

无线传感器网络移动性支持问题的研究

陈晨¹ 谢伟光¹ 裴庆祺¹ 曾兴雯¹ 范科峰²

(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)¹ (中国电子技术标准化研究所 北京 100007)²

摘要 在传统的无线传感器网络研究中,用户、汇聚节点及传感器节点都被认为是静态的,这与目前应用中节点需要较强的移动特性并不相符。分析了传感器网络中移动性应用的场景,从网络体系结构的观点出发,总结了当前在无线传感器网络移动性支持方面所取得的研究进展,并进一步分析了关键算法和策略。

关键词 无线传感器网络,移动性,研究进展

Research on Mobility Support in Wireless Sensor Networks

CHEN Chen¹ XIE Wei-guang¹ PEI Qing-qi¹ ZENG Xing-wen¹ FAN Ke-feng²

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China)²

Abstract In traditional wireless sensor networks, users, sinks and sensor nodes are assumed static. However, mobility in a wireless sensor networks presents interesting challenges and requires special attentions. We first analyzed the challenges posed by mobility in wireless sensor networks. Then, existing proposals that support mobility in wireless sensor networks were summarized. And we pointed out the advantages and shortcomings of the existing proposals. Finally we concluded this paper with brief comments on promising future of wireless sensor networks.

Keywords Wireless sensor networks, Mobility, Research progress

1 引言

无线传感器网络能够最直接地获取自然界的客观物理信息,使人类对自然界的认知能力极大地扩展并为人界之间的信息交互提供强有力的保障,目前其应用范围涉及环境监测、生物医疗、智能交通等诸多领域^[1,2]。

在传统的无线传感器网络体系结构中,如传统的用于环境监测的网络结构,用户、汇聚节点、传感节点都被假设是静态的,如图1所示。然而在一些应用场景下,用户、汇聚节点及传感器节点中的一个或多个需要移动作业,如在战场上的战士及火灾现场的消防员,他们在现场通过无线传感器网络来收集有价值的各种信息。

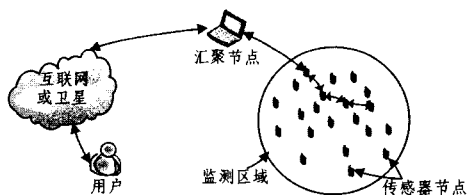


图1 传统无线传感器网络模型

另一个典型的应用场景是用于交通监测的无线传感器网络。由于环境状态信息的高度相关性,其中的节点不需要大

量冗余部署,但这使网络的连通性无法保证。对于这种情况可以利用移动的汇聚节点主动收集传感器节点采集的信息来保证网络的连通性。再有就是随着电子技术的飞速发展,传感器节点的体积越来越小,这使得传感器节点被广泛地嵌入到各种设备,如智能家居中的吸尘器^[3]、电冰箱、手机等。因此,考虑到用户与节点的移动,传统的网络模型已经不再适用。研究支持较强移动性的MAC层、网络层协议和技术将是无线传感器网络大规模应用的必要条件。

本文第2节介绍了传感器网络中用户移动性的支持策略,并对主要的策略进行了分析;第3节介绍了支持汇聚节点移动的主要模型,给出了模型的优缺点;第4节给出了支持普通传感器网络节点移动的算法,并比较了几种主流算法的性能;最后总结全文。

2 用户移动性的支持

在无线传感器网络中,用户通过向汇聚节点(sinks)发送查询消息来收集所需要的信息。当用户移动到传感器节点覆盖的范围中,并且汇聚节点与用户之间不存网络基础设施(互联网及卫星)时,汇聚节点可以利用已布置的节点协同合作,把数据以多跳的方式发送给用户。该场景适用于基础设施遭自然灾害严重破坏,救援、救灾,应急通信的场合。

到稿日期:2008-12-04 返修日期:2009-02-25 本文受国家自然科学基金广东联合基金项目(U0835004),国家自然科学基金项目(60803151),863项目(2007AA01Z215),高等学校学科创新引智计划(B08038)资助。

