

面向移动目标追踪的无线传感器 网络 QoS 指标体系设计

俞 靓 王志波 骆吉安 孙喜策 王 智

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中服务质量(Quality of Service, QoS)的控制目的在于缩减受限资源的开销,它能够最大程度地提高网络的整体性能,延长网络寿命.针对 WSN 的 QoS 设计与评价体系因其庞杂的应用场景而难以统一.文中面向移动目标追踪这类特定的应用场合,讨论 WSN 的 QoS 指标体系设计.在 WSN 框架内,现有的面向移动目标追踪的研究更多的是把关注和改进的焦点放在定位和预测的精度上,忽视了由追踪任务本质属性决定的多项必然 QoS 要求之间的耦合与权衡,单一、片面强调精度的 QoS 分析对于复杂动态的网络系统来说是欠全面的.文中将基于 WSN 的移动目标追踪事件按照信息流顺序及数据处理特点,划分成 4 个任务模块:节点部署、节点选择、数据传输和分布式协作处理算法,并在综合 3 项 QoS 指标(即精度、时延、网络生存寿命)的总框架下,依次对各个任务模块中的映射 QoS 分指标及其支撑架构和现有协议进行阐述,并由此提出基于反馈和跨层设计的 QoS 保障机制.

关键词 服务质量;无线传感器网络;精度;时延;网络寿命;目标追踪

中图法分类号 TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2009.00441

QoS Framework Design for WSN-Based Tracking of Moving Targets

YU Jing WANG Zhi-Bo LUO Ji-An SUN Xi-Ce WANG Zhi

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract As an important resource reservation control mechanism for networks with insufficient capacity, the guarantee of relevant Quality of Service Indicators plays an essential role in both enhancing network performance and prolonging its effective lifetime. Nevertheless, the WSN-specific QoS framework is fundamentally difficult to formulate due to its application-driven nature signifying the fact that QoS requirements vary enormously with different tasks assigned to WSN. Hence, this paper proposes and analyzes the QoS framework for WSN under the specific scenario of tracking moving targets. Existing literature address mostly how to increase the localization and prediction accuracy while determining the positions of different detected targets before making special tracking strategies. However, the unbalance of the overemphasis on accuracy and the overlook of other equally central QoS requirements such as latency can be exparte and devastating for high-order systems with complex dynamics. Therefore, according to the information flow characteristics along the tracking task, the authors divided the task into four consecutive modules, namely sensor deployment, sensor selection, data transmission and distributed collaborative algorithms; and on the whole, and considered three high-level user abstractions of QoS indicators

收稿日期:2008-09-19;最终修改稿收到日期:2009-01-23. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2006AA01Z218)、国家自然科学基金(60434030,60773181,60873223)资助. 俞 靓,女,1983 年生,博士研究生,主要研究方向为多机器人任务分配与协调控制. E-mail: yvonne198309@gmail.com. 王志波,男,1984 年生,博士研究生,研究方向为无线传感器网络的目标追踪与节点调度. 骆吉安,男,1983 年生,博士研究生,研究方向为无线传感器网络的分布式检测与协同信号处理. 孙喜策,男,1985 年生,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络的覆盖控制与网络安全. 王 智(通信作者),男,1969 年生,副研究员,博士生导师,研究领域为无线传感器网络、移动感知系统和工业通信与系统.

in tracking: accuracy, latency and network lifetime. Further, they seeked to break down those high-level abstractions into each module wherein they propose several related lower-level QoS indicators as well as their supporting technologies and existing protocols to assist the understanding of both general and specific design and evaluation of QoS framework for WSN. Moreover, the authors demonstrate from the global QoS point of view how to guarantee the global QoS by employing feedback control and cross-layer design concepts.

Keywords quality of service; wireless sensor networks; accuracy; latency; network lifetime; target tracking

1 引 言

WSN 由大量部署在监测区域内的廉价微型传感器节点组成,这些节点通过无线通信自组织成一个应用驱动型多跳 Ad hoc 网络系统.其目的通常是在满足特定的用户需求(误差范围、最大可容忍时延等)下,感知、处理(网内)、推定和汇报网络覆盖区域中感知对象的行为或者动作信息(温度、速度、转弯角度等等).

WSN 是典型的具有科学研究与实用价值的战略型高新技术,可广泛应用于国家安全、环境科学、交通管理、反恐维稳、灾害预测、医疗卫生、城市化建设等应用领域^[1].它打破了传统网络点对点的声音信号与数据系统的交流模式,具有一种崭新的分散信息交换模式^[2-3].相较于传统有线网络,WSN 具有以下特点:节点能源及带宽受限;节点密度和数据冗余性较高;混合性数据流缺乏连续性和平衡度.其中节点能源及带宽受限几乎是设计任何协议和中间件算法都无法回避的最大的约束条件和成本函数^①.在网络能力有限的情况下,QoS 控制作为一种旨在缩减受限能源开销的机制,能够最大程度地保证并优化网络整体性能,延长网络寿命.

QoS 保障体系作为提高资源利用率和整体性能的重要手段,几乎渗透在任何网络能力有限的设计流程和评价标准中.其中最典型的包括计算机网络、电信网络等基于数据包的系统 and 因特网等分布式计算系统^[4-5].前者其 QoS 参数包括丢包率、时延、抖动、串序传送和误差,后者则另包含可用性和吞吐量等.当前,很多前沿的实时媒体流技术,例如互联网协议语音技术(VOIP)和网络电视技术(IP-TV),对时延非常敏感且要求相对固定的比特传输率.如何在一定带宽限制下,优化并整合各项编码方法、优先等级分配方式(Prioritization)和实时调度

机制以满足稳定的实时网络通信要求,是这类技术需优先考虑的核心问题.

因此,对资源同样严重受限的 WSN,提出针对特定应用的 QoS 指标体系以及相应优化策略是至关重要的.而针对 WSN 的 QoS 指标至今尚缺乏一个系统完备的定义和描述,最根本的原因在于 WSN 庞杂的应用场景,这给为 QoS 框架的统一带来了巨大挑战.以文献[6]为例,作者按照协议栈分层,将抽象的用户指令型 QoS 指标(例如时延要求),分解到物理层、MAC 层、连通保持层、网络层、传输层、数据管理层和应用层等协议栈的各层中,提出并详尽梳理了各层有关的 QoS 分指标,例如网络层关于时延的分指标为路径延迟,传输层为多点到端延迟,数据管理层为发现延迟等等.但文献[6]并未全局阐明该框架在面向不同应用的传感网络相关架构时的指导性,亦未系统阐释跨层各项分指标之间可能存在的联系以及跨层设计(cross-layer design)优化的缺失;而此类缺失已被证明极有可能降低系统的稳定性和可执行性.进行跨层设计的必要性如下^[7]:

(1)传统 OSI 模型适用于有线网络,不适用于无线网络;

(2)综合考虑无线网络各层之间的关系和相互作用能提高无线网络针对具体场景的性能;

(3)共享各层间的状态和条件等,可优化无线网络的性能;

(4)将信道条件(物理层和 MAC 层)提供给路由、传输和应用层可设计更好的分配和优化算法.

基于此,本文将在移动目标追踪这类特定问题的情境下对 WSN 的 QoS 体系框架的设计和实现进行论述.移动目标追踪作为 WSN 的典型应用,横贯定点监测和动态跟踪两类问题,不仅要求传感网络

① Matteo C. Quality of service in wireless sensor networks: A survey. <http://es.fbk.eu/people/ceriotti/extra/index.html>

对目标的位置、速度和移动方向等环境物理参数的感知、决策达到精度和时延的要求,同时须尽可能延长有效网络寿命以达到长期、持续、稳定的监控. 鉴于将 QoS 分解到协议栈各个层面会割裂不同层面分指标之间的耦合,本文按照 WSN 追踪移动目标的信息流特点及顺序,重点论述 WSN 如何在特定的 QoS 下进行节点部署、数据传输、分布式协作处理(检测与定位)以及基于预测的节点选择. 其中,目标的检测和定位作为移动目标追踪最重要的两项中间件算法,决定了节点部署的类别及覆盖算法的性能目标,对通信误码率和传输延迟提出了明确的量化指标,并且对监控节点动态簇唤醒和选取机制给出了设计依据. 换言之,无线传感器网络内的节点部署、节点通信、节点选择在较大程度上取决于分布式协作处理算法的选取和设计,如图 1 所示.

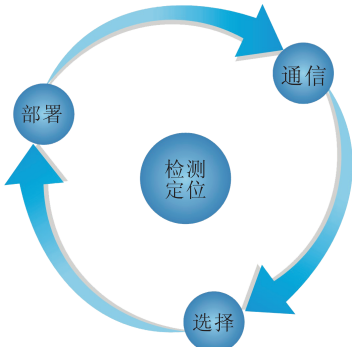


图 1 面向移动目标追踪的任务模块关系图

移动目标追踪涉及到网络的拓扑部署、数据通信、基于分布式协作处理的目标检测与定位、节点选择与任务分配等相关研究内容,本文阐述现有的研究成果并提出兼具典型应用特点和普适意义的 QoS 指标体系设计. 本文主要贡献有以下 4 点:

- (1) 按照信息流轨迹,将整个移动目标追踪事件分为以下 4 个任务模块:节点部署、节点选择与任务分配、数据传输和分布式协作处理;并将这类场合的 QoS 综合为三大类:精度、时延和网络寿命;
- (2) 按照信息流向顺序,依次阐述各任务模块中涉及的相关 QoS 分指标,并分别对相应分指标的支撑架构和现有协议进行综述,如图 2 所示;
- (3) 分析不同任务模块映射分指标之间的联系和制约,并对跨层设计给出指导意见.
- (4) 基于反馈控制和跨层设计思想,将控制引入无线传感器网络 QoS 保障机制,探讨如何在一致的 QoS 要求下分别完成各个模块、算法或者协议的独立设计并优化.

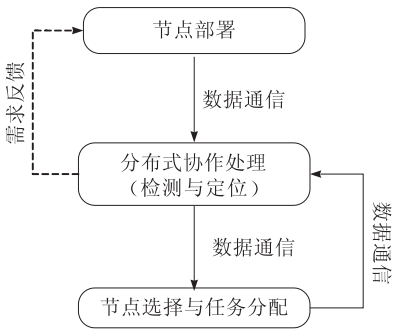


图 2 移动目标追踪策略的任务模块联系图

本文第 2 节按照信息流向顺序在精度、时延和网络寿命三大 QoS 要求下,依次对节点部署、协作算法、数据通信和基于预测的节点选择这 4 个模块进行相关综述和分析,并通过本研究组对各模块取得的研究成果来进一步说明如何在理论和实际中以改进网络 QoS 为出发点设计相关算法及协议;第 3 节在阐述国内外现有的经典移动目标追踪策略的基础上,提出面向移动目标追踪的 WSN 的 QoS 体系框架,并对跨层优化与设计给出指导性建议;第 4 节总结全文.

2 追踪策略的 QoS

2.1 节点部署

在面向移动目标追踪问题的典型应用中,WSN 的网络构架方式与节点部署策略充分地表征了其逻辑层级与空间位置的非负映射关系. 作为具有明显时间特性的无线自组织网络,首先需要针对底层网络选取合适的组网形式,即构建鲁棒性好、具有良好实时性的网络架构.

现有网络架构包括同构和分层两大类. 同构网络,是一种普通的 Ad hoc 网络,每个节点可执行的功能及任务均相同,目标出现时,检测到事件发生的节点将协作完成估计、定位和预测等追踪任务,节点间不存在等级区分. 如图 3 所示;当目标出现在位置 L1 和位置 L2 时,检测到目标信息的节点与各自的邻居节点实时通信后,在特定路由协议指定下将位置信息沿有效路径传递至网关(sink);分层网络,无论采用静态或动态组网,都将整个网络分为网关和多簇,其中每个簇包括处理能力较强的簇头节点(cluster head)和能力一般的普通节点(common node). 如图 4 所示:普通节点负责检测事件或传递信息至簇头,簇头在收集信息的同时和其它簇头或网关通信并遵照预置算法及协议给出下一步操作指

令. 相较而言,同构网络的实现分析较为简单且节点边际效应和工作移交对网络造成的影响较小,但受节点部署类别和分布密度影响很大,容易增大系统数据传输的不均衡性甚至导致最终的追踪结果发散;分层网络因集成了分布式和集中式控制机制的优点,即决策的优化和通信的均衡,网络可扩展性和追踪实时性得到了更大程度的保证,因而受到学术界的普遍关注和认同.

现于室内环境. 该方法根据监控区域的地理形状和障碍物分布,将整个区域分为若干个更小的子区域,然后在各子区域内进行传感器部署.

随机性部署多用于网络规模较大、多移动目标追踪或环境恶劣的室外网络,采用的是随机播撒的方式将节点散布于监控区域,并遵循随机规则部署模型或随机泊松部署模型对 WSN 进行节点部署. 前者是指对 λ 个传感器节点,任意节点均以等可能性部署于区域中任意位置,与其它节点无关,后者是指对于传感器密度为 λ 的网络,其部署过程为均一的泊松点过程,各子区域中的传感器分布均服从泊松分布,且各子区域分布相互独立. 文献[10]通过定义“覆盖空白”值量度随机性部署区域是否被完全覆盖,并使用圆盘覆盖模型及基于网格的临界分析方法对临界传感器密度(CSD)进行理论分析. 文献[11]对随机部署的传感器节点,采用划分感知覆盖(SC)方法,对目标对象进行轮值监控覆盖,提高网络监控效率,节省节点能量消耗.

