用的 Voronoi scoping算法来限制每个 sink节点的消息的传播。每个 sink节点的询问信息只发送给该 sink节点的 Voronoi分簇中的子节点,这样就达到了每个查询信息将被传送给尽量少的数据采集节点的目的。另外,该算法无须额外的通信过程去完成 Voronoi分簇过程,网络数据重叠程度也将不会因为网络规模以及 sink节点数目的增长而发生变化。

Voronoi scoping算法的几个关键点包括:

a)距离度量与 sink节点数据的聚集。为了让中间节点将数据传送给距其最近的 sink节点,此处用节点间跳数来表示距离。

b)符号表示。将整个网络按图论理论表示成 $G = (N, E)$ 。其中: N 表示所有源节点数目 m 与目的节点的数目 s 之和, E 表示一条链路的权重系数。用 d_{ij} 表示节点 i 与 j 间的最短路径距离,则 sink节点 k 所对应的 Voronoi分簇可以表示成

$$V_k = \{i | m \cdot d_{ik} \leq d_{ij} \cdot d_{jk}\} \quad (2)$$

c)树生成。从 sink节点发出的路由广播包含有跳数域。广播过程结束后,所有节点获得其父节点以及到相应 sink节点的跳数信息,再根据这些信息反向生成数据聚合树。与 AODV相似,在数据传输过程中利用数据的序列号信息剔除重复数据,有效减少了数据重叠现象。

d)路由接入与查询分发。查询分发与树结构是截然不同的,查询是单向的传输,但是一般情况下,查询与路由广播包是作为一个整体被发送的, Voronoi scoping算法即是采用这种方式。

该协议具有简单的数据传播执行过程,且每个节点只需少量字节操作,但 Voronoi分簇是其要解决的关键问题。

4) PAMR协议^[29]

Piero Cicirelli等人针对多 sink传感器网络中,数据传输不同于一般传统单 sink网中数据是以多点到单点(many-to-one)方式进行传输,而是多点到多点(many-to-many)方式的问题,提出周期性的消息适应路由 PAMR(periodic adaptation of the message routes),主要目的是尽量减少网络连接的操作。该协议设想每个数据源节点(可能不止一个)到相应 sink节点具有相互独立的树状结构,此时,一条连接已知源节点与相应 sink的路径将被建立。

PAMR借鉴多商品流网络设计问题来解决传感器网络设计高效性、分散性问题,并提出根 sink节点周期适应路由,解决了分散性问题。适应算法包括选择不同邻节点作为建立与给定 sink节点连接的父节点。适应算法的执行由本地一个节点通过对由其邻节点发布的信息构成的特征矩阵 $Q(n, s)$ 的估值来决定。其中 n 是该节点的邻节点, s 是相应 sink节点,即当 sink节点的邻节点中 Q 值变得最大时,节点改变其父节点。这样,该节点便可便捷地将数据传送给新的邻父节点。

该协议非常适合数据量较少的传感器网络应用场合。实验表明,该路由协议相比于没有适应机制的路由可以减少 50% 的数据交叠,即有效减少了节点先后收到监控同一区域的多个节点发送的几乎相同的数据。

5) SDMR-MS协议^[30]

Winston K. G. Seah等人提出一种虚拟(virtual) sink节点架构的传感器网络模型(图 4),目的是通过定义一组空间上变化的物理节点来减轻选择邻近 sink节点时所造成的竞争,在此基础上提出了适用于多 sink的空分多路径路由 SDMR-MS(spatially diverse multi-path routing for multi sink)。

a)虚拟 sink节点架构。为减少多径效应以及信道间的冲突,数据以星放射状(starburst)方式传送给布设于网络边缘的 sink节点,这些 sink节点组成虚拟 sink节点组。感知节点与 sink构成的多层次网络拓扑以及局部数据融合节点选择,保证了网络中传输的数据至少能传送给一个 sink节点。这些数据融合节点将组成一个 mesh网络负责将数据传输给相应的 sink节点。