陈晨 博士,主要研究方向为无线近距离通信、无线传感器网络等,E-mail:cc2000@mail.xidian.edu.cn;谢伟光 硕士研究生,主要研究方向为传感器网络、无线通信;裴庆祺 副教授,主要研究方向为计算机安全、无线传感器网络安全;曾兴雯 教授,主要研究方向为无线通信、通信抗干扰;范科峰 博士,主要研究方向为无线短距离通信。

但用户的移动也产生了相应的问题。首先,为了确保数据正确投递给用户,用户需要不停的广播自己的位置更新消息,并需要网络中的传感器节点也更新到用户的路由信息。这使得在无线传感器网络中极度稀缺与珍贵的能量资源过度地浪费,进而导致网络生存时间大幅缩减。其次,频繁的位置更新消息会加剧网络中消息的碰撞,导致消息的重传,使网络的性能下降^[4]。

2.1 移动代理模型

文献[5]中提出了一种基于代理的用户移动性支持模型。通过用户指定代理而使用户从频繁发送位置更新信息中解放了出来。这种模型适用于网络规模较小、节点密度较为稀疏的场景。

如图2所示,在布置网络时,汇聚节点被放在了一个适当的位置,如网络的中心或边界。在网络初始化阶段,汇聚节点发送身份标识消息,并使其在全网内泛洪。这样做的结果是使网内全部的节点都知道了自己到汇聚节点的路径以及跳数。

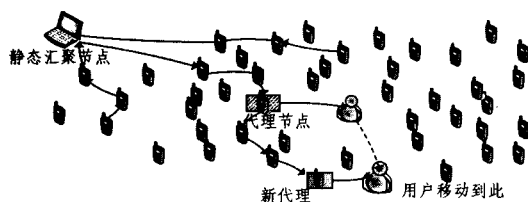


图2 代理模型

当用户移动到节点覆盖的网内并且需要收集感兴趣的信息时,用户选取一个节点作为代理节点,可选能量最多或距用户最近的。用户直接向代理节点发送查询消息,由于代理知道到汇聚节点的路由,故代理直接把查询消息路由到汇聚节点,再由汇聚节点负责组织节点收集相应的数据。待数据收集完成后,汇聚节点通过反向路径把经融合后的数据发给代理节点,再由代理节点转交用户。在上述的数据包路由的过程中,用户可能移动到了另一个位置。此时若用户发现与原来的代理节点不能进行关联,即移出了代理节点的通信范围,则重新指定一个代理,并保证此代理能和先前指定的代理连通。新代理向原代理发送通告消息,告知原代理将后续的数据转发给它。虽然在用户的移动过程中,用户可能进行多次代理节点的指派,但对于汇聚节点来说是透明的,因为汇聚节点只负责把经融合后的数据转发给用户最初指派的代理。可以说用户的移动效应被限制在了一定的范围内,这对延长网络使用寿命,减少数据碰撞有积极的作用。

2.2 网格双层模型

在发生重大自然灾害,通信设施严重受损的情况下,可以通过在受灾的地区以飞机抛洒传感器节点的方式,建立起大规模冗余部署的应急通信网络。此时建立的网络中可能不存在功能强大的汇聚节点,用户移动到网络中必须自己来收集信息,也就是说原来的三层结构退化到了两层。在这种应用场景下,文献[4]提出了一种基于网格的双层模型,解决了支持用户移动和高效收集信息的问题,即由被选举出的传播节点(dissemination points)构成上层网络,由网格内的节点构成下层网络。

当用户需要查询相应的信息时,可以在近一个网格大小的范围内泛洪,以发现并关联传播节点,并把此传播节点指派

为用户的直接传播节点(immediate dissemination point)。找到直接传播节点后,用户指定离它距离最近的一个网格内的节点为自己的原始代理(primary agent)。由原始代理负责把用户的查询消息路由到直接传播节点,再由直接传播节点把此消息路由到上游的传播节点。依此类推,直到消息达到目的传播节点地址。目的传播节点收到查询消息后,负责把收集来的消息融合并按反向路径传输到直接传播节点。直接传播节点把数据传输给网格内部的原始代理,原始代理负责把数据投递给用户。