节点部署涉及的 QoS 要求主要分为两类:传感模型感知精度和覆盖算法能量有效性. 传感模型是单个传感器监控力度的抽象,是单个节点信号处理及多节点系统信号处理技术的理论模型,一般分为物理覆盖感知模型和信息覆盖感知模型;覆盖问题是 WSN 研究中的基本问题之一,通过寻找空间坐标系中的点坐标与 WSN 节点的非负映射关系,来有效表征对待监控目标/区域的监控观测质量.

2.1.1 传感模型感知精度

节点的传感模型是 WSN 节点部署的第一步抽象,是提出和分析覆盖算法和网络连通度的基础,其精度直接影响上层协议的可执行性. 作为单个节点和多节点系统信号处理技术的理论模型,传感模型可分为物理覆盖传感模型(或 0-1 模型)及信息覆盖传感模型(或概率模型). 两类传感模型的不同体现为:前者基于感知圆盘原始模型,将传感模型简化为圆盘模型——所有处于以传感器节点为中心、以定长 R 为半径的圆盘范围内任意点均以概率 1 被覆盖^[12];后者基于信号预估理论,通过最优线性无偏预估器得出事件的估计值偏差,并定义“信息暴露”作为估计值偏差的门限概率值提出 (K, ϵ) 覆盖一阶及高阶模型^[13-15].

文献[16]具体讨论了这两种传感模型:0-1 模型与概率模型. 如图 5(a)所示,在 0-1 模型中,节点的感知范围是以节点为圆心、最大感知距离为半径的圆,即若目标出现在该圆区域内,则一定能被该节

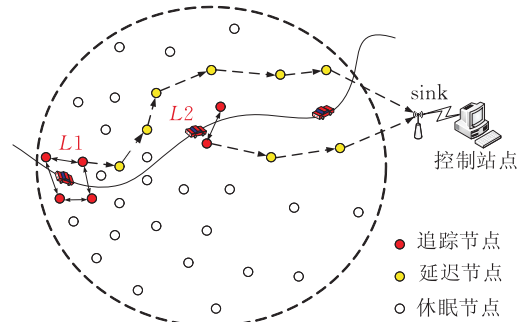


图 3 同构网络追踪架构

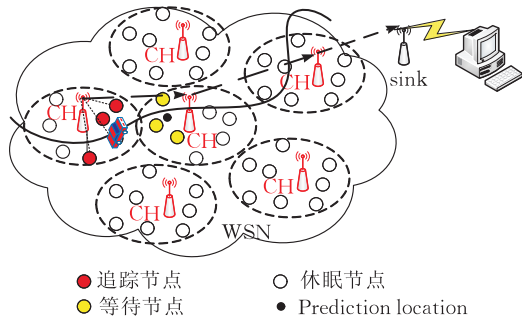


图 4 分层网络追踪架构

当然,网络构架仅提供基本信息体系框架. 为了能够进一步优化网络结构并提供高效、复杂度较低的应用驱动型 QoS 指标体系,需要进一步提供合理而有效的节点部署策略,从数理逻辑层面实现欧式空间点与物理传感器节点的非负映射关系,以适应不同应用场合的非均一网络需求,并在一定程度上影响网络 QoS 指标体系的系统级设计方案(例如是否考虑传感器节点的异相非同质特性)将对网络拓扑控制与覆盖策略的具体实现提出挑战.

常见的节点部署策略可分为确定性部署与随机性部署两类. 确定性部署多用于面向低速运动移动目标跟踪、环境友好的中小型传感器网络,它要求用最少的传感器节点来人为手动部署监控区域以满足特定的覆盖或者连通 QoS 要求. 文献[8]考虑了确定性部署区域中保持节点完全连通和完全物理覆盖所需的最少传感器节点个数问题. 文献[9]考虑带有障碍物的任意形状的 WSN 部署问题,这种情况多出

点检测到(1);否则就无法检测到(0).该感知模型是一种离散的理论模型,因其简单、易于仿真计算的特点多用于理论推导与证明,而实际上,近年来研究人员发现,节点的感知范围随传感器的种类及灵敏度的不同而呈现出很大的差异,不仅有方向性而且时常呈现出不规则的形状.因此 0-1 模型与实际模型相去较远,可以为启发式算法研究提供必要的简化,却无法为实际传感网络系统的设计提供必要的精度保障,直接影响到节点数据采集的有效性和置信度,为以数据为中心的无线传感网的上层协议和算法的设计和实现带来隐患.在概率模型中,目标被节点检测到的概率与目标和节点之间的距离及方向均相关,如图 5(b)所示.部分学者认为,概率感知模型是一种连续模型,当单个传感器无法满足监控的概率需求时,可以通过多节点监控信息的融合进行协同感知来提高一个节点集合对环境的感知范围和对目标的检测率,例如图 6 中为了保证对一点的目标检测率至少为 75%,既可以令 S1 工作其他休眠,也可以令 S2 和 S3 工作而 S1 休眠,两种调度机制可以轮换工作以减少单个节点的平均能量消耗从而延长 3 个节点的协同网络寿命.基于概率模型的分布式检测特点是通过节点之间的协作提高一簇节点对出现在监控区域内目标的检测概率甚至提取到单个传感器无法检测到的目标信息,以较少能量最大程度地还原现实网络环境中的物理信息感知状态,更加符合网络感知 QoS 的较高要求.概率模型与传统方法区别较大,是一种相对复杂的传感模型,但是究竟该模型是否更贴合实际情况尚待更进一步的研究.

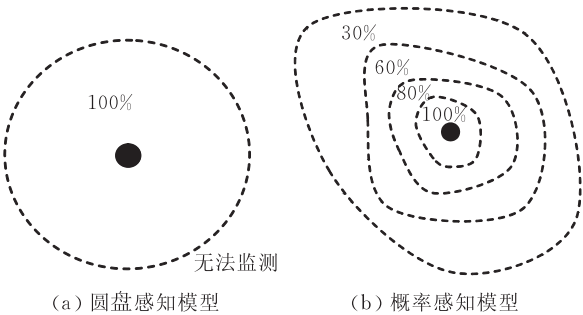


图 5

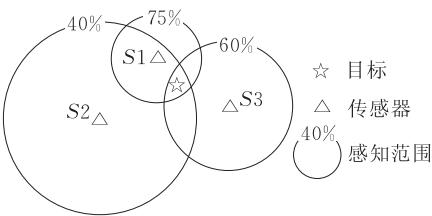


图 6 基于概率感知模型的多节点协作感知

文献[16]试图将二者统一于信号检测理论框架下:选择基于信号检测模型的感知范围并去除边界,即没有一个介于区域完全被监测和完全不能被监测之间的明确界线.从信号检测的角度来看,传统的圆盘覆盖模型可以用无限趋近 100% 的概率覆盖此圆盘区域.而另一种信息覆盖概念则是基于信号预估理论框架[17]:假设关于参数 θ 的事件发生,该点到传感器 s_k 的欧氏距离为 d .以 θ 为一辆坦克的震动(或声音)振幅为例,进一步假设参数 θ 随距离增大而衰减,当距离为 d 时, $\tilde{\theta} = \theta/d^\alpha$, 其中 $\alpha > 0$ 为衰减指数.某传感器对于参数 θ 的测量值为 x_k ,可能会受到外加噪声 n_k 的干扰,由此可得 $x_k = \theta/d_k^\alpha + n_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$).

文献[18]以最优线性无偏评估器为例说明,如何在测量值 x_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 的基础之上估计出参数 θ 的值.用 $\hat{\theta}$ 和 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 分别表示估计值和估计误差,若估计误差小于门限定义值,则不仅说明该事件(或目标)能够被检测到,同时在一定显著水平下能够得到参数 θ 的实际值.文中定义“信息暴露”这个核心概念,即估计误差值小于设定值 A 的概率 $Pr\{|\theta_k| \leq A\}$,用以衡量某点的被监测程度.当概率值大于或等于预先设定的门限值 ϵ ($0 < \epsilon < 1$),即 $Pr\{|\theta_k| \leq A\} \geq \epsilon$ 时,则可认为该点被 K 个传感器信息覆盖(称为 (K, ϵ) 覆盖).当且仅当 $(1, \epsilon)$ 覆盖中的传感器是各向同性传感器时,信息覆盖模型可简化为圆盘覆盖模型.

2.1.2 覆盖算法能量有效性

在面向移动目标跟踪问题中,网络寿命通常定义为从网络建立的起始时刻至该网络无法满足覆盖要求(完全区域覆盖或百分比区域覆盖)终止时刻的时间段.然而在节点部署阶段,为了增加信息冗余度,通常会额外放置(确定性部署)或者播撒(随机性部署)一定数量的节点.因此为了尽可能减少覆盖冗余、多余通信以使网络寿命最大化,可通过采用节点轮值工作机制与运行能量高效节点动态调度算法来降低网络覆盖冗余程度、降低网络能量消耗并使网络寿命最大化,最终实现网络实时通信与能量有效性之间的平衡.作为以数据为中心的网络体系,如何能够延长 WSN 寿命用以支持连续的数据传输任务、满足其他网络通信 QoS 指标成为覆盖控制算法开发的主要命题.

根据算法执行机制不同,能量有效性指标可由集中式算法与分布式算法具体实现.在分布式算法

中,决策过程是分散的,在许多场合下每个传感器所使用的信息仅来自于周围几个节点.文献[19]提出了覆盖配置协议(CCP),其中给出一种位置传感器覆盖度的规则:节点首先检查所有相邻区域的交点,如果每个交点均为 K 覆盖,则 CCP 规则可将冗余节点休眠,保证最少数量节点完全监控网络区域,而 K 则定义为理想感知度.文献[20]中提出一种分布式工作节点集动态调度算法——PEAS(Probing Environment and Adaptive Sleeping)算法.在该算法中,各节点每隔一段时间对其覆盖范围内的被监控状况进行探测,若该范围内的所有目标均正在被周围其他工作节点所监控,则该节点进入休眠状态,等待下一次唤醒并再次探测;若其覆盖范围内存在尚未被覆盖的目标,则该节点被唤醒进入工作状态,从而保证监控网络的覆盖率指标.在 PEAS 算法中,传感器节点仅利用了周边目标是否被覆盖的单源信息,没有综合考虑全局网络的覆盖情况和能量全局统筹;在集中式算法中,中央控制器能够兼顾各方向的信号传输与处理并将结果发布至网络中所有传感器.文献[21]中提出了一种集中式、利用节点分组工作的 WSN 覆盖控制算法——DSC(Disjoint Set Covers)算法.作者将问题抽象为最大流图问题并对节点进行任务集分配,各传感器节点仅属于一个任务集且各任务集均能完全覆盖待监控区域,各个任务集轮流工作从而均衡网络节点的能量消耗、提高网络工作寿命.该算法在网络部署之初需对网络工作节点集进行固定分组,这种静态的工作节点分组模式将导致工作节点在网络运行阶段无法对自身所处分组进行自适应调控,一旦某节点由于能量殆尽或地理位置发生改变,则该节点所处工作分组将受到一定的非实时性影响.此外,当有新节点加入网络时,由于固定分组已确立,DSC 算法要对所有节点进行二次重组,使新节点顺利进入整个网络的覆盖联动状态,有一定的能量资源消耗.

以上两个层面间相互渗透、彼此补充构成 WSN 节点部署的基本研究框架,同时在各自层面上具有一定的独立性,以便于研究者根据具体问题描述定义相应控制算法及覆盖策略.WSN 的能量供应有限,而 WSN 多应用在环境恶劣的场合下,更限制了传感器节点的能源更换,因而 WSN 需要在运行时采用节能机制,尽可能地减少节点的能量消耗,延长网络的工作时间.

2.1.3 不同传感模型下的覆盖算法性能比较

基于圆盘感知模型,我们将 WSN 的节点部署问题抽象为圆覆盖问题^[22].我们证明了当 3 个具有

相同覆盖范围的节点构成等边三角形时,节点的覆盖度可以达到 82.7%.再假设节点为势力场中的粒子,根据节点间力的作用部署节点,设计了 CE-VFA 算法,并在 Matlab 平台上对算法进行了仿真.结果表明,CE-VFA 算法获得了较好的网络部署效果,在减少能量消耗的同时很好地改进了原有部署的覆盖度和覆盖效率,其中覆盖度达到 90% 以上.

基于概率感知模型,我们提出了一种面向多目标关联点覆盖的 WSN 节点优化调度算法 D-MTAC(Disked-Multiple Targets Associated Coverage)^[23].该算法基于数据挖掘中的关联规则和 WSN 的能量高效原则,通过挖掘随机部署的网络节点与待监控目标间的关联感知关系给出高频关联目标集,进而采用优化时间分片和动态自适应分组机制确定能够使责任节点工作状态与网络寿命达到最优匹配的调度决策集合.仿真结果表明,在保证网络 QoS 的前提下该算法能够有效均衡网络节点能量消耗,降低网络累积能耗并最大化网络工作寿命.

2.2 数据通信 QoS

网络的连通可有效保证无线多跳通信的完成,直接决定 WSN 感知、监测与通信等各种 QoS 的提高,因此可靠、实时、准确的数据通信作为网络连通的保障因素是整个 WSN 正常运作的基石.

图 7 表明了由传感节点 A、B、C、D、E、F、G、H 组成的 WSN,当节点 D 失效时,整个无线网络断开,节点 A、B、C 与节点 E、F、G、H 之间无法通信.文献[11,16,24]从数学上证明了覆盖和连通之间的关系,并提出了保证 WSN 覆盖和连通的节点调度策略.文献[11]和文献[16]已证明当通信半径大于两倍感知半径时,只要 WSN 充分覆盖了某块区域,该网络即为连通的.因此,只要覆盖算法能够保障区域的完全覆盖,那么网络连通性就得到保证.

