

无线传感器网络中的目标跟踪算法

唐 剑^{1,2}, 史浩山², 韩忠祥^{1,2}

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 在综合分析大量文献和最新研究结果的基础上, 探讨无线传感器网络目标定位和跟踪算法的性能评价标准和分类方法, 着重研究近年来该领域具有代表性的算法和特点, 给出了比较结果及相应分析, 并指出进一步的研究方向。

关键词: 无线传感器网络; 目标定位; 目标跟踪

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)05-0025-05

传统的目标跟踪系统, 如雷达系统, 通常由有限的有源探测站点(雷达)以及数据处理中心构成, 并且探测站点会配置较高处理能力的设备以及相对充足的资源。基于无线传感器网络(DWSN, Distributed Wireless Sensor Network)的目标跟踪系统的最大特点是网络由众多资源有限的无源探测节点组成, 系统处理的数据量随着目标数、节点数呈几何级数增加, 此外单个节点对能量、时间、处理能力、通信带宽等资源有严格限制。在DWSN中实现目标跟踪监视, 与传统的目标跟踪系统相比, 其跟踪系统结构即相似又不完全相同。基于DWSN的目标跟踪过程通常包括: 节点自主监测阶段、协作定位、目标状态估计、目标预测、预测区域节点激活。通常为了节能的目的, DWSN节点配置无源传感器探测运动目标发出的信号(如声、光、红外、振动等), 资源受限的单个节点只能得到精度不高的探测结果。正因为单个节点SNR低, 因此需要在特定目标区域内的节点之间通过协作信号处理实现目标初步定位, 向数据处理中心发送融合后的目标位置信息比发送原始探测信息能够大幅度降低传输数据量。在数据处理中心, (如Sink节点或拥有较多资源的超节点), 执行相对复杂的目标状态估计算法(如卡尔曼滤波、粒子滤波等)得到目标运动速度、方向、加速度等状态参数, 据此可推测目标将要到达的区域, 通过节点激活协议启动预测区域内的节点参与目标跟踪。

通过以上分析可以看出, 基于DWSN的目标跟踪应当采用层次型的结构, 即在系统中包含为了完成不同任务具有不同功能配置的节点。

1 无线传感器网络目标定位系统和算法的分类

尽管无线传感器网络目标定位系统和算法的分类还没有一个统一的标准, 也不一定适用于每一种定位系统和算法, 但下面这些分类方法能在一定程度上刻画不同定位技术的特点。

1.1 集中式算法与分布式算法(Centralized Computation versus Distributed Computation)

集中式算法就是将所需信息传送到信息处理中心, 由处理中心实现目标定位跟踪计算的方式, 如BB算法、CPF算法; 分布式计算是指依赖节点探测信息和节点间信息交换与协调, 通过节点本地运算获得目标位置轨迹信息, 例如DSTC算法。

集中式计算的优点在于从全局角度统筹规划, 计算量和存储量几乎没有限制, 可以利用现有的大多数目标跟踪算法(如卡尔曼滤波跟踪算法等), 并获得较好的跟踪效果。它的缺点已很明显: 网络通信量过大, 与中心节点较近的节点容易过早消耗完电能, 导致整个网络与中心节点信息交流的中断, 无法实时定位等。

收稿日期: 2006-03-09

基金项目: 国防基础研究基金资助项目(K1804060127); 教育部博士点基金资助项目(20050699037)

作者简介: 唐 剑(1970-), 男, 湖南浏阳人, 博士生, 主要从事动目标检测研究;

史浩山(1946-), 男, 河南开封人, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机通信网研究。

1.2 以节点为中心与以位置为中心

以节点为中心的目标跟踪算法假设节点不仅有独立的识别标示,而且在统一的坐标系下其位置是已知的,这样就可以根据汇报事件的节点识别事件发生的地点;以位置为中心的目标跟踪算法首先按照某种特定的规则将 DWSN 的监测范围划分为许多地理区域,每个区域内发生的事件以区域标示来识别,在区域内由特定的(或者动态选择的)节点管理区域内的信息处理与上报问题。

以位置为中心的的目标跟踪算法利用地理区域管理节点,其优点是不需要每个节点准确地知道自己的坐标位置,只要了解其所在的区域以及区域内的管理节点。区域内节点的探测信息汇聚到管理节点上报,便于实现数据融合以及区域内的定位跟踪算法。但其缺点也很明显,对于随机部署的 DWSN 节点,很难在统一的坐标系下合理地划分 DWSN 的监测空间,并且随着 DWSN 的监测范围的扩展,问题将变得更加复杂。