b)多路径数据传输。当网络是两个层次时,在低层次网络内部通过健壮性较好的多路径数据传输算法实现感知节点与本地数据融合节点间的 n 个路径的连接, n 可以随着待

传数据的重要性而相应调整。同样，局部数据融合节点也会在由自身所组成的 mesh 网络中建立到相应 sink 节点的多条多跳路径。

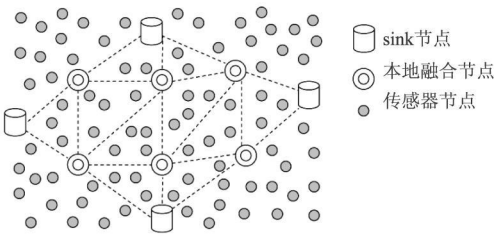


图4 多虚拟sink节点结构

9) 路径重定义与重传。多径路由协议一般都会在源节点与 sink 节点间建立多条路由，所以路由选择时会存在竞争问题；当互相竞争路由的目的 sink 节点相同时，竞争现象将会更加严重。此时，用冗余路径的方法是基本没有效果的，重传的方法甚至会加重竞争。于是，文中给出一种解决方案：感知节点通过空间上不同的路由同时向多个 sink 节点发送一个数据包，只要这个包发送到任何一个 sink 则说明传输是成功的，如图 5 所示。这相当于 ARQ (automatic repeat request)，这样比直接用 ARQ 大大减小了反应时间并减少了数据包的传输量，节省了能耗。

该方案主要针对干扰严重的无线工作环境，特别适用于多径效应严重的室内、水下传感器网络等无线传输环境。

6) PBR 协议^[31]

Meng Min 等人提出 PBR (Priority based routing) 多 sink 路由协议，该协议是基于能量级别的多 sink 路由协议。PBR 多 sink 传感器网络结构如图 6 所示。能量级别定义为节点在当前所剩电能，能够向邻节点传输数据的次数；路径能量级别定义为一个节点到目标 sink 节点整个路径的最小能耗。该协议综合考虑了节点能量级别与路径能量级别，所以该协议能耗较均衡，大大延长了整个网络的生存周期。

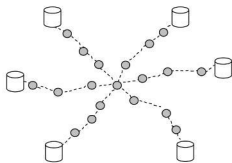


图5 空间分离路由

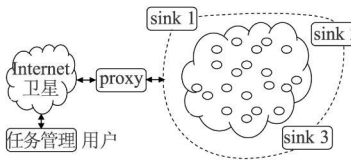


图6 PBR多sink传感器网络结构

当网络中有资源节点 i ，sink 节点的数目为 k 个，则从节点 i 到 sink 节点 j 的能耗可表示为 $\text{cost}(v_i, v_j)$ ，用 S_i 表示 i 到 j 的路径能量级别，此时，节点 i 到所有 sink 节点 k 的最大数据传输能耗为

$$\max_n \text{cost}(v_i, v_k) \tag{3}$$

归一化，有 $\text{cost}(v_i, v_j) / \max_n \text{cost}(v_i, v_k)$ ，则 PBR 可以表示为

$$\max_n (\max_n \text{cost}(v_i, v_k) / \text{cost}(v_i, v_j))^\alpha \times (S_j)^\beta \tag{4}$$

其中：α、β 是影响因子。

PBR 中，sink 固定布设于网络的边界处，考虑了能耗与通信量，所以有效均衡了网络中节点的能耗，从而最终延长了网络的生命周期。本文并没有考虑如何合理地固定布设 sink 节点。

7) MMHR 协议^[32]

Ryouhei Kawano 等人提出 MMHR (minimize multi-hop routing) 多 sink 路由算法，主旨是最小化每个传感器节点到 sink