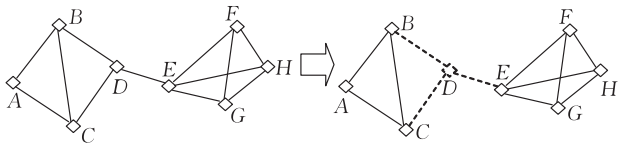


图 7 网络连通示意图

但是在 WSN 中,低功率无线射频通信由于信道噪声、多跳路由、环境变化、节点移位或者失效等因素常常表现出高度不确定性和不稳定性,导致有效通信半径的时空波动(temporal-spatial variation).简言之,链路拓扑结构及其质量变化频繁是导致数据传输失败、网络连通被破坏的最大原因.

2.2.1 链路质量分析及链路估计精度

随着 WSN 规模及应用领域的扩大,近年来对

链路质量变化特性的统计研究日臻完善. 文献[25]通过详尽的实验数据指出无线链路质量主要受多通道效应、人类活动、接收机灵敏度、发送机特性、节点方向性、来自其它节点的干扰以及背景噪声(比如温度、湿度等等)所影响并决定,主要呈现出时空波动不可靠特性和不对称性.

时空波动是指链路质量随时间和空间变化的特点,例如单个节点能听到的邻居节点数以及能够覆盖的通信范围会随着节点间的相对位置和时间发生明显变化. 图 8(a)^[26]记录了一对节点在不同空间距离间链路质量变化,其中链路质量以收包率(packet reception rate)表征. 很明显,链路质量与理论上计算得出的指数衰减形式区别,且并非随距离增大而单调递减. 时空波动是指链路质量随时间和空间变化的特点,例如单个节点能听到的邻居节点数以及能够覆盖的通信范围会由于节点间相对位置和时间发生明显变化. 图 8(a)^[26]记录了一对节点在不同空间距离间链路质量变化,其中链路质量以收包率(packet reception rate)表征. 很明显,链路质量与理论上计算得出的指数衰减形式有别,且并非随距离增大而单调递减. 针对无线链路的实际特性,研究人员将通信范围内的点划分至三类区间:有效

区(effective region)、过渡区(transitional region)和空白区(clear region). 有效区内链路质量较好且稳定;过渡区内链路质量呈现出 irregular 特性,与距离相关性弱. 在典型的 WSN 中,大量(甚至超过 50%)链路可能因为过渡区的存在而变得不可靠;空白区几乎收不到包,链路质量极差. 图 8(b)^[27]记录了一对节点分别在距离 2.5m 和 8.3m 时链路质量的时变曲线,其中链路质量由接收信号强度指示值(RSSI)表征. 该实验表明,即使在距离不变的情况下,链路质量仍会产生 20%~60%的波动. 文献[28]在对大规模高密度的 WSN 研究中,通过大量实验数据表明,即使一个最简单的泛洪算法在存在不可靠链路的情况下也会引起很多复杂后果.

无线链路另一个突出特点是不对称性,定义为一对节点之间的正向链路和反向链路的收包率差异值. 表 1^[25]是一个典型的针对不对称链路质量的测试结果. 在正向“好”链路中,约有 12%反向链路不再是“好”的链路,3%甚至为“差”链路. 而“差”的链路中又存在 6%的“好”链路. 在现有的仿真平台比如 NS2 上,一般都是假设前向和逆向链路是同等质量的,但这种假设存在巨大风险. 如图 9.

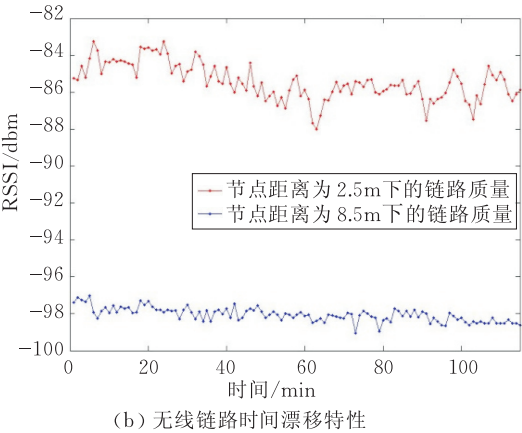
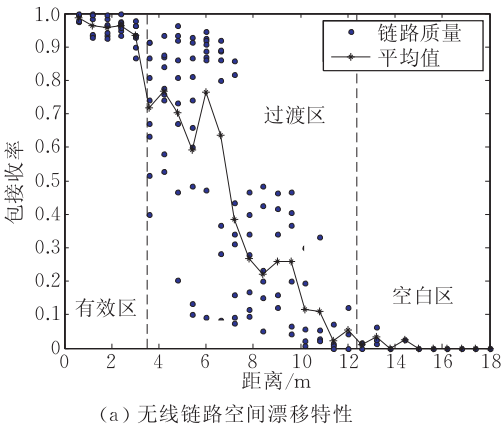


图 8

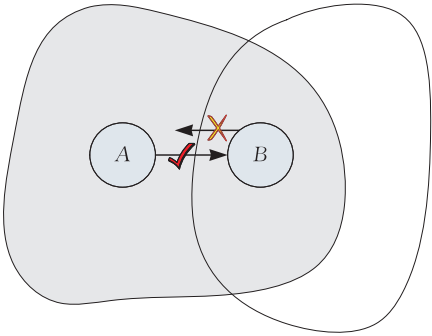


图 9 链路不对称性的通信缺陷

表 1 链路不对称性的研究结果

	链路质量/%		
	好	中	差
好	88	27	6
中	9	49	15
差	3	24	79

因此在现实应用中,电磁波辐射模式不甚规则,呈现出以一定概率分布的各向异性的不规则形式,参见图 10(b). 然而早期链路质量模型——布尔通信模型各向稳定:若两节点间的距离在一定阈值范

围内,则它们是互相连接的;若超过该阈值,则它们之间不连接.如图 10(a)所示.由此可见,我们需要改善现有过于简化的链路模型,为上层路由协议和算法的实现提供更准确的链路质量估计结果.

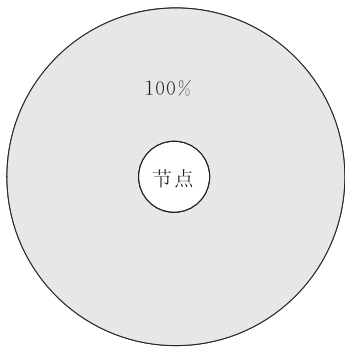
国外近期研究提出了基于实验数据的通信模型,并分析如何得到性能更好的上层协议以及相应的评价标准.文献[29]提出一个合成链路模型用于生成在某特定的无线链路和环境下的仿真数据,并将生成的轨迹用于链路估计器的设计从而监听信道吞吐量和估计链路质量.文献[30]等采用非参数统计方法研究相对位置和通信特性的关系,用概率密度函数刻画并产生一系列无线链路模型模拟任意规模的网络.另有学者研究如何能够有效地衡量链路无效性,且证明只需要一少部分测量值就可以得到较为精确的估计值.文献[31]等采用支持向量机等降维方法来描述网络的拓扑结构,确认网络内可能的瓶颈区.研究者通过 Mica2 平台上得到的实际数据建立一个无线不规则模型(RIM).无线不规则模型同时考虑了传输媒介的非同向性和设备的非一致性.通过采用这种模型,在存在无线不规则的情况下

改善传输性能.

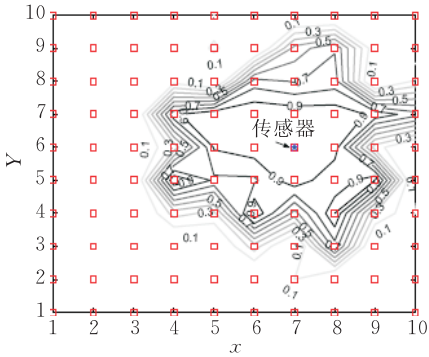
我们在 Mica2 节点平台上进行了大量实验,定量分析了无线链路的各种非理想特性,包括时空特性、不规则连接单元和链路不对称性等;通过解析和实验分析相结合的方法对信道和链路质量进行建模并理解上层协议的真实性能^[32].

2.2.2 信道差错控制精度及传输时延

为了更明确地认知并改善无线链路的可靠性和稳定性,目前学术界一般采用两种对策.第一种方法如上节所述,通过搭建大规模无线传感网络实验平台采集并统计多次数据来构建无线链路质量的地图,构建出来的地图具有方向性且呈现出不规则分布特性,如图 10(b)所示.很明显,该图反映实际链路特性,与布尔通信模型区别较大,可以为上层路由保持连通提供更为坚实的保障,缺点是这类地图构建对节点规模和环境有很高的要求且缺乏普适性,只能针对特定的环境;因为当环境信息(温度、湿度、节点离地距离、天线方向等等)变化或重组后,链路质量又会发生明显变动.



(a) 布尔通信模型



(b) 实际不规则连接模型

图 10

第二种方法一般是从探究引起低功率无线信道不稳定、不可靠的本质原因入手,开始通过加入信道衰减、多径衰落和阴影等的影响考察链路质量从而改善布尔模型,继而提出满足某些 QoS 的信道编码(channel coding)策略,比如利用差错控制编码来提高信道传输的有效性和精度.近来,部分学者为了更进一步提高数据精度,在考虑信道编码的同时结合了现有的源编码(source coding)机制,这种联合编码(joint coding)或者多描述编码(multiple description coding)机制可以降低数据在感知和传输中丢失和出错的概率并系统优化这两个联系紧密的编码过程的资源分配,提高能量和带宽的利用率,同时保证能量有效性和数据精度两大关键 QoS. 由于这类方法从本质上维护和保障了信息质量,而这在 WSN

这类以数据为中心的网络中是最为关键的,因此这种方法在最近几年普遍受到关注.

近年来,对于信道以及其它因素为之带来的影响的研究越来越全面深入,具体可参考文献[33]. 有关联合编码的研究进展将在下一小节检测中详述,这里将主要阐述更切合 WSN 未来方向的通信架构.

近十几年以来,随着通信和控制两大学科交融日益显著,在多数应用驱动的场所,比如基于 WSN 的频繁变化的动态系统是以目标追踪和截击为主要任务的,其状态的估计和对载体的协调控制两个环节,对时延均相当敏感.而数据型网络中的接收器可以无限期等待重传从而能够承受无限大的丢包率,如果将现有针对传统意义上的数据型网络的通信协议和物理层架构用于此类包含动态系统的控制任务

场合,系统的稳定性和性能将无法得到保证.因此,必须新的框架体系中研究在基于 WSN 的移动目标追踪中如何保证节点间数据可靠实时的传输.

一般来说,通信架构的提出在对稳定性等定性的讨论以外总是伴随着对有效传输速率的评价.有效传输速率可以理解成功接收数据包的个数占实际传输数据包的比例.文献[34-35]将控制的想法植入数据传输从而衍生出一种新型的通信框架.该框架的主要贡献在于引入跨层反馈(cross-layer feedback)从而完备了接收器和发送器不同的优化设计要旨.文章证明了如下 3 点:如果唯一的目标函数是最大化稳定频域范围,那么只要保证在任何链路质量下,无论是否存在跨层反馈,所有数据包关于接收器均条件独立;对于发送器来说,资源的合理分配是最为关键的;系统不稳定概率将随有效传输速率的下降而减小.同时,跨层反馈能够在优化估计器的基础上进一步优化控制性能,比如说信息损耗和传输损耗是两个必须平衡的参数,可以通过改变丢包率来对二者进行调节.

纠错一直是无线通信中的热点问题,文献[36]在此基础上提出了适用于控制场合的纠错编码.在控制理论中,一个变量所有可能的状态可以由一个无穷维状态图来归纳,且以多项式增长.因此为使控制器能够对状态作出估计并对其进行控制,就必须保证节点间的可靠通信,若信道存在噪声,那么纠错必须实时.作者由此提出了一种实时在线纠错码,使得在线估计和控制性能,即使在信道容量一定的约束和服从一定分布的信道噪声的干扰下,也能够达到渐近最优,同时将计算复杂度限制在一定范围内.该纠错码想法与香农编码理论较为类似,但是却能够运用在控制场合中.

文献[37-39]引入分布式时空编码概念,该编码实际上是多天线时空编码在无线 Ad hoc 网络的推广.在多天线通信系统中,空间的多样性是通过时空编码获得的.将这个想法推广到无线 Ad hoc 网络后,既不需要网络同步也不需要中继节点具有解码的功能,从而对传输速率的影响减到了最小.运用分布式时空编码方法之后,误检率和惩罚函数的数量级较一般多天线时空编码都有明显下降.

我们研究了衰减信道下的决策融合规则.信道衰减可能会使本地决策在传输过程中丢失或者出错,因此融合规则必须能够结合信道模型做出最优判决.于是我们主要对 Rayleigh 分布的信道模型下的多个融合算法作了理论和仿真比较.结果表明似然比融合算法性能最优,但因占用资源大、需求信息

多而不适合资源严重受限的 WSN.在这层考虑的基础上,我们提出了 3 种次优算法.它们的相同点是信息代价小,同时不同的信噪比范围下,各有优劣.综合可得,适用的融合规则应在性能、耗费资源量和复杂度之间获得折衷^[40].