2 典型的目标定位系统与算法

对典型算法加以归纳总结,就已公开的文献和技术资料,比较有影响力的工作有以下 5 个方面。

2.1 基于二进制探测的目标跟踪算法

2.1.1 CTBD(Cooperative Tracking with Binary - Detection) 算法^[1]

伊利诺大学香槟城校区加盟校的 K. Mechitov 等针对 DWSN 节点功能有限的特点,提出一种基于二进制探测的目标跟踪算法,与以往目标定位跟踪算法要求测量目标相对距离(或方位角)不同,该算法仅需要节点能确定目标是否在其最大探测范围内(“0”:没有目标,“1”:存在目标)。

算法基本思想:协作目标定位跟踪算法包含 4 个主要部分:①每个探测节点记录目标出现在其监测范围内的时间;②相邻探测节点之间彼此交换目标出现的时间、节点位置等信息;③计算探测节点位置的加权平均值作为目标位置的估值;④由一系列目标位置估值利用分段线性拟和算法估计目标运动轨迹。

由于计算目标轨迹采用的是时空分离的节点探测信号,因此通过分段线性拟和算法得到的目标位置估值精度远高于原始探测值。DWSN 持续汇聚传感器节点提供的目标位置估计值,并用于更新轨迹估值,通过调整线段拟和需要的位置估计点数,来满足算法实用所必须达到的实时性和精确度要求,同时也满足了 DWSN 的节约能源限制。因此在算法实现过程中,通过动态调整线性拟和需要的目标位置估值数量,在强实时要求下用少量的点迹估值实现轨迹的粗略估计,然后通过刷新轨迹逐步实现目标轨迹的精确估计。

2.1.2 BPS(Binary Proximity Sensors)算法^[2]

加州大学的 Wooyoung Kim 和伊利诺大学的 K. Mechitov 在研究二进制探测、目标轨迹逼近的基础上提出一种应用于传感器网络的目标跟踪方案,系统中每个节点传感器仅提供 1bit 信息描述目标是否存在于其探测区域。假设运动目标可以任意改变速度和方向,为了提高精度降低算法复杂度,算法采用分段线性逼近的方法拟和出目标运动轨迹,即假设目标在相对小的滑动时间窗口内目标匀速运动且轨迹是一段直线。跟踪系统将 DWSN 内节点分为两类:探测节点、跟踪节点,探测节点仅完成目标信息收集工作,跟踪节点负责目标有关参数计算工作。

在此跟踪算法框架内,采用不同的权值计算方式,可以建立不同的目标跟踪系统,目标跟踪算法性能优劣取决于算法采用的权值计算方式。探测节点越接近目标移动轨迹目标在节点探测区域内停留的时间越长,根据目标在节点探测区域内停留时间有简化法、距离期望值法、路径距离法等 3 种基于节点-目标接近度(距离)权值计算方案。

2.2 基于精确定位的跟踪算法

2.2.1 DSLT(Decentralized Source Localization and Tracking)算法^[3]

Wisconsin - Madison 大学计算机系的 Rabbat 和 Nowak 提出一种适用于 DWSN 的分布式定位跟踪算法。该算法是一种基于信号强度的定位算法,利用接收信号强度定位信号源,算法基本思想:网络中的节点根据彼此之间的相邻关系形成一个数据处理序列,目标参数估计算法将按照这个处理序列在网络内部循环执行。当一个节点接收到当前目标参数估值之后,根据节点本地探测数据微调当前目标参数估值得到新估值,然后将更新估值发送给下一个邻居节点。

算法特点:当网络范围增长的情况下,通信量较低,是一种分布式的协作处理算法。缺点是在网络范围广,节点数众多的情况下难以形成一种合理的数据处理序列;算法的收敛特性随着节点探测误差大小、目标

运动速度快慢变得更加复杂。

2.2.2 DCATT(Dynamic Clustering for Acoustic Target Tracking)算法^[4]

针对传感器网络节点探测范围、通信距离以及能量等方面的限制,伊利诺大学的 W-P Chen 等人提出一种轻量级的分布式动态簇目标跟踪算法:DCATT 算法。该算法基于层次型的 DWSN,即 DWSN 中由低密度分布的高性能 CH(Cluster Head)节点和高密度分布的低端节点组成。