为了支持用户的移动性,文献[4]中又引入了直接代理(immediate agent)的概念,工作机制如图3所示。当用户在网格内移动且移动到原始代理一跳范围之外的位置时,广播一个直接代理请求消息。当他周围的节点收到此信息后,发送相应的ACK。用户选择发送ACK具有最高信噪比的节点为他的直接代理,并把这个直接代理的位置信息发送给原始代理。原始代理收到此消息会更新其路由表,把以后应投递给用户的数据发给直接代理,由直接代理转交。当用户再次移动出最近指定的直接代理时,用户再次发起请求信息,选举新的直接代理。并把此代理的信息发送给原始代理,令其更新路由表。也就是说用户在网格内移动时,在同一时刻只有一个原始代理和一个直接代理,且原始代理是不变的,直接代理可以动态变化。但为了保证用户能够接收已经到达旧的直接代理但还未来得及转发给用户的数据,新的直接代理的位置信息也会发给原来的直接代理。

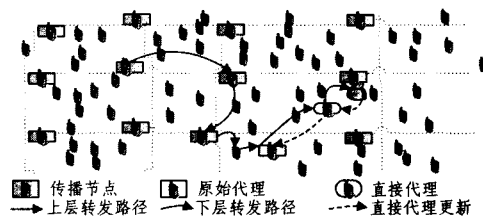


图3 双层模型用户移动性支持

当用户在原始代理所属的网格内移动时,不断更新原始代理与直接代理的定时器,使其保持活跃。当用户移动到另一个网格,则再次在略大于一个网格的面积泛洪,以发现新的传播节点,并指定新的原始代理。

2.3 移动代理模型与网格双层模型比较及待研究问题

移动代理模型适合于网络规模较小且存在功能完备的汇聚节点的应用场景,而且在网络中布置多个汇聚节点会显著改善网络的性能。网格双层模型适合于大网络规模但不存在汇聚节点的场景。

在代理模型中存在时延与网络寿命之间的矛盾。在无线传感器网络中,传感器节点通常采取监听/休眠机制来提高网络寿命。在用户移动的过程中,为保证用户快速更新代理并减少数据的时延,则需使用户周围的大量节点始终保持监听状态。当网络中存在多个用户时,会加剧网络中传感器节点的能量消耗,从而缩短网络寿命。这个问题还需要进一步深入研究。

在网格双层模型中,网格宽度 a 过小,会使网络在网格建立时消耗较多的能量; a 过大,又会导致用户在泛洪时使网络消耗较多的能量。如何确定 a 的大小,还需进一步深入探讨。此外,可通过使传播节点工作在双功率模式,以改进网格双层模型。所谓双功率模式,即在与传播节点之间通信时采用较

高的功率,以确保链路的连通性;在与原始代理通信时,采用较低的传输功率,以节约能量。

3 汇聚节点移动性的支持

在无线传感器网络中,研究的重点是延长网络的生存时间并确保网络的连通性。利用具有移动能力的汇聚节点来主动收集信息,可以减少传感器节点到汇聚节点的跳数,从而节约能量;并且可以主动到被分割的区域去收集信息,以确保网络的连通性。根据移动汇聚节点的移动策略以及汇聚节点与传感器节点之间的通信方式,可把支持汇聚节点移动的模型分为移动汇聚节点分配(MSA; Mobile Sink Allocation)模型^[6]和移动数据采集器模型(MDC; Mobile Data Collector)^[7]。

3.1 MSA 模型

在传统的无线传感器网络中,节点通过无线多跳通信方式把从源节点产生的数据发送到静态的汇聚节点。这导致了紧邻静态汇聚节点的传感器节点承担了大量的数据路由工作,使它们的电量过早地耗尽,并使网络产生的数据不能投递给汇聚节点^[8]。而使用移动汇聚节点后,可使网络中节点的电量均匀地消耗,从而延长网络的生存时间。文献^[6]指出,采用移动汇聚节点后,网络生存时间相对于静态汇聚节点网络有3~4倍的改善。