如何在不可靠、不对称的无线链路的基础上保证并保持网络的连通性,是数据传输最重要的 QoS 考量.从本质上来说,无线链路质量的浮动和漂移受信道衰减、多径衰落和阴影等的影响而呈现出不规则的概率特性;从外部上看,无线链路质量主要受多通道效应、人类活动、接收机灵敏度、发送机特性、节点方向性、来自其它节点的干扰以及背景噪声(比如温度、湿度等等)所影响并决定.因此改善无线链路质量的两个方法分别是信道编码(或者联合编码)和构建地图.

2.3 分布式协作处理

在无线传感网络中,单个节点的能力和资源是有限的,根本无法支持过于庞大和复杂的算法,需要通过多个节点的协作来改善或者克服;而分布式协作这一处理方式本身即集中体现了 WSN 以小搏大的优势.检测和定位是面向移动目标追踪的场合中最重要的中间件算法,它们均需通过节点的分布式协作来完成.

2.3.1 分布式检测

分布式检测的研究始于 20 世纪 60 年代,以 Radner 等考虑的团队决策问题^[41]为代表.分布式检测是指一组传感器节点通过协作处理区分两个或多个假设检验问题.最典型的假设检验包括二元检验,例如目标是否存在.

典型的分布式检测模型由多个传感器节点和融合中心组成,如图 11 所示^[41].本地传感器节点将收集到的信息或者由其得到的本地决策发送至融合中心,融合中心依据一定的融合规则做最终的决策.文献[42]讨论了带融合中心的并行拓扑结构的分布式检测问题,采用的决策规则是 Neyman-Pearson 准则和贝叶斯公式,当传感器观测值,即图 11 中的 X_1, X_2, \dots, X_N 条件独立时,似然比检验的最优门限值即可确定.其中, N 表示传感器节点个数; X_i 表示第 i 个传感器节点的观测值; $\gamma(\cdot)$ 表示融合规则.

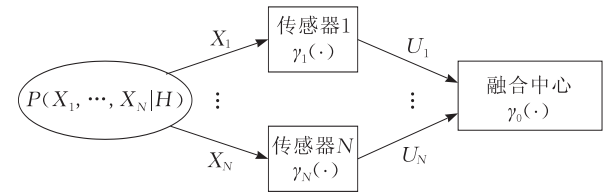


图 11 典型的分布式检测系统

第 i 个节点得到观测值 X_i 之后,可以选择传送原始模拟值或者几位数字信息.传统的有线网络因其近乎无限的带宽,能够直接传送并且处理模拟数据继而为后续的数值分析提供精度保证.然而在 WSN 内,传感器节点和融合中心之间的信道带宽是有限的,若传输的位数过多,容易导致能耗增大,带宽利用率过高最终导致信道拥塞.因此,在 WSN 中考虑分布式检测问题的本质,就是如何针对能量、带宽有效地提高检测率,或者降低误检率.

具体到算法实践中,即要求本地传感器节点将观测值量化或者压缩成一位或者几位数字信息,该压缩数据或者本地决策信息被传送至融合中心进行处理.因此,WSN 分布式检测的 QoS 指标一般是检测率和能量消耗指标,其中后者常常作为惩罚函数或者约束函数项隐性出现在前者的优化问题中.本文仅对两类情况下的检测精度进行论述.

2.3.1.1 基于完美信道的检测精度

一直以来,传感单元和无线单元是在独立的 QoS 指标下完成设计的.传感单元的 QoS 指标主要包括采样精度和频率、测量准确度、感知距离和感知功耗;无线单元的 QoS 指标涵盖了信道速度、编码和射频功耗.传感单元的测量精确度除了物理平台设计以外取决于系统设定的信源编码(source coding)是否有效,信源编码的目标是在完全理想的信道或者在一些实际信道参数(例如信道分辨率和编码复杂度有界,但是时延可以无界)的约束下,对源数据进行某种编码处理使得接收器能够最大程度、最高保真地重构传输前的源数据.无线单元则主要研究信道编码(channel coding)算法对信道容量的估计是否精确以及对传输数据的压缩是否在可行范围之内.对于信道完全不同的假设使得在学术界以及工程界,传感和无线单元一直是独立的设计项目.

因此,最初分布式检测的问题并不考虑信道的相关不规则不稳定特性,即假设节点和融合中心之间的信道是误码率为 0 的完美信道.在该假设下,每个节点的决策信息 U_1, U_2, \dots, U_N 可以准确无误地发送到融合中心.显然,这时需要解决的问题是:

(1) 节点本身的数据压缩算法;(2) 融合中心决策规

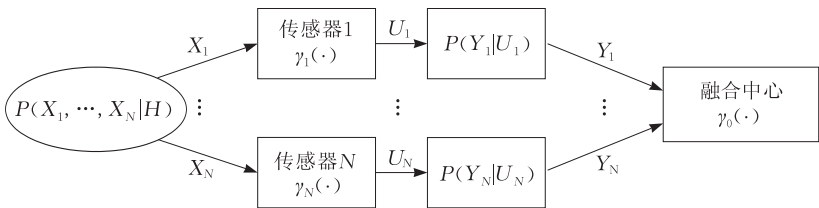
则.这两个问题互为前提,交织紧密,一般的处理方法主要是将其中一个算法固定,在该算法的基础上挑选出最优或者次优的另一个算法,也有同时考虑两个算法设计的相关工作,但是因算法复杂度的限制未能提出可执行的显式解.

文献[43-44]讨论了 WSN 资源约束下的分布式检测问题.文献[43]在两种期望成本传感器节点和融合中心之间的数据传输和传感器节点的测量的约束下考虑分布式检测问题,选择测量节点和何时传输数据来达到最好的性能.文献[45]假定每一时刻 WSN 最多可以传输 R 个比特,传感器节点和融合中心之间的信道是可靠的,讨论观测噪声是高斯和指数分布的情况,当观测区间(observation interval)趋于无穷时, R 个有相同决策策略的传感器各自传输 1 比特信息是最优的,当观测值信息不是独立的,那么上述情况可能不是最优的,最优的情况是较少的传感器发送多个比特,并且传感器节点的决策规则是不同的.文献[46]考虑 WSN 受总的能量约束的情况,并且传送信息的信道是受噪声污染的.当总的能量约束趋于无穷时,在渐进模式下能够找到相同判决规则的传感器节点,使得融合中心误差概率最小.文献[44]主要考虑了节点和融合中心之间无信道带宽约束的 WSN 分布式检测问题,并假设无线信道是可靠的.文章严格的限制了每个节点发送的信息量,即每次只发送一个比特的信息到融合中心,该分布式检测方法得到的检测误差概率衰减指数是以噪声的值域(有界噪声)或信噪比(无界噪声)作为下界,即随着时间的推移,误差会趋向于零.

2.3.1.2 基于实际不规则信道的检测精度

近十几年来 WSN 研究的开展给分布式检测注入了极大的活力,虽然分布式数据压缩问题仍是分布式检测所考虑的主要问题之一,但在系统设计和建立信号处理算法时,还考虑到不可靠的无线链路对分布式检测精度带来的影响.换言之,这类问题通常将信道状态信息(Channel State Information, CSI)结合到信号处理算法的设计过程中^[47],所以也称为联合编码或多项描述编码.

如图 12 所示,典型的分布式检测系统中加入了



表征信道层特性的概率分布函数 $p(Y_i|U_i), i=1, 2, \dots, N$. 无线传输信道的状态信息不同, 传输方案和融合中心的决策规则也会不一样. 按照系统对信道的辨识程度, 信道状态分 3 种情形: (1) 信道状态的信息完全已知; (2) 信道状态的信息部分已知; (3) 信道状态的信息完全未知.

文献[48]中假定当信道状态信息完全已知(用 h 来表示), 那么分布式检测的设计可归纳为 $\min_{\gamma_0(\cdot), \dots, \gamma_K(\cdot)} p_{e0}(\gamma_0, \dots, \gamma_K; h)$, 其中 $p_{e0}(\gamma_0, \dots, \gamma_K; h)$ 是在给定信道衰减统计信息 h 和决策规则 $\gamma_k(\cdot)$ ($k=1, 2, \dots, N$) 的条件下的误检率. 若进一步假设点观测值条件独立且信道独立, 该问题可由 Person-by-Person 最优(PBPO)方法求解, 即在其余节点和融合中心的决策规则给定的情况下来优化第 n 个传感器节点的决策规则 γ_N . 虽然两条假设在工程界争议很大, 尤其是观测值条件独立这一条可以说极端理想化且不可获得, 但是该优化方法仍然具有十分重要的理论意义: 给出了理论上可以达到的最佳检测结果, 可作为基准值与其它检测方法进行比较, 从而判定其它算法的优劣. 文献[49]给出了信道状态信息部分已知时的情况. 假设已知静态信道衰落的统计特性, 并且认为该特性在一段时间内保持不变, 那么融合中心设计传感器决策规则的合理准则是平均误差概率最小, 分布式检测系统的设计可以转化为 $\min_{\gamma_0(\cdot), \dots, \gamma_K(\cdot)} \int_h p_{e0}(\gamma_0, \dots, \gamma_K; h) p(h) dh$. 积分是一个关于 $\gamma_1, \dots, \gamma_N$ 的高度非线性函数, 无法得到闭合表达式, 要想得到最优解只能通过全局的搜索方法; 显然当节点个数增多或是做多元问题假设时, 计算非常复杂. 在信道状态部分已知的情况下分布式检测问题是一个 NP 难问题, 那么若信道状态信息完全未知, 又该如何设计系统, 其算法复杂度又会多大呢? 文献[50]受多描述编码原理的启发, 提出一种鲁棒分布式量化方案. 如图 13 所示, 2 个编码器和 3 个解码器执行传输两项任务, 如果其中一个任务失败了, 另一项任务仍然可以保证达到所需的性能指标; 若两项任务都能成功传输, 那么中位解码器 Decoder 0 可以达到更好的检测性能.

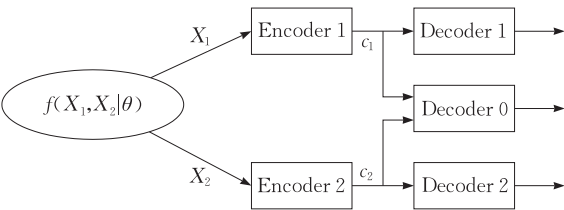


图 13 分布式多项描述编码

2.3.1.3 传感器节点数量与检测精度的关系

在分布式检测中, 随着传感器节点个数 N 的增加, 检测最小错误的概率会呈指数衰减. WSN 的分布式检测的问题中, 文献[44]考虑信道带宽受限制的分布式检测问题, 分别讨论了传感器观测噪声的范围有限和没有限制时最小错误概率与传感器节点个数的关系, 结果表明当传感器噪声的范围受限制时检测错误概率的理论上限是 $\exp(-(Nd^2)/(2U^2))$, 其中 N 表示节点个数, d 表示待观测的确定性信号, U 表示传感器噪声的范围. 当传感器噪声的范围不受限制时检测错误概率的理论上限是 $\exp(-NR(N))$, 其中 $R(N) \geq 1/2\ln(1+r^2/(2r+1))$, $r=d^2/\sigma^2$, σ^2 是传感器噪声有限方差的界. 仿真研究表明当 $d=1$ 时, 传感器噪声范围受限制时检测错误概率随着传感器的个数增加而呈指数递减, 如图 14^[44] 所示. 文章出于理论分析的需要, 并没有讨论节点个数小于 20 时的情况, 但是在实际测试部署时, 少于 20 个节点的协作检测仍是较为普遍的.

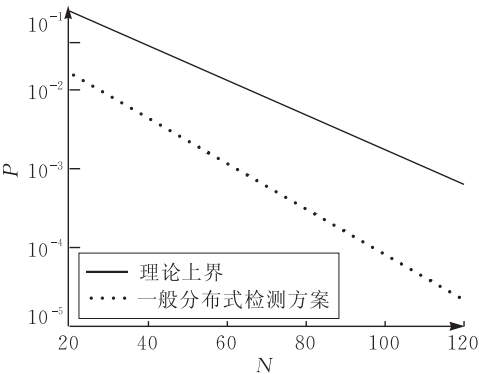


图 14 传感器噪声受限制时检测错误概率(P)与节点个数(N)之间的近似关系

2.3.2 分布式定位

定位技术(包括节点自定位与目标定位服务)是 WSN 的关键支撑技术之一, 也是无线网络其它相关技术研究的基础, 贯穿了整个 WSN 技术研究. 一般来说, 精度、能耗和安全是 WSN 定位中需要考虑的主要因素. 其中安全定位问题起步较晚, 直到最近几年才有这方面的研究. 当节点部署在无人或者非友好的环境中, 节点的密钥信息以及节点间的通信内容可能被地方窃取, 通过窃听节点间的信息并在网络中加入虚假信息, 敌方节点就能够轻易地干扰节点的定位, 形成攻击.

在安全定位方面, 针对基于测距的定位技术, 我们依据虫洞攻击的特点考虑了基于虫洞攻击的一贯性攻击, 利用无线多跳网络时空特性与测距数据一

致性性质的攻击检测方法,给出此方法的成功检测攻击概率的理论值.仿真表明,我们所提出的检测方法的性能在各种网络参数下均优于已有的方法^[51].

针对目标定位精度的工作分为两类:基于目标方位^[52-53]及基于目标的信号能量模型的定位^[54-55].