节点间的通信跳数。针对数据包传输过程中的包冲突问题，引入分色算法解决基于 TDMA 通信的通信冲突问题，该算法主要包括拓扑树构建、时间槽分配、跳数计算三部分。此时，每个节点需要完成维持和更新邻节点列表、为构建到多 sink 的最短路径确定自身等级和父节点、将感知数据传输给父节点以及为避免包传输冲突利用分色算法完成时间槽分配。网络中的数据包帧格式如图 7 所示。

D	color	level	neighbor IDs	BS ID	BS hop	packet receiving
---	-------	-------	--------------	-------	--------	------------------

图 7 PBR 协议中数据包帧结构

其中：D 表示节点标志符；color 表示节点分配颜色；level 表示节点的等级；neighbor IDs 表示邻居节点标志符；BS ID 表示 sink 节点标志符；BS hop 表示节点与 sink 节点间跳数；packet receiving 表示接收到的数据包。

时间槽分配中所使用的分色算法引入了图论中的色数概念，即为所有区域内节点分配最少的不同颜色，如节点颜色区别于其邻节点颜色。时间槽分配与颜色分配有相似之处，于是，网络中的时间槽分配的问题就变成了组合优化问题。MMHR 中分配给每个节点的时间槽必须不同于其两跳内邻节点所获得的时间槽。首先，每个节点生成其一跳与两跳内的且级别等于或高于其自身的邻节点列表；接着，每个节点探测包冲突，发现冲突就不发送数据包。包冲突的检测是通过监测压值来实现的，压值表明了时间段内发生包冲突的次数。需要注意的是，为了有效避免 sink 节点间的包冲突，每个 sink 节点分发惟一的时间槽。

该算法具有较高的 sink 连通度，自组织的时间槽分配成功率高于 90%，算法有效性较好，比较适合于 sink 节点固定布设于网络边缘的多 sink 网络应用场合，如 PBR 协议。

8) OMPER 协议^[33]

Haeyong Kim 等人将多 sink 节点布设以及多 sink 情况下如何选择路由问题归结为线性规划模型 (linear programming model)，以此寻求多 sink 节点的最佳部署以及优化整个网络流量。

两种线性规划：a) 假定 sink 节点静止且节点数量固定，用于对网络通信量进行优化；b) 限定了 sink 节点数目的极大值，对于 sink 节点的动静于具体个数问题没有作出具体要求，它可同时用于多 sink 节点布设以及多 sink 情况下如何选择路由问题。

文中将所有节点分为：a) 应用传感器节点 ASN (application sensor node)，它们作为簇内子节点工作在低功耗状态下，负责将感知信息传送给相应的 AFN 或直接传输给基站 (sink 节点)；b) 聚合节点 AFN (aggregation and forwarding node)，负责聚合从 ASN 节点接收到的数据，并将处理后的结果传送给相应的基站 (sink 节点)。如图 8 所示，整个网络是分层结构。

该方案比那些已知最小深度树多 sink 方法 (aware minimum depth tree scheme) 具有更好的网络生存周期及公平性。

9) FWave 协议^[17]

Liu Haiyang 等人提出 FWave 多 sink 路由协议，该协议包括一种分布式、可扩展的势场估计算法以及似然概率前传策略，以确保在动态网络中仍能保持较低的数据重叠，并具有较强的网络自修复能力。

设 $S \subseteq N$ 且 $D \subseteq N$ ，N 是网络中布设的所有传感器节点，S

是网络中布设的资源节点, D 为所有作为目的节点的 sink 节点。对于每个源节点 $x \in S$ 用 I_x 表示通过 x 节点或者其自身生成数据的速率。考虑网内中间节点处理的势位 (potential) 可能会改变通过它们的数据流量, 对于每一个可能的中间节点 $y \in (N-D)$ 当 $I_y > 0$ 表示该数据流是由节点 x 自身生成的, 而 $I_y < 0$ 则表示数据流将由 x 节点转发。当 $x \in N$ 时, 用 $Z(x)$ 表示其邻节点。根据流量守恒定律, 对每个非 sink 节点而言, 流入一个节点的数据流的速率与从该节点输出的数据流相等, 可表示为

$$\sum_{y \in Z(x)} I_{xy} = I_x \quad x \in (N-D)$$

(5)