在MSA模型中,网络的生存时间被划分为数个回合(round)。在每个回合的开始,汇聚节点开始根据指定给它的路径移动到相应的位置,并在余下的间隔时间内保持静止状态。在第一个回合中,汇聚节点被随机放在一个位置。在一个回合开始时,网络中节点通过发送hello分组,获取其周围邻居节点的信息,并把此信息和自身的电量信息发送到汇聚节点。在一个回合将结束时,由于部分节点参与了数据的转发,因此消耗了相应的能量。汇聚节点通过收集到的信息,可确定所收到的数据包是经由哪些节点路由过来的。由于知道哪些节点消耗了能量,因此汇聚节点动态地更新节点剩余的可用能量值。由于在回合结束时,汇聚节点根据每个节点在下一回合中的能量可用值和全网的拓扑结构,通过位置估计算法^[8]来确定汇聚节点的下一个最佳位置。

3.2 移动数据采集器(Mobile Data Collector)模型

在收集实时消息的智能交通(ITS)系统中,传感器节点被布置在各个主干道上。考虑到节点收集到的消息具有高度相关性,如车流量,只需在相应的距离间隔部署节点^[7]。由于节点之间间隔变大,若仍采用静态汇聚节点的方式,只能通过提高节点的发射功率来保证网络的连通。为解决网络连通的问题,可采用Data MULE^[9]模型。即采用移动的汇聚节点负责收集网络中的信息,并缓存信息直到到达网络数据的接入点。到达接入点后,移动汇聚节点把数据提交给数据库,以使用户查询。

如图4所示,在网络初始化阶段,靠近汇聚节点移动路径的节点被选定为虚拟簇头。它们负责进一步向网内注入查询信息,并把查询结果返回到移动汇聚节点。当汇聚节点移动到虚拟簇头通信范围内,且有查询请求时,则将查询消息交给虚拟簇头。虚拟簇头根据相应的路由算法把查询投递到查询区域。由于节点处于移动状态,查询信息中除包含查询事件类型及查询区域之外,还包括注入查询的时间以及移动汇聚节点的移动速度。当查询被处理,并且查询结果经数据融合后,查询区域的节点根据查询信息注入时的时间和当前的时

间,以及汇聚节点移动速度来确定数据包发送给哪个虚拟簇头。当虚拟簇头受到查询响应结果后,若移动汇聚节点恰好在其通信范围内,则将响应结果递交给移动汇聚节点;但若未发现移动汇聚节点,则先把数据缓存,并启动定时器。如在定时器超时前移动汇聚节点移动到了其通信范围,则把数据转发。若定时器超时后移动汇聚节点还没有出现,则把数据向汇聚节点的移动方向转发给下一个虚拟簇头节点。

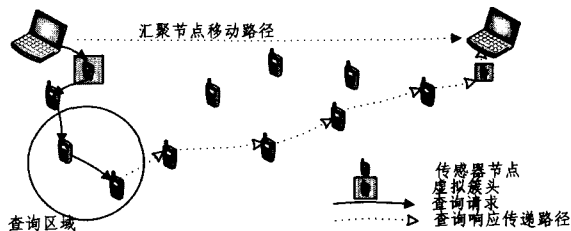


图4 主动查询模式

3.3 MSA模型与MDC模型比较及待研究问题

MSA模型与MDC模型的共同点是通过使汇聚节点移动来主动收集信息,从而增强了网络的连通并提高了网络寿命。不同的是,在MSA模型中汇聚节点在网络中的位置由汇聚节点自身动态计算;在MDC模型中汇聚节点的移动路径一般是预先定义好的。而且MDC中的虚拟簇头在未发现汇聚节点时需要缓存数据,这增加了数据传输延迟。

MSA模型中把网络的生存时间划分为数个回合的思想很好,但汇聚节点在计算自身下一个回合时使用的算法比较复杂。如何设计一个较简单的算法,需要我们进一步深入研究。

在MDC模型中,如果汇聚节点移动的速度较慢,虚拟簇头节点长时间不能发现汇聚节点,导致缓存溢出的问题,以及如何布置虚拟簇头,同样需要深入探讨。

4 传感器节点的移动性的支持

由于硬件水平的发展,对传感器节点移动性的支持也成为研究热点。传感器节点的移动可分为强移动与弱移动^[10]。所谓强移动,是指传感器节点自身从一个位置移动到另一个位置,一般来说位置的移动可能是通过被检测对象的移动(传感器节点附着在其上)或通过自身的马达。弱移动是指由于传感器节点自身故障或电池能量的耗尽导致网络拓扑的动态变化。目前对传感器节点的移动性的研究一般都放在MAC层。传统的MAC协议一般可支持传感器节点的弱移动,但对强移动性的支持并不理想。对传感器节点移动性的支持,可通过改进MAC协议来实现。对于支持传感器节点移动性的MAC协议可以分为基于竞争的(contention-based)、基于调度的(schedule-based)与复合型的。