2.3.2.1 基于目标方位的定位精度

近来由于集成电路技术方面的迅猛发展,微型传感器节点在稀缺的资源限制下已经能够构建较为复杂的信号处理算法并具备了较好的无线通信能力.在 WSN 目标定位中,基于声信号的声源定位被广泛使用.人员、车辆和震荡的物体都能发出声波;当声波的最高频率部分和最低频率的比值很大的时候被称作宽带信号,如声波的频率范围在 30Hz~15KHz,但大多数传播的射频信号是窄带信号,通常最高频率和最低频率的比值接近于 1^[44].窄带信号有事先定义的波长,它的时延可以由简单的相移来补偿;宽带信号没有典型的波长,时延可通过对波形的插值得到.WSN 中基于声源定位的一些方法如到达角估计、波束形成、递归极大似然估计声源定位、闭环最小二乘声源定位等^[52].文献[56]考虑用可移动观测器检测得到的一系列方位测量值估计固定目标的方位,用最优化观测器的运动轨迹来提高目标定位的精度,即在观测器运动轨迹加于状态的约束下,最大化 fisher 信息矩阵的行列式.文献[57]提出 4 种在声 WSN 中用于移动目标定位的到达角极大似然估计方法,每个传感器阵列传送一个到达角估计给中心处理器进行最终的估计.文献[53]提出使用盲波束形成技术来进行定位,利用最小二乘方法来估计时间延时,但用这种方法需要 WSN 中的节点能较准确地同步,否则达不到较好的精度要求.

2.3.2.2 基于信号能量模型的定位精度

在大密度的 WSN 中,可以将信号强度测量用于目标定位当中,这样就不需要传感器额外的功能和测量特征.这种观测模型可以表示为^[54-55]

$$y_i(t) = \alpha_i \frac{s(t-t_i)}{|\mathbf{d}(t-t_i) - \mathbf{d}_i|^m} + \omega_i(t) \quad (1)$$

其中 $y_i(t)$ 表示第 i 个传感器节点在 t 时刻的实际观测值; t_i 表示声信号从目标到第 i 个传感器节点的时间延迟; $s(t)$ 是声源目标传发的能量值标量; $\mathbf{d}(t)$ 是在 t 时刻目标的坐标向量; \mathbf{d}_i 是第 i 个传感器节点的坐标向量; $m(\approx 2)$ 是能量衰减因子; $\omega_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个传感器节点的观测噪声.

文献[54]提出了一种基于声源能量测量的定位算法,它采用了声源能量跟节点与目标之间距离的

平方成反比的模型,通过参与工作的传感器节点的目标能量测量值之间的比较,用多个超球面的交集得到声源的位置.文献[58]提出一种极大似然声源位置估计方法,并分析了声源位置估计的 Cramer-Rao 下限,这种方法利用了传感器节点得到的声信号能量测量值,能较好地对多声源位置进行估计.

由于 WSN 受自身资源的限制,将传感器节点的模拟量测量值直接发送至融合中心将占用系统很大的资源,所以传感器节点需要将它观测值量化单个比特或者多个比特后发送至融合中心来节省资源^[55,59].文献[59]考虑了信道带宽的约束,传感器节点将观测到的声源能量信号量化成多个比特信息后发送至融合中心,融合中心基于这些量化数据设计极大似然估计器,并分析其 Cramer-Rao 下限.仿真研究表明该方法比启发式的加权平均算法得到的跟踪精度更高.文献[55]利用接近测量(proximity measurements)来表示两装置是否在通信范围内,它可以消除衰减信道对接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的影响,它实际上是 RSS 的单比特量化.该文献利用 Cramer-Rao 下限来比较用 RSS 和接近测量分别得到的传感器位置无偏估计器的最小方差,结果说明了需要多少个比特的量化器才能达到未量化时 RSS 系统的性能.

然而在多数室内定位场合,接收信号强度指示值(RSSI)受室内环境变化的影响非常大,其中对光线、温度和人为活动尤为敏感.现有的方法主要通过部署采样点并构建地图来匹配位置信息,但是在被控环境中离线采集信号的工作量还是很大的,同时在线采集到的信号和离线采集到的并不一定吻合.

基于以上的考虑,我们提出一种不需要建立信号地图的方法.每一个信标节点会周期性地交换彼此的信息,并且储存最近数次收到的信息.位置未知的节点会要求定位服务并等待来自信标节点的信息.之后该节点将之与 RSSI 表格进行比对来产生信号距离信息.实验数据表明我们的方法在有间隔的情况下可以达到 90% 的精度.该方法的问题是数据交换阶段的丢包率相当高,而这就会使得 RSSI 表格不够完整,改进的方向就是通过 MAC 调度算法来减少数据包的冲突^[60].

2.3.2.3 定位精度与传感器节点数目之间的关系

WSN 目标定位的很重要的 QoS 指标是定位精度,它与传感器节点个数有关,参与工作的节点个数越多,那么得到的目标定位误差就越小.在移动目标跟踪中,需要进行节点选择使得节点能尽可能地在目标周围工作,如果参与工作的节点距离目标太远,

在距离和信道干扰等各种因素影响下得到错误地数据的概率会大大增加,这对定位精度的影响很大,定位与节点选择是密切相关的,定位是节点选择的前提,而节点选择又影响定位精度.文献[59]在带宽受限的情况下设计基于信号强度模型的极大似然目标定位估计器.仿真研究表明,随着传感器节点数目 N 的增加,极大似然估计器的性能得到极大提升,并很快收敛到 CRLB,如图 15 所示.

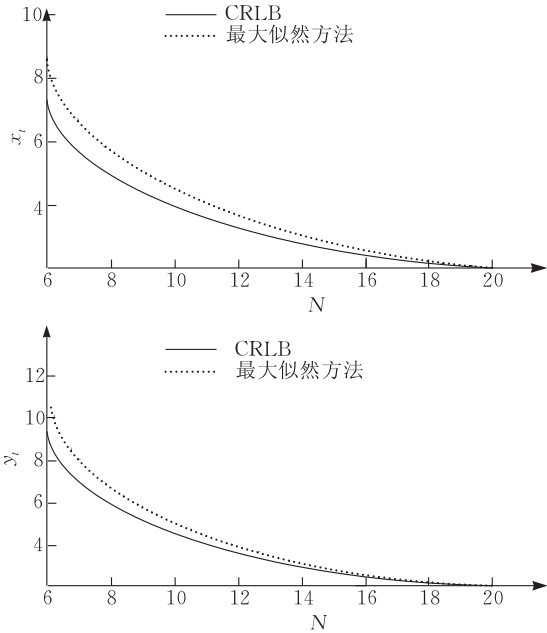


图 15 目标定位的精度(x_t, y_t)与节点个数之间的关系

2.4 节点选择与任务分配

在目标移动过程中,任意时刻只有小部分节点能够采集到信噪比、可信度较高的信息从而参与目标检测等处理任务,大部分节点不能提供关于目标的有效信息;同时检测到目标的节点提供的信息也可能存在冗余现象. WSN 可以通过多个传感器节点协同处理得到比单个节点更好的跟踪性能,例如上一节提到的基于概率模型的分布式检测算法通过多节点协作大幅度提升目标检测率的场合. 如果传感器节点观测得到的信息足够可靠,那么参与的节点数越多,得到的目标跟踪精度也越精确;但是传感器节点能量受限,参与工作的节点越多,单个节点的工作频率和强度越大,网络寿命下降越快. 因此,从这个意义上来说,网络生存时间和目标跟踪误差之间是存在矛盾的,而这对矛盾在这类节点选择策略上体现得尤为突出. 如何在同时考虑两项 QoS 的情况下动态且优化地选择合适的工作节点以达到两者性能的某种平衡,是节点选择问题最初的研究动机.

预测算法是节点选择策略中不可缺少的一部分. 预测算法根据目标的历史估计信息预测下一时

刻位置,并在目标达到之前,提前把追踪任务及时移交给新唤醒节点,大大减小了目标丢失的可能性,提高了追踪的实时性. 预测算法与节点选择是相辅相成的. 考虑到网络寿命和带宽有限,通常情况下,大部分节点需要处于休眠状态. 但如果没有轨迹预测,节点就要始终保持工作状态,时刻准备着检测目标的存在;而预测算法能够预测目标下一时刻位置,提前激活节点来追踪目标,不仅使网络在任何时刻可以只有一部分节点工作成为可能,同时为节点选择提供了依据. 不少学者进行了相关研究,提出了针对不同动态模型的轨迹预测算法,包括基于匀速模型的线性预测和卡尔曼滤波方法、基于动态模型的扩展卡尔曼滤波和粒子滤波方法等.

文献[61]中,作者明确地将轨迹预测作为追踪策略的一部分提出,采用了 3 种不同的预测方法:基于信息素(Pheromone)、基于贝叶斯网络(Bayesian net)和基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的方法. 文献[62-66]中假定目标在较短时间间隔内动态特性不变,即认为目标运动速度和方向是恒定不变的,采用最简单的线性预测方法预测目标下一时刻位置. 文献[67-68]中考虑了带有噪声的目标运动动态模型,采用扩展卡尔曼滤波方法预测目标下一位置,然而系统模型仍然是线性的,噪声符合高斯分布,属于传统的预测方法. 文献[69]则更进一步,提出了利用粒子滤波处理非线性的非高斯分布的动态系统模型.

预测算法的计算复杂度和预测精度直接影响着节点选择的可实现性和合理性. 线性预测方法的计算复杂度低,算法效率高,在存储空间上,仅仅需要存储当前时刻和前一时刻的目标估计位置. 因此,线性预测算法非常适合应用在计算能力和存储空间有限的 WSN;但是,线性预测算法假设目标在短时间内是匀速运动的,这种模型的不精确性,容易造成预测误差较大,节点激活不合理,甚至丢失目标. 因此,线性预测算法适合应用于目标运动速度较慢、网络采样率较高的 WSN. 而对于涉及到矩阵逆运算扩展卡尔曼滤波和粒子滤波等预测算法,复杂度较高,所需存储的目标轨迹历史数据也较多,普通的传感器节点(如普遍采用的 Mica2、MicaZ、Iris 等节点)根本不能满足算法要求,但随着微电子系统技术的不断发展,这些算法将广泛应用于 WSN.

关于基于预测的节点选择机制的研究已经较为深入和全面,但是基本上是按照不同的网络架构而采取不同的节点选择策略. 分层网络中,当前工作簇的簇头节点 CH1 在估计出目标此刻位置信息的同

时对未来时刻目标可能出现的位置做出预测,并依据预测结果通知下一个工作簇的簇头节点 CH2. CH2 依据该预测信息对是否唤醒节点、唤醒哪些节点按照一定 QoS 要求作出节点选择决策;而同构网络中,由于每个节点能力相同,没有能力突出的簇头节点进行相对精度更高的网内信息处理和快捷通信,这一点为同构网络节点选择带来了难度.为了应

对这个问题,许多研究人员将分层网络的想法植入同构网络,引出动态组管理概念,即检测到目标位置信息的多个节点间推举出该时刻的领导节点,由该领导节点估计目标当前位置和预测目标下一时刻出现位置,并依据该预测而选择、唤醒下一组工作节点,如图 16 所示.

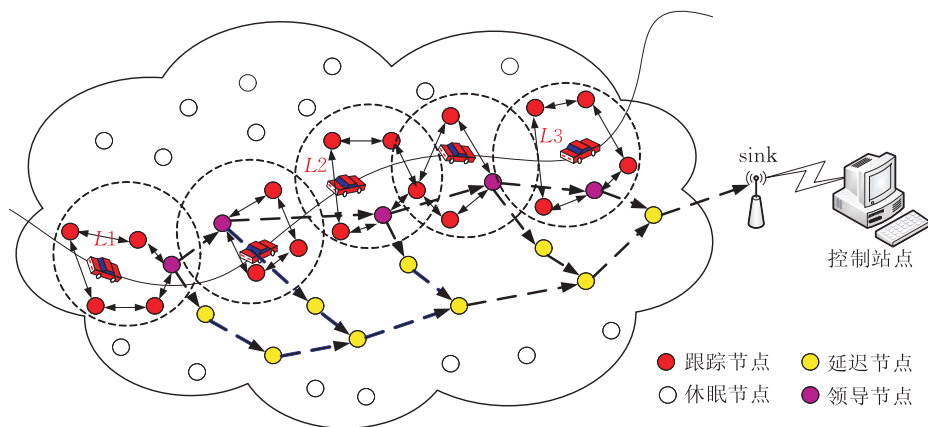


图 16 基于动态簇管理的同构网络节点选择示意图

文献[70]中将节点选择机制综合为 4 类:面向覆盖,面向目标定位和追踪,面向单任务分配和面向多任务分配.这 4 类节点选择机制所面向的对象、目标以及所受的限制都是不同的,本文主要对各种节点选择机制分别在能量有效性和信息效用性两大 QoS 指标下进行权衡.

2.4.1 能量有效性

能量有效贯穿于整个移动目标追踪过程,不仅是局部优化目标,也是整体优化目标.在节点选择机制里,能量有效性就是在满足一定的追踪精度下尽可能少地选择节点,在任意时刻只有小部分节点或者一个节点工作,大部分节点休眠,从而节省能量,延长网络寿命.

文献[71]提出了基于信息效用和能量消耗的节点选择策略.作者通过信息效用和能量消耗组成的目标函数的最优化,选取一个节点作为领导节点,负责选取唤醒其他节点并估计目标当前状态.领导节点在节点观测信息未知和无需数据通信的条件下,依靠节点位置和检测模型选取使目标置信状态得到最大改进的节点参与目标追踪.在任意时刻,网络只有一部分节点工作,形成了动态组管理的机制.这种机制一方面大大减少了通信能耗,另一方面节点的有效选取也大大延长了网络寿命.但同时,由于缺乏对节点观测信息的了解,可能造成节点选取的不合理,甚至目标丢失.