每个非 sink 节点数据流分配可表示为

$$I_{xy} = (V_x - V_y) / R_{xy}$$

(6)

由式 (6) 可见, 任一个节点 x 只会将它的数据发送给了一个更低势位 ($V_x > V_y$) 的邻节点。其中: V_x, V_y 表示节点 x 与 y 的势位强度; R_{xy} 表示节点 x 与 y 间连接的权重系数, 这个权重的定义有助于测量节点间传输 1 bit 数据的单位成本。

实验结果显示, 该路由算法与 Directed Diffusion 协议^[34]相比, 可使网络生存周期增长 2.7~8 倍。

10) PDE 协议^[35]

Mehdi Kalkanlar 等人将类似于静电理论中的麦克斯韦 (Maxwell) 公式的偏微分方程 (PDE) 用于解决网络中多个接收端 (sink) 的网络优化问题。首先将整个网络划分为多个小的区域, 每个区域对应一个 sink 如图 9 所示; 定义一个封闭的矢量场, 进而可以推导出一个纯量函数的梯度的形式 (即势函数)。介绍了如何优化分配到各个 sink 节点的通信负载, 此时对于位于任何位置的 sink 节点而言势函数的值是相等的。

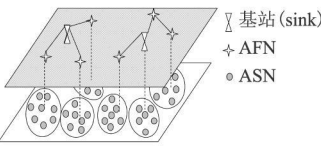


图8 OMPER多sink传感器网络结构

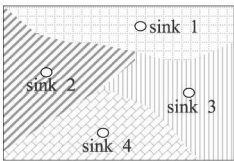


图9 各个sink节点负责区域分布

当网络中有多个 sink 节点时, 整个网络通信负载可以用以下等式表示, 所以可将网络优化问题转换为求下式的最小值。

$$J(D) = \int_A K(x, y) |D(x, y)|^2 dx dy$$

(7)

其中: $\nabla \cdot D(x, y) = \rho(x, y), D_n(x, y) = 0 \quad \forall (x, y) \in B$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j, \rho(x, y) = r(x, y) - \sum_{i=1}^M \omega_i (x - x_i)(y - y_i)$$

其中: A 是节点布设的平面区域; 定义 D 为 A 中的矢量场以表示网络中的负载强度矢量; B 为 A 的边界点集合; $\rho(x, y)$ 表示网络中消息产生的空间速率密度; M 表示目的节点 (sink) 的数目; (x_i, y_i) 表示第 i 个目的节点的位置; $r(x, y)$ 表示了单位区域单位时间内产生的消息量; ω_i 是权重系数。可见, 在多 sink 节点网络中问题的复杂度在于优化问题不仅要考虑 D 还要兼顾权重值 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ 。

11) ORMMA-WSN 协议^[36]

Arturas Lukošius 提出一种机会路由算法 ORMMA-WSN (opportunistic routing in multi-sink mobile Ad hoc wireless sensor networks), 该路由协议是单播的多跳路由协议。单址广播 (unicast) 是指向单一网络地址的传送, 这是与广播 (传送到全部网络地址) 和多址广播 (传送到选定的网络地址) 相比较而

言的。该协议是属于机会路由 (opportunistic routing) 的方法, 即在缺少端到端直接数据传输链路的情况下, 数据发送端等待一个较好的时机将待传送数据发送出去。该算法中每个节点周期性地判断自身是否该将数据传送给其他节点, 此时影响判定标准的因素包括节点当前位置、与邻近节点的拓扑关系以及自身相对于其所对应 sink 节点的运动方向。具体而言, 这些参数通过测量来自 sink 节点的接收信号强度指示值 (received signal strength indicator RSSI) 和移动梯度值 (mobility gradient MG) 来获得的。其中 RSSI 值的大小表示了节点与 sink 节点的距离远近, 在周期性获得一些 RSSI 值之后, 节点就可以计算出一个 MG