算法基本思想:网络内的节点不仅知道自身位置坐标,而且通过广播建立节点相邻关系表保存本节点相邻节点的信息。当网络中某个 CH 探测到的声音信号超过预先设定的检测门限,该簇首变为活跃状态同时组织簇结构,由 CH 广播信息请求数据包,要求临近节点加入簇并向簇首提供探测信息,由 CH 实现目标定位算法,并将定位信息汇报给数据处理中心。在簇形成过程中,DCATT 算法采用两阶段簇首选举,有效地减少网络通信冲突。两阶段广播机制:第一阶段,广播能量包,包含目标信号能量强度信息;第二阶段,广播签名包(Signature Packet),包含目标详细信息。具体过程如下:CH 随机设置能量包(Energy Packet)广播延迟时间 t_1 ; t_1 时间到,CH 广播能量包,同时设置签名广播包延迟时间 t_2 ,如果在此期间监听到包含信号强度更大的能量包或签名包,则该 CH 节点退出簇首竞争过程; t_2 时间到,CH 广播签名包确认簇首身份。通过两阶段簇首竞争,CH 间彼此协作确保同一时间针对同一目标只有一个对应的 CH 处于活跃状态。簇首采用两种算法定位目标:一种是基于 Voronoi 图的粗定位算法,选择探测信号强度最大的节点位置作为目标位置估值;另一种是基于非线性最优解的精确定位算法。

2.3 时空组合定位算法

2.3.1 DSTC(Dynamic Space-Time Clustering)算法^[5]

宾夕法尼亚州立大学的 Friedlander D. 等提出 DSTC 算法,目标是精确表示 DWSN 监测区域内发生事件的动态处理过程。WSN 中的节点动态组成时空相邻(Space-Time Neighborhood)的簇结构,一旦组织成簇结构,DWSN 节点组合本地数据信息表示周围发生的事件(Event),通过时空相邻簇内节点之间交换目标信息,确定目标类型以及目标轨迹参数。

DSTC 算法流程:算法假设 DWSN 节点探测到的信号能量与目标同节点之间的距离成反比,节点在一段时间内探测的信号峰值对应该时间段内目标距离节点的最近点(Closest Point of Approach; CPA)。节点传感器的探测数据存入节点探测数据缓冲区,节点通过对 Δt 时间内的探测数据处理得到本地 CPA 事件,节点 i 在 CPA 时间 j 探测到目标信号峰值因而产生 CPA 事件 e_{ij} , e_{ij} 对应于目标的时空坐标 $(\bar{x}_i(t_j), t_j)$ 。 $\bar{x}_i(t_j)$:节点 i 在 t_j 时刻的坐标。节点广播 CPA 事件同时在本地 CPA 事件缓冲区保存,簇形成(Form Clusters)部件比较本地 CPA 事件与接收的 CPA 事件,发现峰值信号时空坐标的动态窗口,所有发出 CPA 事件落入该动态窗口的节点形成 CPA 事件簇,通过对簇内 CPA 事件信息的处理得到包含目标坐标、发现时间、目标速度、目标类型的目标事件(Target Event)。

2.3.2 BB(Blind Beamforming)算法^[6]

Beamforming 算法:是一种基于 DOA 的目标定位算法。该算法测量目标声音信号到达不同节点的时延差异计算目标信号方位角 DOA,利用 DOA 估算目标位置。算法不足之处在于造成 DOA 出现误差的原因较多:目标信号抽样周期;节点间时钟同步误差;信号到达时间与时戳标注延迟;节点定位误差。该算法可获得较高的目标定位精度,但算法要求全网络范围内时间同步,这造成 WSN 无法容忍的能耗。

2.3.3 DSTC、beamforming 组合算法^[7]

Shashi Phoha 等人在分析比较 DSTC 算法和 beamforming 算法特点的基础上,提出两种组合算法:Beamforming Controlled DSTC 和 DSTC Logic Controlled Beamforming。

前者基本思想是由少量 Beamforming 节点(配置多个高性能传感器)和大量廉价 DSTC 节点组成 DWSN,通常 DSTC 节点处于低功耗工作状态,由稀疏分布的 Beamforming 节点通过三角定位法确定目标位置。当 Beamforming 节点不能确定特定目标位置或者能量不足的时候,可唤醒 DSTC 节点实现目标定位。