文献[72]提出了一种基于熵的节点选择启发式算法用于目标追踪.给定目标位置估计的先验概率分布和候选传感器的位置和感应模型,算法迭代地选择能够最大地减小目标位置估计不确定性的节点,直到达到指定的熵为止.这种启发式算法每次在达到指定熵时,只选取必需的节点,不会多选取冗余的节点,能够有效地节约能量,同时追踪精度也得到了保障.但这种启发式算法需要知道每个传感器的测量值才能决定选择哪个节点.

文献[63]提出了基于簇的分布式预测追踪策略(Distributed Predictive Tracking, DPT).当前簇领导预测目标下一时刻位置,并选取预测位置附近最近的 3 个节点用于追踪目标.这种策略在每个时刻只有 1 个簇领导和 3 个节点处于工作状态,冗余性小,信息利用率高,有效地减少了能耗.但由于预测模型的不精确性,预测误差会越来越大,造成了节点选择不合理,进而导致目标丢失.

文献[65]提出了基于预测的能量节省方案(Prediction-based Energy Saving scheme, PES).作者提出了 3 种启发式节点选择方法:基于目的地、基于路径和基于邻居的启发式算法.基于目的地是指只选取预测位置附近一个节点追踪目标;基于路径是指选取当前目标估计位置和预测位置之间轨迹上节点,这两种选择有效的节省了能量,但由于预测误差的存在,容易丢失目标;基于邻居是指选择轨迹附

近节点共同追踪目标,虽然能量有效性稍差,但对预测模型的鲁棒性较高,不会轻易丢失目标。

2.4.2 信息效用性

在选择节点时,不能盲目地尽量少地选择节点,节约能量,也不能尽量多地选择节点,提供无用或者冗余的信息,因此,要考虑信息的效用性。Zhao 等人在文献[71]中考虑了两种可能的信息效用性的定义:基于熵的定义和基于距离测量的定义。基于熵的定义数学表达精确,但难以实现;基于距离测量就是指量测传感器和目标之间的距离的效用性,得到了大家的广泛关注。

文献[72]就是典型的基于熵的节点选择机制。作者认为每个传感器有着自己的观测能力和感应不确定性,不同的传感器能够提供不同的信息量。因此,给定目标位置估计的先验概率分布,一个传感器的观测可能会比另一个传感器更大地减少目标位置的不确定性。基于熵的节点选择方法在数学上是精确的,能够精确地选择节点,但在实际应用中却很难实现。

文献[73]则采用了基于距离的信息效用性定义。作者探讨了 WSN 中基于图像的目标追踪问题。在任意时刻,网络中存在一个处理节点,处理节点根据能量限制和节点集的信息增益,从节点集中选择一个新的处理节点,新的处理节点必须比当前节点更加接近于目标。文献[74]也是采用了基于距离测量的信息效用性定义。在目标移动过程中,当前簇领导只唤醒目标附近的节点,估计目标当前位置及预测目标下一时刻所在位置,并将追踪任务及时移交给距离预测位置最近的部分节点。

3 追踪策略及其 QoS 框架

本节首先概述国内外现有经典追踪策略,在此基础上提出我们对面向移动目标追踪的 QoS 体系跨层分析与设计思想,最后我们以本研究组的追踪平台和实验结果说明跨层设计的必要性及指导意义。

3.1 现有国内外追踪策略及实现

近年来,随着对 WSN 中移动目标追踪问题研究的不断深入,许多优秀的移动目标追踪策略被设计和提出。最具代表性的有基于预测的自组织实体追踪策略^[61]和信息驱动传感器查询策略(Information-Driven Sensor Query, IDSQ)^[71]。基于预测的自组织移动目标追踪策略,其作者提出了一种分布式实体追踪框架,将目标追踪问题划分为连续相关

的多个子问题,包括目标检测、目标分类、数据联合、实体鉴定、追踪预测等。在这个框架下,网络基于传感器数据,动态的选取节点组成一个簇,簇内节点本地估计目标追踪的各个属性参数,本地参数联合进而形成簇间目标追踪,从而形成一个自组织的移动目标追踪策略。作者通过分布式计算容错算法估计了关于目标的属性参数,包括位置、运动方向和检测时间等,进而提出了 3 种预测算法(基于信息素、基于扩展卡尔曼滤波和基于贝叶斯网络)预测目标轨迹,用于选择合适的节点检测目标。作者提出的面向移动目标追踪问题的分布式实体追踪框架,有利于从整体和局部对移动目标追踪问题进行全面分析,从而为设计优秀的追踪策略提供了前提和依据。

信息驱动传感器查询策略中,随着目标的移动,网络动态的选取节点组成动态簇,估计目标置信状态和回复用户查询信息。作者将分布式追踪问题数学表达为贝叶斯序列估计问题,得到综合信息效用和能量消耗的目标函数,通过目标函数的最优化,选取一个节点作为领导节点,领导节点作为簇领导进而决定哪些节点被激活以获取目标当前最佳置信状态。作者不仅强调利用节点间的协作实现目标的追踪,同时强调用户如何查询目标信息,从两个角度对目标追踪问题进行了详细的分析。

对于本文从信息流角度分析目标追踪问题提出的 4 个组成部分,文献[61,71]主要考虑了目标追踪中的节点选择、协作处理,对于节点部署和数据传输没有从理论角度进行详细的分析,而是定性地认为网络规模大,节点随机部署,密度高,通信链路好,可靠性高,满足目标检测和通信的需求,虽然如此,作者从体系框架和信息驱动两个角度阐述了移动目标追踪问题,极大地启发了随后的研究者。

随着对移动目标追踪问题的不断深入研究,越来越多的追踪策略被设计和提出,学者们以网络寿命、追踪精度和实时性中的一个或者多个指标权衡分析设计追踪策略。文献[62]探讨了在移动目标追踪问题中,不同节点选择策略下的能量消耗和追踪精度,仿真结果表明基于线性预测的选择性节点激活策略在两者之间实现了很好的协调。文献[63]设计了用于移动目标追踪的分布式可预测追踪协议(Distributed Predictive Tracking, DPT)。基于簇管理的方法保证了协议的可扩展性,基于预测的追踪机制保证了分布式网络的能量有效性,仿真结果表明,不管目标是怎样的随机移动模式,DPT 协议都能够准确的追踪到移动目标。文献[75]考虑了网络

中带宽有限和能量有限,设计了一种基于移动智能体(mobile agent)的新颖的追踪协议.一旦一个新的目标被检测到,网络便会产生一个新的智能体用于追踪目标.智能体可以邀请附近的节点共同地追踪目标,结果表明,这个协议极大地减少了通信和感应能耗.文献[64]研究了移动目标追踪应用中的能量管理问题,提出了基于预测的能量节省方案 PES,仿真结果表明 PES 可以在不同的条件下有效地节省能量.文献[76]提出了最小轮廓追踪算法(Minimal Contour Tracking Algorithm, MCTA).MCTA 基于目标运动模型获取最小追踪区域,进而只激活最小追踪节点来有效地节省能耗和追踪目标,仿真表明,MCTA 在一定的理想条件下,大大地节省了能耗.文献[69]提出了基于预测的动态能量管理策略.粒子滤波器解决目标状态预测的非线性问题,分布式遗传算法和模拟退火算法最优化通信能量消耗,实验结果验证了基于预测的动态能量管理策略的能量有效性.文献[77]提出了分层马尔可夫目标追踪算法(Hierarchical Markov Target Tracking, HMTT).算法通过节点空间和时间的动态管理和轨迹预测,在能量节省的同时获取了较高的追踪精度.

不同的追踪策略的侧重点不同,但学者们一般都参考了文献[61,71]的框架和思路,以网络寿命、追踪精度等 QoS 指标为优化指标,设计相应的追踪策略.文献[78]提出了低能耗自组织协议(LESOP)用于大密度 WSN 的目标跟踪,并用一个 QoS 手柄 ρ 来决定跟踪误差和网络能量消耗之间的折衷.LESOP 协议是基于应用层和 MAC 层的跨层设计方法,传统网络结构中的重要组成部分传输层和网络层并没有包含在内,WSN 的跨层协议设计表明需要设计新的网络结构以代替原有的 OSI 网络模型.

3.2 追踪 QoS 框架及其跨层分析

在 WSN 框架内,出于测试床规模等方面的限制,现有针对面向移动目标追踪的 QoS 实际指标体系研究多关注追踪精度的改进,忽略对系统的实时性和网络生存周期的必要分析和论证.显然,作为面向应用的任务型网络,只有在满足基础服务质量保障指标的情况下,提升核心算法的有效性才是有意义的.

因此,面向移动目标追踪的无线传感器网络用户感知层指标应包括网络生存周期、感知时延和信息精度.这三类最高层抽象指标不仅互相耦合、制衡,而且引发连锁反应.例如,信息精度的提升往往需要数据的冗余作为保障,目前通行的方法是唤醒

更多工作节点,延长节点平均工作周期.而该机制一则易导致信道拥塞增加传输时延,二则在检测、定位这类协作算法时间空间复杂度过高的情况下易导致无法预计的处理时延,三则致使节点能源消耗过大过快,三管齐下,网络生存寿命及感知时延均无法得到保证,追踪任务完成质量堪忧.二者对整体感知时延的影响巨大.因此,单一、片面强调用户感知精度的 QoS 分析对于这样一个复杂动态的高阶网络控制系统来说显然是欠妥的.

因此,我们在三项综合 QoS 指标即精度、时延、网络生存寿命的总体框架下,依次考察节点部署、节点选择、数据传输和分布式写作算法四大任务模块内的相关映射指标(以下称为“分指标”)及跨模块分指标之间的因果和制约联系,并由此提出基于反馈和跨层设计的 QoS 保障机制.具体的 QoS 体系框架参见图 17.横向是用户感知 QoS 指标,纵向是离散的任务模块.显然,每一项用户感知层的服务质量均要求有一项或多项映射分指标与其对应.以下,我们将依次阐述跨模块映射指标之间的具体因果联系及其制衡.

(1)感知精度映射分析.纵向来看,每个任务模块都至少考虑了关于精度的一项或多项分指标,例如传感模型精度、检测与定位精度、链路估计精度与误码率以及预测精度,其中每项分指标依次作为后一项的前提和保障.基于这种强咬合性和因果性,我们在试图提高追踪策略总精度时不可片面偏重任何一项精度的完善而忽视其对一系列“果指标”及整个系统带来的影响,这给模型论证带来较大难度.然而,也正是基于这样明确的因果联系,我们不难看出精度的改进实际上最为依赖传感模型精度.因为虽然各个任务模块的精度映射环环相扣,但是作为第一“环”,如果传感模型的精度能够得到一定置信水平的保证,误差累积带来的系统不稳定性和不可控性几率就会大大降低;反之亦然.因此,图 17 中精度映射及因果分析,给我们的启示是追踪系统精度改进的关键在于传感模型精度.在希望快速镇定系统时,应调节和改变传感模型精度以在最短时间内使之稳定到某一水平,继而在微调阶段,应视其与设定值之间具体差异切换具体协作算法、链路估计算法或者预测算法.

(2)感知时延映射分析.感知时延映射分析较为单一,其最大影响因素来自节点通信中的传输时延,这就要求我们对无线链路功率调度以及 MAC 调度算法等这些易影响网络拥塞状况的算法进行进一步研究和实际试验,来保障传输速度及其鲁棒性

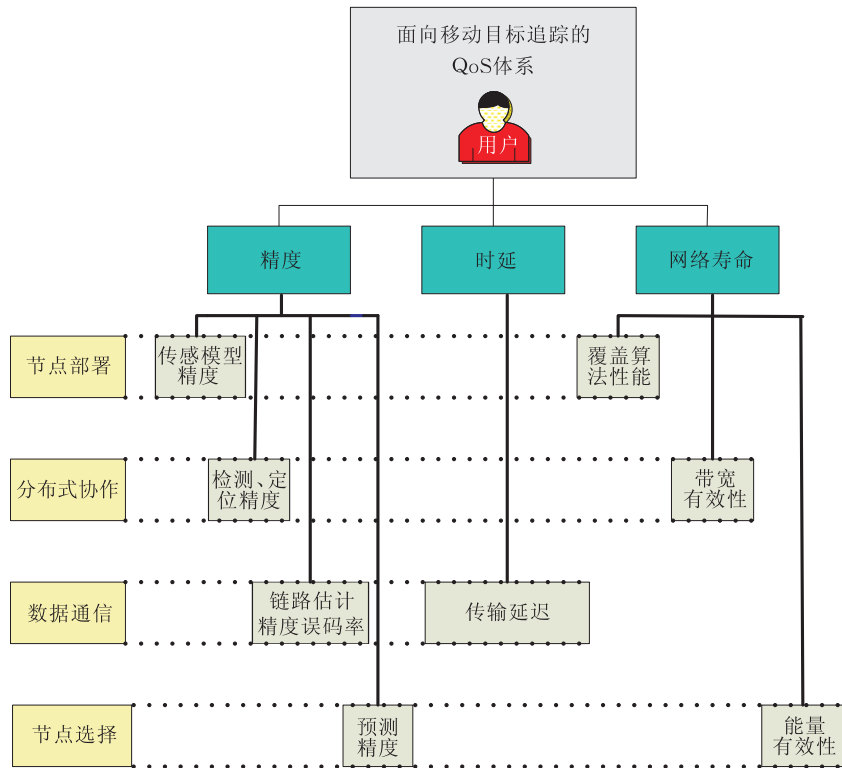


图 17 面向追踪的无线传感网络 QoS 映射指标体系

和可扩展性. 因此, 图 17 中感知时延映射分析给我们的启示在于追踪系统实时性的改进应基于模型验证(model validation). 模型验证主要应用于大规模复杂动态系统的鲁棒控制研究, 通过对实际系统以及模型系统施加相同输入, 观察输出的异同, 从而给出模型的概率置信水平以及不确定性函数的界. 因此, 当涉及具体单一算法有效性时, 一般采取模型验证的方法及大量的实验分析, 对嵌入各种算法的系统的实际性能指标进行综合测试和考察, 从而实现可行解与不可行解的初步划分.