ORMMA-WSN 是基于地理位置路由协议的, 节点首先要知道其邻近节点及其自身的位置信息, 还要知道各个链路的质量信息。不止一个邻节点时, 根据节点的可用性选择下一跳节点, 网络层负责选择距离目的节点最近的中间节点。

因为要用间歇的连接并获知各个节点的当前状况, 以此作为完成高效/可靠的路由的依据, 所以每个节点需周期性地获知自身的移动信息, 包括从 sink 节点收到的 beacon 消息携带的 RSSI 计算出 MG 以及最佳邻节点 BNN (best neighbor node) 与最佳 sink 节点 BS (best sink) 的信息。

具体而言, RSSI 的值取的是所有接收到的数据包 RSSI 值的均值。MG 是关于移动节点相对于 sink 节点的移动方向性, 即 $MG = \text{sign}(RSSI_j - RSSI_i)$ 。当 $MG = -1$ 表示移动方向是背离相应 sink 节点的方向; 当 $MG = 0$ 表示节点静止; 当 $MG = 1$ 表示移动方向是靠近 sink 节点的方向。

图 10 是 ORMMA-WSN 路由算法路径选择的过程。

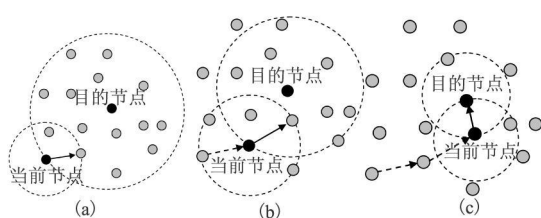


图10 传输路径建立过程

该协议适用于网络连接时断时续的应用场合, 数据传输可靠性较好。OPNET 仿真结果表明, 相比于典型的单 sink 的 AODV 路由算法, 能有效减少通信冲突概率, 明显减小了网络的负载, 网络延时也比较小。

多 路由协议比较

多 sink 路由协议比较结果如表 1 所示。

表 1 多 sink 路由协议特点比较

多 sink 路由算法	固定布设	随机布设	静止	动态	固定对象	动态对象	平面型	层次型
MRMS		✓	✓			✓		✓
TIDD-MS		✓		✓		✓		✓
Voronoi scoping			✓		✓			✓
PAMR	✓		✓					✓
SDMRMS			✓		✓		✓	
PBR	✓		✓		✓			✓
MMHR					✓		✓	
OMPER	✓		✓		✓			✓
PW ave		✓	✓			✓	✓	
PDE		✓	✓		✓		✓	
ORMMA-WSN		✓	✓					✓

由表 1 可见, 目前大部分多 sink 路由协议中, sink 节点是固定布设的。此时, 如何有效合理地布设 sink 节点是亟待解决的问题, 文献 [37-38] 对 sink 布设进行了讨论。此外, 绝大多数传感器网络多 sink 路由协议在路由建立过程中固定 sink 对象, 如源节点将固定 sink 节点作为自己的目的节点, 此种策略没有充分利用多 sink 节点的分散性、多选择性, 影响了网络组网的灵活性。由于多 sink 节点大多是针对大规模传感器网络环境, 而基于网络分簇的层次型路由协议比较适合于大规模传感器网络, 所以目前多 sink 路由协议大部分是基于网络分层思想的。

结束语

目前, 多 sink 路由协议还比较少, 但随着人们对大型传感器网络的应用需求越加迫切, 以及研究人员对于传感器网络研究的不断深入, 多 sink 节点的传感器网络必将迎来新的发展。