后者基本思想是利用 DSTC 逻辑动态选择目标轨迹附近的多个节点构成目标跟踪簇,簇内节点运行 beamforming 算法定位目标位置。

算法特点是采用分段执行方案,先在稀疏控制子网中执行节点选择算法,选择一组节点构成跟踪子网,由跟踪子网节点在控制子网指导下执行跟踪算法。分段执行方案利用各种算法优点实现系统综合性能最优。

2.4 自适应目标跟踪(ATT, Adaptive Target Tracking)^[8]

Xingbo Yu 等人提出一种基于目标跟踪性能的传感器网络信息获取协议,该综合考虑目标跟踪性能和节点能耗要求,从而实现一种能够显著降低能耗提高传感器网络节点寿命的协议。算法核心思想是:DWSN 中的节点分为探测节点和服务节点。探测节点主要包含节点状态管理、精度驱动的自适应处理、目标预测模型;服务节点主要实现自适应精度设置、传感器节点选择、目标预测模型、探测数据管理。探测节点探测到目标位置与上次报告的位置偏差大于最大测量误差时,将探测的目标信息传送至服务节点,服务节点采用三角定位法计算目标位置,同时利用轨迹质量因子更新节点最大测量误差,将该最大测量误差反馈给测量节点,调节测量节点报告目标信息的频度,由此可见,对于轨迹质量不好的目标,测量节点加大信息报告频度,从而可以改善目标跟踪轨迹质量,反之,减少汇报达到节能目的。

2.5 基于粒子滤波(PF)的跟踪算法

在 DWSN 中实现目标跟踪的算法,必须准确地估计目标源位置序列。目标源定位是估计传感器网络探测范围内移动目标的瞬时位置,常用的最大似然估计(ML)定位算法虽然可以得到较好的定位结果,但是 ML 算法对参数变化敏感,且在多目标跟踪环境下算法实现复杂度较高。Gordon 提出的粒子滤波器(PF)算法^[9],很好地解决了在非高斯噪声环境下非线性模型下运动目标跟踪问题。威斯康星麦迪逊大学的 X-H Sheng 和 Y-H Hu 提出将该算法应用于 DWSN 中目标定位跟踪,即实现基于 CPF (Centralized Particle Filter) 算法^[10]对运动目标序列化定位跟踪。

粒子滤波器算法需要复杂迭代过程,因此计算量大且要求存储大量的粒子数据,并不适合在资源有限的 DWSN 节点上运行。由于 PF 算法过于复杂,为了适应传感器网络节点资源有限的特点,05 年美国 Wisconsin 大学电子工程与计算机系的 X-H Sheng 与 Y-H Hu 进一步改进 CPF 算法,提出适合于传感器网络目标跟踪的 DPF (Distributed Particle Filters) 算法。

算法基本思想是通过两步滤波计算估计目标的状态信息:将传感器网络中各节点的观测值划分为互不关联的多个群。第一步,在一个群中按照一定的顺序执行本地粒子滤波算法;第二步,并行运行本地粒子滤波算法获取本地足够的统计量,并将这些统计量发送到处理中心用以获得最终估计。

3 分析比较

利用下表对前面讨论的目标跟踪算法性能进行简单的比较分析。算法优劣是相对的,不同的算法针对不同度目标提出,比如 BB、CPF、DPF 算法针对精度问题,ATT 针对能耗和性能优化,DSTC、CTBD 和 DCATT 针对系统实时性和扩展性,每种算法都有各自的特点。

表 1 DWSN 目标定位跟踪算法的性能比较

算法	精度	可扩展	复杂度	能耗	实时性	容错能力	类型描述
DSTC	较高	好	低	低	高	强	节点为中心分布式算法
BB	< 1m	差	一般	高	差	较差	节点为中心集中式算法
DSTC、BB 组合	较高	好	一般	较低	较高	强	节点为中心分布式算法
DSLT	较高	较差	低	较低	差	较差	位置为中心分布式算法
DCATT	较高	好	低	低	高	强	位置为中心分布式算法
CTBD	低	好	低	低	高	较强	节点为中心分布式算法
BPS	较高	一般	低	低	高	强	位置为中心分布式算法
ATT	较高	低	低	较低	一般	强	位置为中心分布式算法
CPF	高	差	高	高	差	强	节点为中心集中式算法
DPF	高	一般	高	一般	差	强	位置为中心分布式算法