(3) 网络生存周期映射分析. 在密度较高的网络部署内, 影响网络生存寿命的因素最主要来自于覆盖算法能量有效性、定位和检测等协作算法对原始数据的有效压缩以及基于预测的节点选择机制. 三者缺一不可, 并列、等加权地构成网络生存周期的三大基石. 因此, 网络生存周期的映射分析给我们的启示在于网络生存周期的延长平等取决于三项分指标中任何一项的改进. 换言之, 对其中任何一项的能量有效改进都将直接延长该网络的寿命. 相对简单、不互为因果的联系使得模型验证方法同样适用于网络生存周期的延长和改进, 唯一与感知时延分析不同的地方在于需要组合现有机制进行实验论证, 当算法(例如定位算法)比较纷繁的时候, 实验耗时及设计复杂度将等比上升.

综上所述, 实感知时延映射指标最为单一, 网络生存周期映射指标对其影响是等价、并行的, 最后感知精度的改进是最复杂的, 一项分指标的改进往往需要同时考虑其余“因指标”. 因此, 指标映射及改进的复杂度从高到低依次为感知精度、网络生存周期和感知时延. 这就为之后的实际系统服务质量保障提供了基础和依据.

以上分析了各个任务模块内的 QoS 指标映射, 下面我们考虑如何基于各项映射分指标之间的关联和制衡, 采取跨层设计和反馈控制的思想, 设计面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 保障机制.

图 18 是基于跨层设计与反馈思想的 QoS 保障结构体系图. 左虚线框内分别列举了用户抽象的 QoS 指标要求, 右虚线框内是该追踪系统实际达到的性能指标. 中间的方框表征任务模块的实现算法, 可以看成系统的被控对象, 系统 QoS 的保障就是通过调节这些算法中的参数或者切换不同算法来实现的. 以检测算法为例, 首先考察检测精度要求与实际精度之间的差值(精度余差)以及检测能耗要求与实际能耗节点之间的差值(能耗余差), 并分别将结果与事先设定的阈值进行比较, 做出“粗调”或者“微调”决策; 继而对照图 17 的启示, 从模型验证数据库中进行算法匹配, 联合节点选择精度、链路估计精度作为检测算法输入, 从而镇定系统.

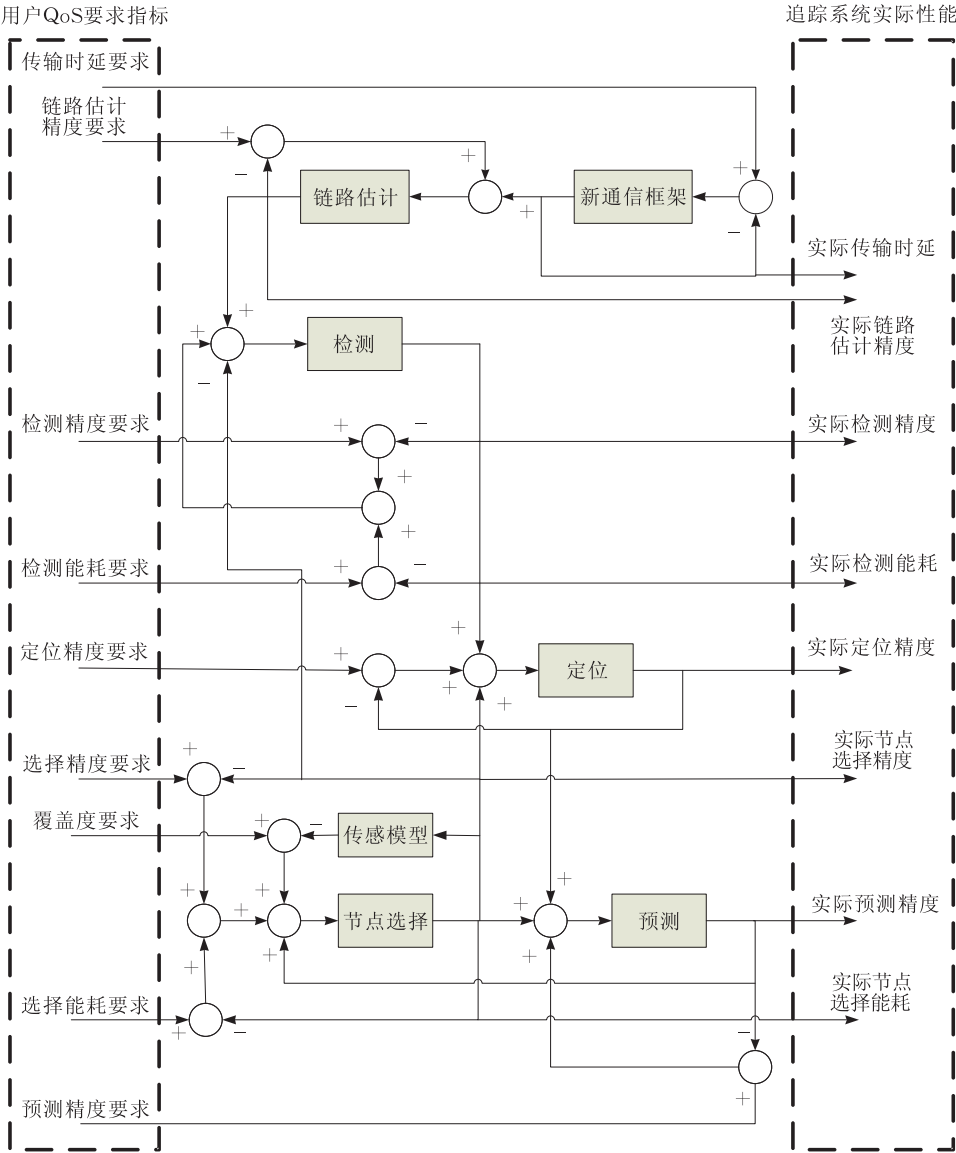


图 18 基于跨层设计和反馈的 QoS 保障结构体系图

图 18 最重要的贡献在于将关键模型及算法作为被控对象,将跨层设计参数和反馈控制结果结合起来作为参考输入,从而在控制的意义上保障面向移动目标追踪的无线传感器网络服务质量.从图 18 我们还可以看出:

- (1) 追踪系统由此简化为一个多级高阶反馈控制系统,主要以用户的抽象指标值与实际性能指标值之偏差来调节和评估各个通道算法和协议的有效性,从而令整个系统趋于稳定且最终满足用户的各类 QoS 要求;
- (2) 节点部署、数据通信、基于预测的节点作为检测与定位两大核心追踪算法的输入,均以不同程度影响着最终的追踪性能;
- (3) 节点部署和基于预测的节点选择两类任务模块各项 QoS 指标相互耦合和制衡最为严重,传感

模型、节点选择算法和预测算法 3 个通道的模型和算法互相关联和影响,在设计其中任一算法时均必须考虑跨层优化.

综合图 17 和图 18,我们得到追踪系统的 QoS 保障及控制机制,步骤如下:

- 1. 用户输入具体服务质量要求及感知精度、感知时延、网络生存周期,系统在初始状态下,即启用计算复杂度、带宽利用率最低的算法(即被控对象),分别得到实际性能指标.
- 2. 由于感知时延映射指标最为单一,网络生存周期映射指标对其影响是等价、并行的,感知精度中一项分指标的改进往往需要同时考虑其余“因指标”.基于此,我们按照先简单后复杂的原则来对三大指标设置优先权,依次控制及保障感知时延、网络生存周期和感知精度.
- 3. 感知时延保障.主要以无线链路功率调度以及 MAC 调度算法等这些易影响网络拥塞状况的算法为被控对象,在新通信框架下切换以匹配先期模型验证结果使得时延降低

到用户满意水平。

4. 网络生存周期保障. 其映射指标分别为:覆盖算法能量有效性、定位和检测等协作算法对原始数据的有效压缩以及基于预测的节点选择机制. 由于这三项分指标对于整体网络生存周期的影响是等价、并行的, 我们按照信息流的先后顺序进行算法的选取, 首先切换覆盖算法, 其次协作算法, 最后调节节点选择机制. 最后 3 种算法的兼容同样需要模型兼容及验证数据库的支持。

5. 感知精度保障. 如前所述, 感知精度映射指标众多且环环相扣, 因此我们按照因果顺序的前后进行逐个调节. 首先在余差非常大且抖动厉害时, 我们先切换传感模型及感知功率, 当余差缩小时, 调节检测、定位、预测等协同算法的置信水平、工作节点等参数, 最后考察链路不稳定性及差错控制编码的有效性. 鉴于差错控制编码对信道模型的依赖性较大, 可以对信道进行先简单后复杂的假设, 在计算复杂度和误码率进行折衷。

值得注意的是, 在一项控制变量内进行算法切换时, 由于每一种算法都因为优化目标的不同在具体硬件实现上存在很大差别, 必须同时考虑到不同控制变量间算法组合的兼容性和鲁棒性. 目前鉴于一类控制变量下可行算法数目并不是很多, 通过有效的先期模型论证手段可以预先诊断算法之间的冲突及避障, 但是在不久的将来, 随着嵌入式系统开发的深入和普遍, 各种各样的算法将纷至沓来. 因此, 面对组合的多样性及测试的复杂度, 如何设计一系列高效的模型验证手段来为复杂动态系统控制算法的可行性快速定界并排除故障, 是极为关键的。

同时, 精度、时延、能耗三类 QoS 指标中, 前二者均可以清晰量化, 而能耗普遍渗透在任何一个功能模块中, 且作为高度抽象层的感知用户, 不易量化成特定数值而输入系统. 因此, 在本反馈控制系统中, 我们定义用户指定的能耗指标为网络寿命, 系统实际能耗指标为预计网络寿命, 即根据目前算法和节点剩余能量来对系统网络寿命作出的预测, 而这是相对容易实现的。

4 总 结

我们在三项综合 QoS 指标即精度、时延、网络生存寿命的总体框架下, 依次考察节点部署、节点选择、数据传输和分布式写作算法四大任务模块内的相关映射指标(以下称为“分指标”)及跨模块分指标之间的因果和制约联系, 并由此提出基于反馈和跨层设计的 QoS 保障机制。

在面向移动目标追踪的无线传感器网络的框架内, 从任务模型的划分来看, 我们认为实时性的改善

方法是确定的, 网络寿命的延长方式是并行的, 精度的改进是较为复杂的; 从跨层反馈的观点来看, 我们认为面向移动目标追踪的无线传感器网络是一个多级高阶反馈控制系统, 本文最重要的贡献在于将关键模型及算法作为被控对象, 将跨层设计参数和反馈控制结果结合起来作为参考输入, 从而在控制的意义上保障面向移动目标追踪的无线传感器网络服务质量。

将来的工作主要是搭建中型规模测试床以对本文提出的反馈跨层 QoS 保障机制进行模型验证, 并提供数据库支撑, 来改进并完善面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 体系的设计及保障。

参 考 文 献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communication Magazine, 2002, 40(8): 102-114

[2] 10 emerging technologies that will change the world. MIT Technological Review, 2003, 106(1): 33-49

[3] 21 ideas for the 21st century. Business Week, 1999: 78-167

[4] Lin Chuang, Zeng Rong-Fei, Lei Lei, Xiao Zhen-Sha. Research on QoS architecture in beyond 3rd generation mobile communication system. Journal of Software, 2008, 19(1): 81-93(in Chinese)
(林闯, 曾荣飞, 雷蕾, 肖圳莎. 超三代移动通信系统的 QoS 体系结构研究. 软件学报, 2008, 19(1): 81-93)

[5] Lin Chuang, Lei Lei. Research on next generation internet architecture. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(5): 693-711(in Chinese)
(林闯, 雷蕾. 下一代互联网体系结构研究. 计算机学报, 2007, 30(5): 693-711)

[6] Lu J, Pan Y, Wang J, Yahaya A, Suda T. Next step in wireless sensor network QoS. IEEE JSAC Special Issue on Cross-Layer Optimized Wireless Multimedia Communications, 2006

[7] Chen D, Varshney P K. QoS support in wireless sensor networks: A survey//Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN 04). New York, USA, 2004: 227-233

[8] Hall P. Introduction to the Theory of Coverage Processes. New York: John Wiley and Sons, 1988

[9] Wang Y, Hu C, Tseng Y. Efficient deployment algorithms for ensuring coverage and connectivity of wireless sensor networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Wireless Internet (WICON 05). Budapest, Hungary, 2005: 114-121

[10] Yan T, He T, Stankovic J. Differentiated surveillance for sensor networks//Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 03). Los Angeles, USA, 2003: 51-62

[11] Zhang H, Hou J. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Ad Hoc & Wireless Networks, 2005, (1): 89-124