网络连接的断续性、移动性以及功率控制是一般传感器网络路由最大的挑战, 除此以外, 多 sink 网络中比较受关注的是网络规模与 sink 节点数目之间的最优化。多 sink 节点路由的发展趋势主要包括:

a) 尽量减少网络通信量。由于 WSN 中节点间的通信能耗较大, 在路由协议中应尽量减少数据通信过程。特别是对于多 sink 情况下, 不仅感知节点间需要通信, 一般 sink 节点间也需通过通信协调之间的路由建立过程, 如何有效减少网络通信量至关重要。文献 [32] 研究了针对多 sink 网络数据融合技术。

b) 确保通信量负载均衡。平衡节点能耗, 延长网络生存期是多 sink 节点网络设想需要解决的关键问题, 通过节点到多个 sink 的多路径路由策略使各个节点分担数据传输任务。相对于单 sink 节点的多路径路由方法, 多 sink 的架构有效解决了单 sink 节点邻近节点高负载、易失效的问题, 更具多路径组网的灵活性。多 sink 节点功率控制问题^[39]往往是多 sink 路由需要解决的关键问题。

c) 路由协议应具有容错性。由于 WSN 节点容易发生故障, 如何确保及时地在路由出现故障时能够尽快发现甚至恢复路由是必须要考虑的问题。多个 sink 本身就加大了网络对于 sink 节点失效的健壮性, 并为普通节点提供了更多的数据传输目的 sink 节点数, 一条传输路径失效, 一般可以很快建立新的传输路径。

d) 路由协议应具有一定的安全机制。由于 WSN 固有的开放性应用环境, 其路由协议极易受到安全威胁。目前的路由协议很少考虑安全问题, 但一些应用中必须考虑安全机制, 如 ZigBee 抄表系统等。由于传感器节点本身数据处理能力有限, 不可能每个节点都去完成较复杂的数据加解密运算, 此时, 可以考虑多 sink 节点协调处理的网络安全机制。

文献 [40] 指出还要考虑通过节点的流量大小、数据通道选择与竞争、数据速率限制等因素, 这些都为多 sink 路由算法的实现带来了很大的难度。但多 sink 网络结构中, 多 sink 相互协作, 更具健壮性、能耗更均衡, 且多 sink 路由协议一般容易与单 sink 路由算法相兼容, 多 sink 架构为传感器网络大规模应用提供了可能, 必将受到研究人员的更多关注。

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 38(4): 393-422.

- [2] KAHN J, KATZ R, PISIER K. Next century challenges: mobile networking for smart dust[C] // Proc of Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999: 271-278.
- [3] 马黄东, 陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 2013-2028.
- [4] CUI Jun-hong. Building autonomous underwater sensor networks: overview, achievements, plans[EB/OL]. http://uwsn.engr.ucsd.edu/annual07/UMSN_annual07_overview_CUI.pdf
- [5] 唐勇, 周明天, 张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 410-421.
- [6] AL-KARAKI J N, KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey[J]. Wireless Communications, 2004, 11(6): 6-28.
- [7] CHANG J H, TASSULAS L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4): 609-619.
- [8] GOVINDAN R, HELLERSTEN J, HONG W, et al. The sensor network as a database TR02-77[R]. California University of Southern California, 2002.
- [9] KARP B, KUNG H. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C] // Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston: ACM Press, 2000: 243-254.
- [10] 韩鹏, 吴华锋, 任久春, 等. 多 sink 动态传感器网络主动式分层定位方法[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 44-50.
- [11] 吴中博, 樊小泊, 陈红. 基于能量水平的多 Sink 节点传感器网络路由算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 41-46.
- [12] YE Fan, LUO Hai-yun, CHENG J, et al. A two-tier data dissemination model for large scale wireless sensor networks[C] // Proc of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2002: 148-159.
- [13] ROMER K. Distributed mining of spatio-temporal event patterns in sensor networks[C] // Proc of Workshop on Middleware for Sensor Networks. San Francisco: IEEE Computer Society, 2006: 103-116.
- [14] HENZEIMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C] // Proc of Hawaii International Conference on System Sciences. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [15] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S, PEGASIS. Power efficient gathering in sensor information systems[C] // Proc of IEEE Aerospace Conference. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002: 1-6.
- [16] CHEN Yue-quan, CHAN E, HAN Song. Energy efficient multipath routing in large scale sensor networks with multiple sink nodes[C] // Proc of the 6th International Workshop on Advanced Parallel Processing Techniques. Berlin: Springer, 2005: 390-399.
- [17] LIU Hai-yang, ZHANG Zhi-li, SRIVASTAVA J, et al. PWave: a multi-source multi-sink anycast routing framework for wireless sensor networks[C] // Proc of the 6th Networking Conference. Berlin: Springer, 2007: 179-190.
- [18] GAVISH B. Topological design of computer communication networks: the overall design problem[J]. European Journal of Operations Research, 1992, 58(2): 149-172.
- [19] IKER OYMAN E, ERSOY C. Multiple sink network design problem in large scale wireless sensor networks[C] // Proc of IEEE International Conference on Communications. San Francisco: IEEE Computer Society, 2004: 3663-3667.