4.1 基于竞争的MS-MAC

MS-MAC^[11]改进了S-MAC,使移动节点在移动到另一个虚拟簇时可以快速接入网络。S-MAC^[12]使传感器节点周期性地休眠,以节省能量,并使具有相同的休眠/侦听调度的节点形成虚拟簇。节点在执行一定次数的周期性监听和睡眠调度后,必须进行一次全周期监听,在该周期内节点始终处于监听状态,以确保节点发现调度方式不同的新邻居。当在一个虚拟簇中的节点移动到另一个虚拟簇中,但不知道这个新的虚拟簇的调度时,该节点必须等待到该虚拟簇的下一个全

监听周期(最坏的情况是等 2min)。MS-MAC 通过引入活动区域(active zone)来解决此问题。

虚拟簇中的边界节点通过比较两次收到的 SYNC 信号的强度来判断周围节点的移动性,并把计算后的移动消息包含在下次的 SYNC 消息中。当边界节点两跳范围内的节点收到 SYNC 消息后,根据移动信息中移动节点的速度来重新确定自己的全监听周期。由于当有移动传感器节点时全监听周期会相应变短,移动节点可以减少等待时间,以便快速接入新的虚拟簇。

4.2 基于调度的 MMAC

在 MMAC^[10] 协议中的调度机制与 TRAMA^[13] 中的相同,并且通过引入动态的帧长来支持节点的移动性。当网络中的传感器节点呈现较强的移动性,则减少帧长,以加快调度信息的更新,适应节点加入和离开网络所产生的拓扑变化;若网络呈现较强的静态性,则增加帧长,以减少调度信息的更新,延长网络的生存时间。

MMAC 利用每个节点自身的位置信息并通过一阶线性自回归预测模型 AR-1 使节点预测自己在下一个帧时的位置信息^[14]。

在以 H 为簇头的虚拟簇中,MMAC 中的移动自适应算法可描述如下:

- 1) 在每个帧的最后一个时隙,网络中的所有传感器节点需通过自身的设备(如 GPS 接收机)来获取自身的位置信息,并通过上述的 AR-1 模型预测出自己在下一个帧中各个时隙的位置信息。

- 2) 对节点 H 及其两跳邻居节点,通过对步骤 1) 中计算出的各个时隙中的位置信息取平均,得到 B 及其两跳邻居节点在下一个帧中的位置估计。

- 3) 利用步骤 2) 中的各个节点的位置信息,可得到在下一个帧中有哪些节点要离开 H 及哪些节点要加入 H。

- 4) 当预测得到的加入节点与离开节点数的总和大于预定的门限值时,减少下一个帧的长度。

- 5) 当预测得到的加入节点与离开节点数的总和小于预定的门限值时,增加下一个帧的长度。

- 6) 通过新的帧长,调整帧的时隙分配策略。

4.3 复合型的 MH-MAC

MH-MAC^[15] 为静态的节点分配基于调度的静态时隙,为动态的节点分配基于竞争的动态时隙。静态时隙与动态时隙在帧中所占的比例可以通过网络中移动节点所占的比例来动态调整。

MH-MAC 使网络中的每个节点利用移动估计算法^[16] 来估计自身的移动状态,并把自身的移动信息放在每帧开端处的信标帧中广播。这样,网络中的簇头节点可以通过信标帧获取整个网络中各个传感器节点的移动信息。MH-MAC 利用这个信息提出的移动自适应算法如下:

- 1) 预定义一个判断网络动态的上限值 M_{up} ;

- 2) 预定义一个判断网络动态的下限值 M_{low} ;

- 3) 如果网络中处于移动状态的节点数大于 M_{up} , 断定网络是动态的,减少帧长并提高动态时隙所占的比例;