通过上表分析可知,由于采用了粒子滤波器算法,CPF、DPF 算法具有较高的定位精度,由于这些算法相对复杂,因此对设备要求较高,适合于在系统实时性要求不高、跟踪性能要求较高的系统中应用,如野生动物保护、边境防卫。DCATT、DSTC、DSTC 和 CTBD 算法不仅能满足系统高实时性要求,而且容错能力较强,比较适合跟踪运动速度较快、机动性较强的目标(如车辆),此外兼顾跟踪性能和系统能耗,可以结合 ATT 算法提供的解决思路,综合运用可以取得更好的应用效果。

4 总结与展望

近几年,DWSN 应用问题研究取得了丰富的研究成果。特别是进入 21 世纪后,对基于 DWSN 的目标跟踪应用研究有了许多新颖的解决方案和思想。但是,这个领域的研究从总体上说尚处于一个起步的阶段,我们认为除了对跟踪算法本身的研究外,可能的热点研究方向包括:①算法性能评价标准的量化;②建立标准的仿真验证系统来模拟目标跟踪系统的实现;③综合应用已有的成果由成千上万节点组成的大规模或超大规模网络实现低成本(时空、能耗、价格等)和高精度的跟踪系统;④在不同的网络环境下研究具有高精度、低能耗、自适应的目标定位算法;⑤结合数据融合技术,减少系统内冗余数据,提高资源利用率,改善系统总体性能。

参考文献:

- [1] Mechitov K, Sundresh S, Kwon Y, et al. Agha. Cooperative Tracking with Binary - Detection Sensor Networks[A]. Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems[C]. 2003, 332 - 333.
- [2] Kim, Woo Young, Kirill Mechitov, et al. On Target Tracking with Binary Proximity Sensors[A]. Fourth International Conference on Information Processing[C]. Sensor Networks (IPSN05); 2005, 125 - 129.
- [3] Rabbat M G, Nowak R D. Decentralized Source Localization and Tracking[A]. in Proceedings of the 2004. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Montreal[C]. Canada; 2004, 921 - 924.
- [4] Chen Wei - Peng, Hou J C, Lui Sha. Dynamic Clustering for Acoustic Target Tracking in Wireless Sensor Networks[A]. Network Protocols 2003. Proceedings 11th IEEE International Conference[C]. 2003, 284 - 294.
- [5] Friedlander D, Griffin C, Jacobson N, et al. Dynamic Agent Classification And Tracking Using An Ad Hoc Mobile Acoustic Sensor Network[A]. submitted to the Eurasip Journal on Applied Signal Processing[C]. 2002, 215 - 220.
- [6] Yao K. Blind Beamforming on a Randomly Distributed Sensor Array System[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16; 1555 - 1567.
- [7] Phoha S, Jacobson N, Friedlander D, et al. Sensor Network Based Localization and Target Tracking Through Hybridization in the Operational Domains of Beamforming and Dynamic Space - Time Clustering[A]. Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM 03. IEEE[C]. 2003; 2952 - 2956.
- [8] Yu Xingbo. Adaptive Target Tracking in Sensor Networks[A]. 2004 Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference[C]. San Diego; 2004, 253 - 258.
- [9] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel Approach to Nonlinear/Non - Gaussian Bayesian State Estimation[J]. Radar and Signal Processing IEE Proceedings F. 1993, 140; 107 - 113
- [10] Sheng X - H, Hu Y - H. Sequential Acoustic Energy Based Source Localization Using Particle Filter in a Distributed Sensor Network[A]. ICASSPO4[C]. 2004, 972 - 996.

(编辑:门向生)

Tracking Algorithm for Wireless Sensor Networks

TANG Jian^{1,2}, SHI Hao - shah², HAN Zhong - xiang^{1,2}

(1. The College of Electronic Information, North-western Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. The Communication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract : Based on the analysis of a great deal of recent technical reports and research results on WSN, the evaluation criterion of the performance and the taxonomy for wireless sensor networks target localization and tracking algorithm are described, the principles and characteristics of recent representative localization and tracking approaches are discussed and presented in detail, the directions of research in this field are introduced.

Key words: wireless sensor networks; target localization; target tracking