- [20] ALCOUFFE A, MURATET G. Optimal location of plants [J]. *Management Science*, 1976, 23(3): 267-274.
- [21] BOORSTYN R R, FRANK H. Large scale network topological optimization [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1977, 25(1): 29-47.
- [22] BURATTI C, VERDONE R. Tree based topology design for multi-sink wireless sensor networks [C] // *Proc of the 18th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. San Francisco: IEEE Computer Society, 2007: 1-5.
- [23] DEB B, BHATNAGAR S, NATH B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management [R]. Pasadena, USA: Rutgers University, 2001.
- [24] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法 [J]. *软件学报*, 2005, 16(5): 857-868.
- [25] WANG S S, SHH K P, CHANG C Y. Distributed direction-based localization in wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(6): 1424-1439.
- [26] COFFIN D, HOOK D V, MCGARRY S et al. Declarative Ad hoc sensor networking [C] // *Proc of SPIE Integrated Command and Environment*. Beijing: International Society for Optical Engineering, 2000: 109-120.
- [27] INTANAGONWAT C, GOVINDAN R, ESIRIND. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C] // *Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Boston: ACM Press, 2000: 56-67.
- [28] DUBOIS-FERRIERE H, ESIRIND, SIATHOPOULOS T. Efficient and practical query scoping in sensor networks [C] // *Proc of IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems*, 2004: 564-566.
- [29] BOUKERCHE A, MARTIROSYAN A. Efficient routing from multiple sources to multiple sinks in wireless sensor networks [C] // *Proc of the 4th ACM Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad hoc Sensor and Ubiquitous Networks*. New York: ACM Press, 2007: 82-86.
- [30] SEAH W K G, TAN H P. Multipath virtual sink architecture for wireless sensor networks in harsh environments [C] // *Proc of the 1st International Conference on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks*. New York: ACM Press, 2006: 1-6.
- [31] MENG M, XU H, WU X, Jiao L, et al. PBR: priority based routing in multi-sink sensor networks [C] // *Proc of International Conference on Wireless Networks*. Las Vegas: CSREA Press, 2007: 25-28.
- [32] KAWANO R, MIYAZAKI T. Distributed data aggregation in multi-sink sensor networks using a graph coloring algorithm [C] // *Proc of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2008: 934-940.
- [33] KIM H, SEOK Y, CHOIN, et al. Optimal multi-sink positioning and energy efficient routing in wireless sensor networks [C] // *Proc of International Conference on Information Networking: Convergence in Broadband and Mobile Networking*. Berlin: Springer, 2005: 264-274.
- [34] INTANAGONWAT C, GOVINDAN R, ESIRIND. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C] // *Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Boston: ACM Press, 2000: 56-67.
- [35] KALANTARIM, SHAYMAN M. Design optimization of multi-sink sensor networks by analogy to electrostatic theory [C] // *Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. New Orleans: IEEE Communication Society, 2006: 431-438.
- [36] LUKOSIUS A. Opportunistic routing in multi-sink mobile Ad hoc wireless sensor networks [D]. Bremen: University of Bremen, 2007.
- [37] VINCZE Z, VIDA R, VDACS A. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks [C] // *Proc of IEEE International Conference on Pervasive Services*, 2007: 55-63.
- [38] VINCZE Z, VIDA R, VDACS A. On the efficiency of local information-based sink deployment in heterogeneous environments [C] // *Proc of the 2nd International Workshop on Wireless Sensor Networks*, 2007.
- [39] WENNING B L, LUKOSIUS A, TMM-GIEL A et al. Opportunistic distance aware routing in multi-sink mobile wireless sensor networks [C] // *Proc of ICT-Mobile Summit Conference*. Dublin: International Information Management Corporation, 2008.
- [40] YUEN K, LI Bao chun, LIANG Ben. Distributed data gathering in multi-sink sensor networks with correlated sources [C] // *Proc of the 5th FIP Networking Conference*. Berlin: Springer, 2006: 868-879.