- [12] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava M. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2001. Anchorage, US, 2001; 1380-1387
- [13] Li X, Wan P, Frieder O. Coverage in wireless Ad hoc sensor networks. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(6): 753-763
- [14] Mehta D, Lopez M, Lin L. Optimal coverage paths in ad-hoc sensor networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'03). Anchorage, USA, 2003; 507-511
- [15] Kar K, Banerjee S. Node placement for connected coverage in sensor networks//Proceedings of the WiOpt 2003: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. Sophia-Antipolis, France, 2003
- [16] Wang X, Xing G, Zhang Y, Lu C, Pless R, Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks//Proceedings of the ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 03). New York, USA, 2003; 28-39
- [17] Wang B, Wang W, Srinivasan V, Chua K. Information coverage for wireless sensor networks. IEEE Communications Letters, 2005, 9(11): 967-969
- [18] Wang B, Chua K, Wang W, Srinivasan V. Worst and best information exposure paths in wireless sensor networks//Proceedings of the International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN'05). Wuhan, China, 2005; 52-62
- [19] Megerian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava M. Worst and best-case coverage in sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(1): 84-92
- [20] Ye F, Zhong G, Cheng J, Lu S, Zhang L. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks//Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'03). RI, USA, 2003; 46-58
- [21] Cardei M, Du D. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. Wireless Networks, 2005, 11(3): 333-340
- [22] Cao Feng, Liu Li-Ping, Wang Zhi. A new energy-efficient WSN deployment algorithm. Journal of Information and Control, 2006, 35(2): 147-153(in Chinese)
(曹峰, 刘丽萍, 王智. 能量有效的无线传感器网络部署. 信息与控制, 2006, 35(2): 147-153)
- [23] Sun Xi-Ce, Cao Feng, Wang Zhi. An optimized sensor nodes scheduling algorithm of multiple targets associated coverage in wireless sensor networks. Journal of Information and Control, 2008, to appear(in Chinese)
(孙喜策, 曹峰, 王智. 一种面向多目标关联覆盖的无线传感器网络节点优化调度算法. 信息与控制, 2008, 待发表)
- [24] Di T, Georganas N. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks//Proceedings of the 17th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Ontario, Canada, 2004; 1097-1100
- [25] Reijers N, Halkes G, Langendoen K. Link layer measurements in sensor networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Florida, USA, 2004; 224-234
- [26] Li Yan-Jun, Cao Feng, Chen Ji-Ming, Wang Zhi. Link estimation in sensor networks//Proceedings of the 1st Joint Conference on Harmonious Human Machine Environment. Kunming, China, 2005; 271-277(in Chinese)
(李燕君, 曹峰, 陈积明, 王智. 传感器网络中的链路估计研究//第1届全国和谐人机环境联合学术大会. 昆明, 中国, 2005; 271-277)
- [27] Yu Jing. Link quality analysis of wireless sensor networks [Dissertation of Bachelor's Degree]. Zhejiang University, Hangzhou, 2006(in Chinese)
(俞靓. 无线传感器网络链路分析[学士学位论文]. 浙江大学, 杭州, 2006)
- [28] Ganesan D, Estrin D, Woo A, Culler D. Complex behavior at scale: An experimental study of low-power wireless sensor networks. UCLA Computer Science Technical Report UCLA/CSD-TR, UCLA, 2003
- [29] Woo A, Culler D. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks. U. C. Berkeley Computer Science Division; Technical Report UCB/CSD-03-1270, 2003
- [30] Cerpa A, Wong J, Kuang L, Potkonjak M, Estrin D. Statistical models of lossy links in wireless sensor networks//Proceedings of the Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles, CA, USA, 2005; 81-88
- [31] Leskovec J, Sarkar P, Guestrin C. Modeling link qualities in a sensor network. Informatica, 2005, 29(4): 445-452
- [32] Li Yan-Jun, Wang Zhi, Sun You-Xian. Analyzing and modeling of the wireless link for sensor networks. Journal of Sensor Technology, 2007, 20(8): 1846-1851(in Chinese)
(李燕君, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络的链路分析与建模. 传感技术学报, 2007, 20(8): 1846-1851)
- [33] Shu L, Daniel J, Coslledo J. Error Control Coding. 2nd Edition. The Evolution of Untethered Communications, National Academy Press, 1997
- [34] Mostofi Y, Chung T, Murray R, Burdick J. Communication and sensing trade-offs in decentralized mobile sensor networks: A cross-layer design approach//Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Los Angeles, CA, USA, 2005; 118-125
- [35] Mostofi Y, Murray R. New design principles for estimation over fading channels in mobile sensor networks//Proceedings of the IEEE Control and Decision Conference. 2005
- [36] Ostrovsky R, Rabani Y, Schulman J. Error-correcting codes for automatic control//Proceedings of the 46th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Los Angeles, USA, 2005; 309-316
- [37] Jing Y, Hassibi B. Distributed space-time coding in wireless relay networks-Part I: Basic diversity results. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(12): 3524
- [38] Jing Y, Hassibi B. Distributed space-time coding in wireless relay networks-Part II: Tighter upper bounds and a more general case. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(12): 3536
- [39] Jing Y, Hassibi B. Cooperative diversity in wireless relay networks with multiple antenna nodes//Proceedings of the International Symposium on Information Theory. Adelaide, South Australia, 2005; 815

- [40] Li Yan-Jun, Wang Zhi, Sun You-Xian. Decision fusion under fading channel in resource-constrained wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, 18(5): 1130-1137 (in Chinese)
(李燕君, 王智, 孙优贤. 资源受限的无线传感器网络基于衰减信道的决策融合. *软件学报*, 2007, 18(5): 1130-1137)
- [41] Radner R. Team decision problems. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1962, 33(3): 857-881
- [42] Viswanathan R, Varshney P K. Distributed detection with multiple sensors: Part I—Fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(1): 54-63
- [43] Appadwedula S, Veeravalli V V, Jones D L. Energy-efficient detection in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(4): 693-702
- [44] Xiao J J, Luo Z Q. Universal decentralized detection in a bandwidth-constrained sensor network. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(8): 2617-2624
- [45] Chamberland J, Veeravalli V V. Decentralized detection in sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(2): 407-416
- [46] Chamberland J, Veeravalli V V. Asymptotic results for decentralized detection in power constrained wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1007-1015
- [47] Chen B, Tong L, Varshney P K. Channel-aware distributed detection in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(4): 16-26
- [48] Chen B, Jiang R, Kasetkasem T, Varshney P K. Channel aware decision fusion in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(12): 3454-3458
- [49] Liu B, Chen B. Channel-optimized quantizers for decentralized detection in sensor networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(7): 3349-3358
- [50] Lin Y, Chen B, Suter B. Multiple description quantizer design for distributed sensor networks//*Proceedings of the Conference on Information Sciences Systems*. Baltimore, MD, 2005
- [51] Chen Hong-Long, Li Hong-Bin, Wang Zhi. Research on TDoA-based localization for wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2008, 29(8): 11-21 (in Chinese)
(陈鸿龙, 李鸿斌, 王智. 基于 TDoA 测距的传感器网络安全定位研究. *通信学报*, 2008, 29(8): 11-21)
- [52] Chen J C, Yao K, Hudson R E. Source localization and beamforming. *IEEE Signal Magazine*, 2002, 19(2): 30-40
- [53] Yao K, Hudson R E, Reed C W, Chen D, Lorenzelli F. Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1555-1567
- [54] Li D, Hu Y H. Energy based collaborative source localization using acoustic microsensor array. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2003, (4): 321-337
- [55] Patwari N, Hero A O. Using proximity and quantized RSS for sensor localization in wireless networks//*Proceedings of the 2nd International ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. San Diego, CA, 2003: 20-29
- [56] Oshman Y, Davidson P. Optimization of observer trajectories for bearings-only target localization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 892-902
- [57] Kaplan L M, Le Q, Molnar P. Maximum likelihood methods for bearings-only target localization//*Proceedings of the IEEE International Conference Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2001)*. UT, USA, 2001, 5: 3001-3004
- [58] Sheng X, Hu Y H. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(1): 44-53
- [59] Niu R, Varshney P K. Target location estimation in sensor networks with quantized data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(12): 4519-4528
- [60] Li H B, Shen X F, Zhao J, Wang Z, Sun Y X. INEMO: Distributed RF-based indoor location determination with confidence indicator. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, Article ID 216181, 11
- [61] Brooks R R, Griffin C, Friedlander D. Self-organized distributed sensor network entity tracking. *International Journal of High Performance Computer Application*, 2002, 16(3): 207-219
- [62] Patten S, Poduri S, Krishnamachari B. Energy-quality tradeoffs for target tracking in wireless sensor networks//*Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03)*. Palo Alto, California, USA, 2003: 32-46
- [63] Yang H, Sikdar B. A protocol for tracking mobile targets using sensor networks//*Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*. New York, USA, 2003: 71-81
- [64] Xu Y Y, Qi H R. Mobile agent migration modeling and design for target tracking in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2008, 6(1): 1-16
- [65] Xu Y Q, Winter J L, Lee W C. Prediction-based strategies for energy saving in object tracking sensor networks//*Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Data Management*. PA, USA, 2004: 346-357
- [66] Yang L Z, Feng C, Rozenblit J W, Qiao H Y. Adaptive tracking in distributed wireless sensor networks//*Proceedings of the 13th Annual IEEE International Symposium and Workshop on Engineering of Computer Based Systems*. Tucson, AZ, USA, 2006: 103-111
- [67] Xiao W D, Wu J K, Xie L H, Dong L. Sensor scheduling for targets tracking in networks of active sensors. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(6): 922-928
- [68] Pathirana P N, Savkin A V, Jha S. Mobility modelling and trajectory prediction for cellular networks with mobile base stations//*Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. California, USA, 2003: 213-221
- [69] Wang X, Ma J J, Wang S, Bi D W. Prediction-based dynamics energy management in wireless sensor networks. *Sensors*, 2007, 7(3): 251-266
- [70] Rowaihy H, Eswaran S, Johnson M, Verma D, Bar-Noy A. A survey of sensor selection schemes in wireless sensor networks//*Proceedings of the SPIE 6562*. USA, 2007: 65621A
- [71] Zhao F, Shin J, Reich J. Information-driven dynamic sensor collaboration for tracking applications. *IEEE Signal Magazine*, 2002, 19(2): 61-72

- [72] Wang H B, Yao K, Pottie G, Estrin D. Entropy-based sensor selection heuristic for target localization//Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Berkeley, USA, 2004; 36-45
- [73] Pahalawatta P, Pappas T, Katsaggelos A. Optimal sensor selection for video-based target tracking in a wireless sensor network//Proceedings of the International Conference on Image Processing. Singapore, 2004, 5: 3073-3076
- [74] Wang Z B, Li H B, Shen X F, Sun X C, Wang Z. Tracking and Predicting Moving Targets in Hierarchical Sensor Networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Sanya, China, 2008; 1169-1174
- [75] Tseng Y C, Kuo S P, Lee H W, Huang C F. Location track-

ing in a wireless sensor network by mobile agents and its data fusion strategies. Computer Journal, 2004, 47(4): 448-460

- [76] Jeong J, Hwang T, He T, Du D. MCTA: Target tracking algorithm based on minimal contour in wireless sensor networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). Anchorage, Alaska, USA, 2007; 2371-2375
- [77] Yeow W L, Tham C K, Wong W C. Energy efficient multiple target tracking in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(2): 918-928
- [78] Song L, Hatzinakos D. A cross-layer architecture of wireless sensor networks for target tracking. IEEE Transactions on Networking, 2007, 15(1): 145-158



YU Jing, born in 1983, Ph.D. candidate. Her research interests encompass task allocation and cooperative control over multiple robots.

WANG Zhi-Bo, born in 1984, Ph.D. candidate. His research interests encompass target tracking and node scheduling for WSN.

LUO Ji-An, born in 1983, Ph.D. candidate. His research interests encompass distributed detection and collaborative signal processing for WSN.

SUN Xi-Ce, born in 1985, M. S. candidate. His research interests encompass coverage control and network security for WSN.

WANG Zhi, born in 1969, Ph.D., associate professor, Ph.D. supervisor. His research areas include collaborative signal processing and networking, mobile sensing systems, and industrial communication and networking.

Background

As a key enabler, Quality of Service (QoS) provides a feasible mechanism to enhance the overall network performance and prolong the lifetime by eliminating communication overload in terms of restricted resource in sorts of networks. But up till now, there is no uniform QoS framework available for Wireless Sensor Networks (WSN) in that diverse application scenarios should be taken into consideration at first and call for different metrics for system design. It's more meaningful to propose the tailored QoS framework in compliance with individual and critical applications within WSN, together with ubiquitous significance.

This paper addresses the QoS framework design problem based on mobile target tracking application in WSN. As a typical scenario, it not only focuses on the detection accuracy and the time delay of target location/speed vectors, but also pays attention to prolonging the network lifetime in stable and extended manner. By realizing that QoS breakdown into protocol stack calls for isolated drawbacks, we integrate the analysis in sequence of consecutive information flow in mobile target tracking application and elaborate on how to fulfill the system QoS requirement by implementing sensor deployment, data transmission, collaboratively distributed detection and prediction strategies. Instead of summarizing the re-

search outcome only, we also propose the QoS design stack in terms of application driven metrics and ubiquitous significance. Some systematic support protocols and architectures are covered to make all functional modules and QoS measurements facile in our paper to follow. Combining with our latest progress, the optimization problems and implementation issues are under discussion and presented as the future directions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60434030, No. 60773181 and No. 60873223, the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China under grant No. 2006AA01Z218. The Collaborative Sensing and Networking Group of State Key Lab of Industrial Control Technology in Zhejiang Univ. have been making unremitting progress on theoretical and practical researches on Wireless Sensor Networks and Industrial Wireless Networks. 20+ papers are published in journals and conferences that SCI or EI indexed per year. 10+ academic symposiums are held per year with University of Wisconsin-Madison, California Institute of Technology, INRIA-LORIA, Hong Kong Polytechnic University, Simon Fraser University and Hanyang University. We also established long-term cooperation with Siemens and Huawei.