- 4) 如果网络中处于移动状态的节点数小于 M_{low} , 断定网络是静态的,增加帧长并提高静态时隙所占的比例。

4.4 支持移动性 MAC 协议中待研究问题

在 MS-MAC 中采用的策略是使边界节点周围的传感器节点动态改变全周期监听频率,来使移动传感器节点快速接入另一个虚拟簇。但当网络中存在多个移动节点时,将导致边界节点周围的传感器节点的能量过度地消耗,从而使网络出现分割,并使网络寿命缩短。

在 MMAC,该算法存在虚拟簇间不同步的问题。例如虚拟簇 B 中有大量节点移入移出,故 B 减少了本簇的帧长;但虚拟簇 A 的帧长没有改变,这会导致虚拟簇间的不同步。为解决同步问题,应确保帧长只在全局同步期(global synchronization period)改变^[10]。在全局同步期以前,各个虚拟簇中的帧长保持一致,但帧内部的随机接入期与调度期的比例可动态调整。同时,如何降低节点移动估计算法的复杂度,也是一个可研究的问题。

基于竞争的 MAC 协议使节点移入新的虚拟簇时,可立即开始竞争信道,从而减少接入延迟。但是很可能发生数据包的碰撞,导致数据包的重发,从而影响网络寿命。基于调度的 MAC 协议,当传感器节点分配到时隙时,可以不受任何干扰地传输数据。但当新的移动节点移入到网络中,则需较长的时间等待调度信息。MH-MAC 吸取了基于竞争的和基于调度的 MAC 协议的优点,提出了一种复合结构的适应传感器节点移动性的 MAC 协议。但这种协议中同样也存在着基于竞争和基于调度 MAC 协议的问题。如何扬长避短,是一个需要深入研究的问题。

结束语 随着硬件水平的发展,用传感器网络构建,处理实时业务的、无所不在(Ubiquitous)的网络远景,已不再遥远。但真正的无所不在的传感器网络,必须处理用户、汇聚节点及传感器节点的移动问题。本文分析了针对传感器网络中各种移动性支持的解决方案。当然,这些方案中也存在着相应的问题需要我们进一步研究。

参考文献

- [1] 孙利民,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005
- [2] Akyildiz I F, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40
- [3] Chen Huan, et al. Smart Home Sensor Networks Pose Goal-driven Solutions to Wireless Vacuum Systems[C]// International Conference on Hybrid Information Technology, 2006
- [4] Ye F, et al. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks[C]// ACM MobiCom, 2002
- [5] Kim Sang-Sik, et al. Mobility Support for Users in Wireless Sensor Networks[C]// Eighth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 2007
- [6] Gandham S R, et al. Energy Efficient Schemes for Wireless Sensor Networks with Multiple Mobile Base Stations[C]// Proc. IEEE INFOCOM, 2005
- [7] Tacconi D, et al. Supporting the Sink Mobility: a Case Study for Wireless Sensor Networks[C]// Proc. IEEE, 2007
- [8] Heinzelman W R, et al. Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000
- [9] Shah R C, et al. Data MULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks[C]// Proc. IEEE Wksp. Sensor Network Protocol and Apps, 2003

- [10] Ali M, et al. MMAC: A mobility-adaptive collision-free mac protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. 24th IEEE IPC-CC. 2005
- [11] Pham H, et al. An adaptive mobility-aware MAC protocol for sensor networks(MS-MAC)[C]//Proc. IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2004
- [12] Wei Ye, et al. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE/ACM Trans. Net, 2004
- [13] Ajendran V R, et al. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks[J]. ACM Sen Sys, 2003
- [14] Zaidi Z R, et al. Mobility Estimation for Wireless Networks Based on an Autoregressive Model[C]//Proc. IEEE Globecom 2004. 2004
- [15] Raja A, et al. A Mobility Adaptive Hybrid Protocol for Wireless Sensor Networks[R]. USC/ISI Technical Report ISI-TR-567. 2003
- [16] Hu H T, et al. Mobile awareness based cluster selection mechanisms in wireless Ad hoc networks[C]//Proc. 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2004

(上接第 20 页)