(上接第 805 页)

- [45] EIOFSON G. Developing trust with intelligent agents: an exploratory study [C] // *Proc of the 1st International Workshop on Trust*, 1998: 125-139.
- [46] JONKER C M, TREUR J. Formal analysis of models for the dynamics of trust based on experiences [C] // *Proc of the 9th European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*. London: Springer-Verlag, 1999: 221-231.
- [47] DUMA C, SHAHMEHRIN, CARONNI G. Dynamic trust metric for peer-to-peer systems [C] // *Proc of the 2nd International Workshop on P2P Data Management: Security and Trust*, 2005: 776-781.
- [48] XIONG L, LIU Ling. Peer trust supporting reputation-based trust in peer-to-peer communities [J]. *IEEE Transactions on Data and Knowledge Engineering*, 2004, 16(7): 843-857.
- [49] CHANG Jun-sheng, WANG Hua-jin, YIN Gang. DyTrust: a time-frame based dynamic trust model for P2P systems [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(8): 1301-1306.
- [50] 方群, 吉逸, 吴国新, 等. 一种基于行程编码的 P2P 网络动态信任模型 [J]. *软件学报*, 2009, 20(6): 1602-1616.
- [51] 牛新征, 余莹, 路纲, 等. 基于 RBAC 技术的 P2P 安全机制的研究 [J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(3): 112-118.
- [52] 周世杰. 对等计算中的分布式路由算法及其安全性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [53] YANG M, YANG Yuan-yuan. Peer-to-peer file sharing based on network coding [C] // *Proc of the 28th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, 2008: 168-175.
- [54] ELSADD K A, RAHMAN A, ABDALA S et al. PECOLE: P2P multi-tiered collaborative environment [J]. *Springer Science Business Media Multimed Tools Appl*, 2008, 39(5): 353-377.
- [55] 刘亚杰, 窦文华. 一种 P2P 环境下的 VOD 流媒体服务体系 [J]. *软件学报*, 2006, 17(4): 876-884.
- [56] GU Xiao-hui, WEN Zhen, PHILIP S et al. PeerTalk: a peer-to-peer multiparty voice over IP system [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(4): 211-220.
- [57] SINGH A, HAAHR M. A peer-to-peer reference architecture [C] // *Proc of International Conference on Communication System Software and Middleware*, 2006: 1-10.
- [58] BLOOM B H. Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors [J]. *Communications of the ACM*, 1970, 13(7): 422-426.