- [5] Sorouchyari E. Blind separation of sources, Part III: Stability analysis[J]. Signal Processing, 1991, 24: 21-29
- [6] Tong L, Liu R, Soon V. Indeterminacy and identifiability of blind identification[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(5): 499-509
- [7] Cao X R, Liu R. General approach to blind source separation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(3): 562-571
- [8] Bell A J, Sejnowski T J. An Information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution[J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1004-1034
- [9] Lee T, Girolami M, Sejnowski T. Independent Component Analysis Using an Extended Information Algorithm for Mixed Sub-Gaussian and Super-Gaussian Sources[J]. Neural Computation, 1999, 9(7): 1483-1492
- [10] Cardoso J F, Laheld B H. Equivariant adaptive source separation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(12): 3017-3030
- [11] Cardoso J F. Informax and maximum likelihood for blind source separation[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, 4(4): 112-114
- [12] Amari S, Cichocki A. Adaptive blind signal processing-neural network approaches[J]. Proceedings of IEEE, 1998, 86(10): 2026-2046
- [13] Hyvarinen A, Oja E. A Fast Fixed-point Algorithm for Independent Component Analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1483-1492
- [14] Karhunen J, Joutsensalo J. Representation and separation of signals using nonlinear PCA type learning[J]. Neural Networks, 1994, 7: 113-127
- [15] Oja E, Karhunen J, Wang L. Principle and independent components in neural networks-Recent developments[C]//Proc. 7th Italian Workshop Neural Networks, WIRN'95. Vitri, Italy, 1995: 20-26
- [16] Haykin S. Unsupervised Adaptive Filtering: Volume II, Blind Deconvolution First Edition[M]. USA: John Wiley and Sons, 2000
- [17] Haykin S. Unsupervised Adaptive Filtering: Volume I, Blind Source Separation First Edition[M]. USA: John Wiley and Sons, 2000
- [18] Amari S, Cichocki A, Yang H H. A new learning algorithm for blind signal separation[M]. Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 1996: 757-763
- [19] Cichocki A, Amari S. Adaptive Blind Signal and Image Processing: Learning Algorithms and Applications[M]. First Edition. USA: John Wiley and Sons, 2002
- [20] Cichocki S A. 自适应盲信号与图象处理[M]. 吴正国, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [21] Hyvarinen A, Karhunen J. 独立成分分析[M]. 周宗潭, 董国华, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007
- [22] 杨福生, 洪波. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [23] 马建仓, 牛奕龙, 陈海洋. 盲信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
- [24] 史习智, 等. 盲信号处理——理论与实践[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008
- [25] Cichocki A, Unbehauen R, Moszczynski R. A new on-line adaptive learning algorithm for blind separation of source signals[J]. Proc. ISANN94, 1994, 30(17): 406-411
- [26] Hyvarinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634
- [27] Cardoso J F. Source separation using higher order moments[C]//Proc. IEEE ICASSP. 1989, 4: 2109-2112
- [28] Soon V. An extended fourth order blind identification algorithm in spatially correlated noise[C]//Proc. IEEE ICASSP. 1990: 1365-1367
- [29] Tong L. AMUSE, A new blind identification algorithm[C]//Proc. IEEE ISCAS. 990: 1365-1367
- [30] Cardoso J F. Higher order constraints for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1999, 11(1): 157-192
- [31] Anemuller J, Kollmeier B. Amplitude modulation decorrelation or convolutive blind source separation[C]//ICA2000. Helsinki, 2000: 215-220
- [32] Nguyen H L. Blind source separation for convolutive mixture [J]. Signal Processing, 1995, 45: 209-229
- [33] Taleb A. Source separation in post-nonlinear mixtures[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(10): 2807-2820
- [34] Pajunen P, Hyvarinen A, Karhunen J. Nonlinear blind source separation by self-organizing maps[C]//Proc. Int. Conf. on Neural Networks(ICANN'96). Bochum, Germany, 1996: 815-820
- [35] Bishop C, Svensen M, Williams C. GTM: The generative topographic mapping[J]. Neural Computation, 1998, 10: 215-234
- [36] Girolami M. Advances in independent component analysis[M]. London: Springer, 2000
- [37] Rojas F. Nonlinear blind source separation using genetic algorithms[C]//ICA2001. San Diego, 2001: 400-405